

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ІМЕНІ ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕНЕРГЕТИКИ: БЕЗПЕКА, СТІЙКІСТЬ, ІТ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ

XXIII Міжнародна науково-практична конференція
молодих вчених та студентів

До 40-річчя Чорнобильської катастрофи

17–22 квітня 2026 року, м. Київ



Київ-2026

УДК 620.9(062)+621.311(062)
С91

Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: безпека, стійкість, ІТ та екологічний моніторинг : XXIII Міжнар. наук.-практ. конф. мол. вчених і студ. ; до 40-річчя Чорнобильської катастрофи, м. Київ, 17–22 квіт. 2026 р. – Електрон. текст. дані (1 файл). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2026. – 470 с.

ISBN 978-966-990-255-9 (Ел.)

Подано тези доповідей XXIII Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики: безпека, стійкість, ІТ та екологічний моніторинг» (до 40-річчя Чорнобильської катастрофи) за такими напрямками: атомна енергетика, ядерна захищеність і нерозповсюдження, теплогідравлічні процеси в тепло- і парогенеруючих установках, сучасні технології в тепловій та альтернативній енергетиці, проблеми теоретичної і промислової теплотехніки, енергетичний менеджмент та інжиніринг, автоматизація енергетичних процесів, стійка енергетика, аспекти розвитку інженерії програмного забезпечення в енергетиці, інформаційні технології та комп'ютерне моделювання.

Головний редактор

О. Ю. Черноусенко, д-р техн. наук, проф.

Заступник головного редактора

А. С. Соломаха, канд. техн. наук, доц.

Редакційна колегія:

В. В. Середа, канд. техн. наук, доц.

П. П. Меренгер, ст. викл.

Н. А. Буяк, канд. техн. наук, доц.

П. В. Новіков, канд. техн. наук, доц.

А. А. Демчишин, канд. техн. наук, доц.

І. А. Остапенко, асист.

Т. Б. Бібік, канд. техн. наук, ст. викл.

М. В. Воробйов, канд. техн. наук, доц.

Н. В. Федорова, д-р техн. наук, проф.

Відповідальний секретар

О. В. Авдєєва

Подається в авторській редакції за рішенням

Вченої ради Навчально-наукового інституту атомної та теплової енергетики

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

(протокол № 2 від 30 березня 2026 р.)

ISBN 978-966-990-255-9 (Ел.)

© Автори тез доповідей, 2026

© КПІ ім. Ігоря Сікорського (НН ІАТЕ), 2026

Пленарні доповіді

НОРМАТИВНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ТА ЕКСПЕРТНІ ОЦІНКИ БЕЗПЕКИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОМПЛЕКСУ НОВОГО БЕЗПЕЧНОГО КОНФАЙНМЕНТУ ТА ОБ'ЄКТА «УКРИТТЯ» В УМОВАХ ВІЙСЬКОВИХ ЗАГРОЗ

1. Вплив військових загроз на безпеку експлуатації комплексу НБК-ОУ

Безпека експлуатації комплексу Нового безпечного конфайнменту та об'єкта «Укриття» (далі – комплексу НБК-ОУ) з початком повномасштабної агресії російської федерації, як і безпека ядерних установок та інших об'єктів, призначених для поводження з радіоактивними відходами (далі – РАВ) в Україні, опинилася під загрозою військових впливів, які не враховуються під час проєктування ядерних установок та об'єктів, призначених для поводження з РАВ, зокрема ракетних атак і ударів безпілотними літальними апаратами (далі – БПЛА).

Військові впливи, а також окупація ядерних установок та об'єктів, призначених для поводження з РАВ, є абсолютно неприпустимими з огляду на потенційні радіаційні наслідки для персоналу, населення та навколишнього природного середовища. Це має особливе значення для комплексу НБК-ОУ, який забезпечує ізоляцію залишків зруйнованого енергоблоку № 4 Чорнобильської АЕС і містить паливовмісні матеріали (далі – ПВМ) та інші радіоактивні речовини. За таких умов військові впливи створюють не лише локальну загрозу, а й ризики транскордонного масштабу.

Військові впливи мають системний і довготривалий загрозовий характер. На практиці це проявляється у повторюваних втратах зовнішнього електропостачання, призупиненні регламентних робіт на комплексі, а також у відкладенні робіт із перетворення об'єкта «Укриття» (далі – ОУ) на екологічно безпечну систему. Окрему небезпеку становить систематичне порушення заборони польотів над промисловим майданчиком ДСП ЧАЕС. Попри нормативні обмеження, над ДСП ЧАЕС неодноразово фіксувалися прольоти БПЛА, що створює пряму загрозу для цілісності захисних бар'єрів і експлуатації комплексу НБК-ОУ.

Критичним підтвердженням реальності таких ризиків є безпрецедентна подія 14 лютого 2025 року, коли внаслідок цілеспрямованої атаки російської федерації відбулося пряме влучання БПЛА в Арку НБК. У результаті було пошкоджено близько 15 м² зовнішньої обшивки, частково пошкоджено внутрішню обшивку, а також зазнало пошкоджень обладнання систем, важливих для безпеки, зокрема елементи системи основних кранів (далі – СОК). Поширення пожежі в результаті влучання БПЛА призвело до вигорання герметизуючої мембрани. Наслідком цього стала розгерметизація кільцевого простору та основного об'єму НБК, що унеможливило дотримання всіх проєктно-технологічних вимог експлуатації. Зазначені пошкодження призвели до порушення умов безпечної експлуатації комплексу НБК-ОУ та зумовили перехід комплексу НБК-ОУ до стану аварійної ситуації.

У цих умовах від органу державного регулювання ядерної та радіаційної безпеки вимагається прийняття регуляторних рішень з урахуванням наявних ризиків та стану НБК-ОУ спрямованих на забезпечення прийнятного рівня його ядерної та радіаційної безпеки. У статті розглядаються два аспекти цієї діяльності – нормативний та експертна оцінка матеріалів, що подаються до ДСП ЧАЕС, до проведення державної експертизи яких залучається організація науково-технічної підтримки регулюючого органу ДНТЦ ЯРБ.

2. Нормативне забезпечення експлуатації комплексу НБК-ОУ

Основним нормативним документом, що визначає мету, критерії, принципи та правила забезпечення ядерної та радіаційної безпеки під час експлуатації комплексу НБК-ОУ, є НП 306.4.244-2024 «Вимоги безпеки комплексу конфайнмента та об'єкта "Укриття"». Водночас окремі положення цього документа потребують аналізу можливості їх дотримання з урахуванням фактичного стану комплексу НБК-ОУ після військових впливів. При цьому йдеться не про перегляд самих вимог, а про оцінку можливості їх виконання в умовах, коли окремі бар'єри, системи, конструкції та умови експлуатації були скомпрометовані внаслідок воєнних дій.

Зокрема, потребують аналізу:

1) вимоги щодо забезпечення неперевищення допустимих рівнів газо-аерозольних викидів – з урахуванням фактичного стану герметичності комплексу НБК-ОУ після виконання термінових заходів;

2) вимоги щодо стійкості споруд НБК I категорії під час впливів зовнішніх екстремальних природних та техногенних подій з імовірністю 10^{-4} /рік і вище, а також під час впливів смерчу з імовірністю 10^{-6} /рік і вище – з урахуванням того, що проєктна стійкість споруд до окремих впливів, зокрема до впливу смерчу, може бути не відновлена; у зв'язку з цим доцільним є розгляд сценаріїв аварій із руйнуванням покрівлі для підтвердження дотримання критеріїв безпеки;

3) вимоги щодо забезпечення неперевищення імовірності 10^{-7} /рік ненавмисного падіння на НБК літального апарата, що може призвести до руйнування захисної споруди НБК та забруднення територій, на яких проживає або на яких заплановане проживання населення. З урахуванням того, що в умовах військових загроз відповідні проєктні передумови порушуються державою-агресором, виникає необхідність у визначенні заходів щодо мінімізації наслідків таких впливів;

4) вимоги щодо стійкості важливих для безпеки систем та обладнання I категорії НБК під час впливів, що виникають внаслідок зовнішніх екстремальних природних та техногенних подій з імовірністю 10^{-4} /рік і вище, а також під час впливів смерчу з імовірністю 10^{-6} /рік і вище, – з визначенням потенційних відмов та, у разі потреби, розробленням компенсуючих заходів на випадок неможливості відновлення повної цілісності покрівлі.

Окремо необхідно враховувати потребу в коригуванні стратегії перетворення об'єкта, зокрема перегляду строків експлуатації НБК, з урахуванням прискорення корозійних процесів внаслідок порушення вологісного режиму, а також графіків демонтажу нестабільних конструкцій ОУ, вилучення ПВМ і досягнення кінцевого стану.

3. Експертні оцінки безпеки експлуатації комплексу НБК-ОУ

Відновлення проєктних характеристик комплексу НБК-ОУ передбачає реалізацію диференційованого, поетапного підходу, який має охоплювати обстеження та аналіз технічного стану пошкоджених конструкцій комплексу НБК-ОУ, виконання термінових заходів щодо закриття отворів для захисту від атмосферних опадів, розроблення та впровадження плану відновлення та/або модифікації комплексу НБК-ОУ, а також внесення відповідних змін до документації, що регламентує безпечну експлуатацію комплексу НБК-ОУ.

Стратегія усунення наслідків влучання БПЛА в Арку НБК поділена на чіткі етапи:

1) Невідкладні тимчасові заходи

Передбачається закриття отворів і зазорів під торцевими стінами та в місцях пошкодження обшивки для відновлення базового контуру. Такі роботи планується виконувати за спеціальними проєктами виконання робіт, які підлягають державній експертизі з ядерної та радіаційної безпеки відповідно до чинного законодавства.

2) Експлуатаційні обмеження

До закриття контуру в основному об'ємі комплексу забороняється виконання планових пожежонебезпечних робіт, а також робіт, що можуть супроводжуватися утворенням радіоактивних аерозолів або пилу.

3) Оновлення документації

Передбачено розроблення оновленої редакції документа, що регламентує безпечну експлуатацію комплексу НБК-ОУ, з урахуванням його фактичного стану та неможливості дотримання окремих первинних проєктних вимог у повному обсязі.

4) Довгострокове відновлення або модифікація

Цей етап передбачає розроблення Плану реалізації заходів із відновлення/модифікації НБК, детальної дорожньої карти, підготовлення звіту з переоцінки безпеки та визначення довгострокових рішень з урахуванням фактичного технічного стану об'єкта і прийнятих інженерно-технічних рішень.

Експертні оцінки документів, виконані у межах відновлення/модифікації комплексу НБК-ОУ, стосуються, зокрема, таких матеріалів.

3.1. Рішення «Щодо експлуатації комплексу нового безпечного конфайнменту та об'єкта «Укриття» в умовах часткових відхилень від проєктно-технологічних вимог ПК-І НБК»

У зв'язку з неможливістю виконання окремих проєктно-технологічних вимог НБК внаслідок його пошкодження цим рішенням визначаються тимчасові зміни режимів експлуатації систем та обладнання комплексу НБК-ОУ.

Експертна оцінка була спрямована на визначення прийнятності запропонованих тимчасових режимів експлуатації з точки зору безпеки.

3.2. Технічне рішення «Щодо виконання невідкладних тимчасових заходів, спрямованих на зменшення негативних наслідків влучання безпілотного літального апарату в конструкції Арки Нового безпечного конфайнмента»

Цим рішенням передбачено:

- розроблення плану виконання робіт та впровадження термінових тимчасових заходів, спрямованих на зменшення негативних наслідків пошкодження конструкцій Арки НБК;
- проведення додаткових досліджень із залученням спеціалізованих організацій на етапах розроблення та впровадження плану виконання робіт;
- розроблення заходів з ремонту пошкоджених основних і вторинних металевих конструкцій Арки в місці пошкодження;
- розроблення заходів з ремонту пошкоджених основних і вторинних несучих конструкцій даху та внутрішньої обшивки гаража СОК;
- розроблення заходів з ремонту зовнішньої обшивки Арки в місці пошкодження;
- розроблення заходів з ремонту пошкоджених мембран герметизації.

Експертна оцінка була спрямована на перевірку достатності запропонованих заходів для зменшення негативних наслідків пошкодження та їх прийнятність з точки зору ядерної і радіаційної безпеки.

3.3. Рішення «Щодо можливості безпечної експлуатації мостового крану вантажопідйомністю 25/10 т та двостулкового люку ITS-ARH-MGA-DR-503 ГТО СОК комплексу НБК-ОУ»

Для виконання термінових заходів з ремонту металевих конструкцій та закриття отвору в Арці НБК у місці пошкодження необхідно використовувати мостовий кран вантажопідйомністю 25/10 т та двостулковий люк гаража СОК. Цим рішенням передбачено:

- перевірку та випробування мостового крану та двостулкового люка відповідно до інструкцій з перевірки і випробування обладнання, важливого для безпеки комплексу НБК-ОУ;
- комплексне технічне обслуговування та ремонт мостового крану та двостулкового люка відповідно до інструкцій з технічного обслуговування та ремонту обладнання, важливого для безпеки комплексу НБК-ОУ;

–повідомлення Держатомрегулювання щодо результатів перевірки, випробування, технічного обслуговування та ремонту мостового крану і двостулкового люка.

Експертна оцінка була спрямована на перевірку можливості безпечного використання зазначеного обладнання.

3.4. Технологічний регламент експлуатації комплексу НБК-ОУ

З урахуванням поточного стану комплексу НБК-ОУ виникла необхідність внесення змін до Технологічного регламенту експлуатації комплексу НБК-ОУ, зокрема щодо:

- режимів роботи СОК;
- режимів роботи системи вентиляції основного об'єму та кільцевого простору НБК;
- режимів роботи інтегрованої системи управління комплексом НБК-ОУ.

Експертна оцінка була спрямована на перевірку, що встановлені режими роботи систем та обладнання забезпечують контрольований і прийнятний рівень безпеки в умовах фактичного технічного стану комплексу.

Висновки

Пряме влучання БПЛА в Арку НБК призвело до порушення нормальних умов експлуатації комплексу НБК-ОУ та переходу об'єкта до стану аварійної ситуації. Пошкодження конструкцій Арки, елементів герметизації та систем, важливих для безпеки, створило умови, за яких дотримання всіх проєктних функцій НБК-ОУ у повному обсязі стало неможливим.

За таких умов забезпечення прийнятного рівня ядерної та радіаційної безпеки потребує реалізації поетапного, диференційованого підходу, що охоплює невідкладні компенсуючі заходи, встановлення необхідних експлуатаційних обмежень, перегляд умов виконання робіт, внесення змін до експлуатаційної документації та подальше відновлення або модифікацію комплексу. Практична реалізація такого підходу має бути спрямована на відновлення бар'єрних функцій, обмеження ризиків додаткового радіаційного впливу, забезпечення стійкості конструкцій і підтримання умов експлуатації.

Попри суттєві поточні виклики, стратегічна довгострокова мета комплексу НБК-ОУ залишається незмінною – це створення умов для перетворення ОУ на екологічно безпечну систему шляхом демонтажу нестабільних конструкцій та вилучення ПВМ.

Перелік посилань:

1. Рішення «Щодо експлуатації комплексу нового безпечного конфайнменту та об'єкта «Укриття» в умовах часткових відхилень від проєктно-технологічних вимог ПК-1 НБК» № 02-25-ЦЕОУ(НБК) від 21.03.2025 р., погоджене у встановленому порядку Держатомрегулюванням.

2. Технічне рішення «Щодо виконання невідкладних тимчасових заходів, спрямованих на зменшення негативних наслідків влучання безпілотного літального апарату в конструкції Арки Нового Безпечного Конфайнменту» № 6200/93-04-ІЩ від 28.05.2025 р., погоджене у встановленому порядку Держатомрегулюванням.

3. Рішення «Щодо можливості безпечної експлуатації мостового крану вантажопідйомністю 25/10т та двостулкового люку ITS-ARH-MGA-DR-503 ГТО СОК комплексу НБК-ОУ» № 04-25-ЦЕОУ(НБК), погоджене у встановленому порядку Держатомрегулюванням.

4. Технологічний регламент експлуатації комплексу «НБК-ОУ». 1Е-С-НБК-ОУ.

5. Звіт з аналізу безпеки комплексу НБК-ОУ, 2021.

СЕКЦІЯ № 1

Атомна енергетика

¹ Магістрант 1 курсу Долинкевич В. М.

¹ Доц., к.т.н. Філатов В. І.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІМОВІРНІСНА ОЦІНКА РИЗИКІВ ІНТЕГРОВАНОЇ СИСТЕМИ ВИРОБНИЦТВА ВОДНЮ НА БАЗІ АЕС

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасна ядерна енергетика стикається з викликами низької маневреності та необхідності інтеграції в енергосистему з великою часткою відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Одним із найбільш перспективних рішень є створення інтегрованих енерготехнологічних комплексів, де надлишкова теплова та електрична енергія АЕС використовується для високотемпературного електролізу (НТЕФ). Це дозволяє не лише стабілізувати роботу енергоблока в базовому режимі, а й виробляти «рожевий» водень з високою доданою вартістю.

Аналіз останніх досліджень. Дослідженнями в галузі ядерно-водневої інтеграції активно займаються Idaho National Laboratory (INL) та Sandia National Laboratories у рамках програми LWRS (Light Water Reactor Sustainability). У працях Vedros K., Christian R. та Smith C. [1, 3] розроблено концептуальні моделі поєднання реакторів PWR та BWR з установками електролізу потужністю 100–1150 МВт. Основними напрямками аналізу є термогидравлічний вплив системи відбору пари (HES) та оцінка ударних навантажень на критичні структури АЕС. В Україні питання створення подібних комплексів перебуває на стадії наукових дискусій.

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка комплексної методології імовірнісної оцінки ризиків для інтегрованої системи «АЕС–НТЕФ», що включає ідентифікацію нових ініціюючих подій, моделювання каскадних відмов та визначення критеріїв стійкості систем безпеки.

Методи дослідження. В основу роботи покладено поєднання детерміністичного та імовірнісного підходів. Для ідентифікації небезпек використано метод FMEA (Failure Mode and Effects Analysis), який дозволяє систематизувати відмови обладнання за їхньою тяжкістю та частотою. Моделювання ризиків реалізовано за допомогою програмного комплексу SAPHIRE 8, де розроблено специфічні дерева подій (Event Trees) та дерева відмов (Fault Trees).

Основна частина. 1. Опис інтегрованої системи та механізмів відбору пари. Для забезпечення роботи НТЕФ розглядається система відбору пари (HES), інтегрована в другий контур АЕС. Найбільш ефективною з точки зору термодинаміки є схема відбору пари з головного парового колектора перед турбіною [4]. Така система включає:

– Дві послідовні ізолюючі засувки (IV-1, IV-2), що імітують логіку роботи головних парових ізолюючих клапанів (MSIV).

– Теплообмінники-випарники (HES-EHX-1, HES-EHX-2), що передають енергію в третій (водневий) контур.

Розрив будь-якого з цих елементів за межами гермооболонки створює ризик неконтрольованого витоку пари, що веде до переохолодження першого контуру та позитивного внеску реактивності.

2. Ідентифікація небезпек та FMEA-аналіз.

У процесі аналізу виявлено понад 10 специфічних факторів ризику (табл. 1). Основним внутрішнім фактором є відмова системи регулювання відбору пари, що може призвести до транзйєнтів потужності. Зовнішні фактори зосереджені навколо детонації водню.

Таблиця 1 – Матриця ідентифікованих небезпек інтегрованої системи (на основі [2])

Джерело небезпеки	Потенційний наслідок	Вплив на АЕС	Статус в ІАБ
Система відбору тепла (HES)	Розрив паропроводу за СК ТГ (Steam Line Break)	Порушення тепловідводу через другий контур	Включено
Установка електролізу (HTEF)	Детонація водневої хмари або струменя водню	Ударна хвиля на ВРП (switchyard); втрата зовнішнього електроживлення (LOOP)	Включено
Теплообмінний вузол	Теча через порушення герметичності	Радіоактивне забруднення технологічного контуру водневої установки	Виключено (Економічний ризик)

3. Моделювання детонаційних ризиків та дистанційний аналіз.

Критичним елементом PSA є оцінка зовнішнього впливу вибуху водню. На відміну від внутрішніх аварій АЕС, детонація на HTEF є імовірнісною подією, частота якої (IE_{det}) залежить від надійності виявлення витоків:

$$IE_{det} = f_{leak} \cdot P_{ign} \cdot P_{fail\_vent}, \quad (1)$$

де f_{leak} – річна частота витоків водню;

P_{ign} – ймовірність запалювання;

P_{fail_vent} – ймовірність відмови аварійної вентиляції;

Для оцінки стійкості використано концепцію «кривих крихкості» (fragility curves), які визначають імовірність руйнування компонентів АЕС залежно від надлишкового тиску ударної хвилі (рис. 1). Аналіз показує, що найбільш вразливими є опори ліній електропередач та трансформатори власних потреб (рис. 2).

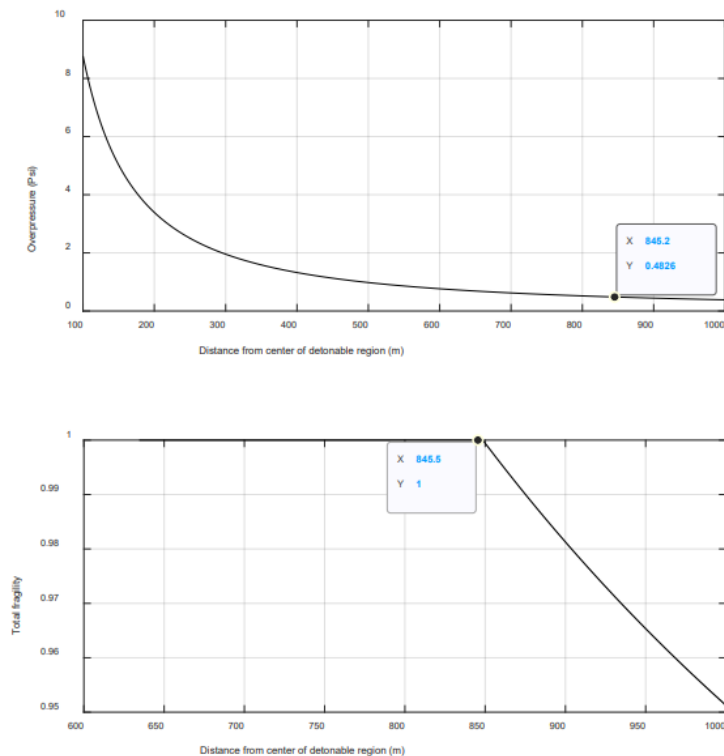


Рисунок 1 – Залежність надлишкового тиску при максимально можливій аварії (вгорі) та загальної вразливості конструкцій ВРП (внизу) від відстані між установкою електролізу та енергоблоком АЕС [4]

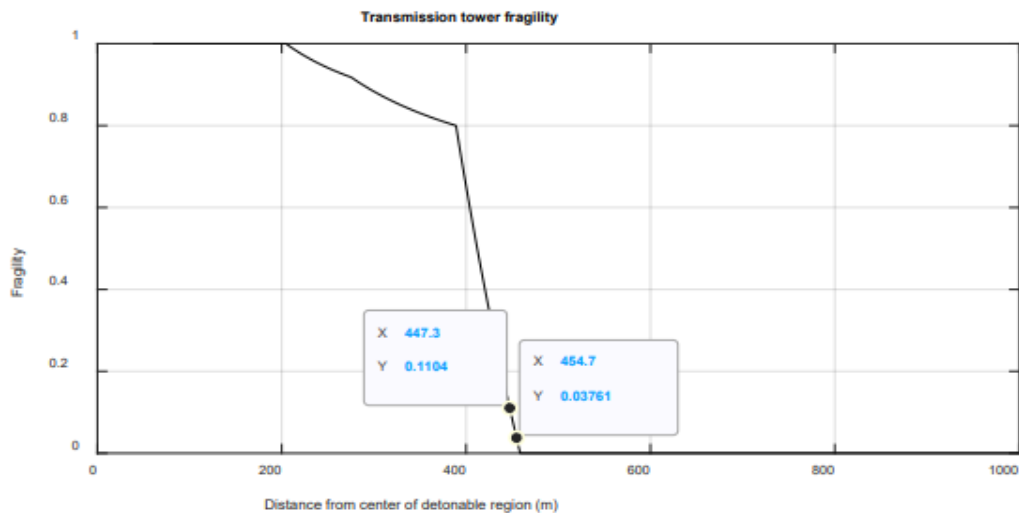


Рисунок 2 – Крива крихкості опори лінії електропередач [4]

4. Регуляторні аспекти та критерії прийнятності.

Згідно з вимогами NRC (RG 1.174) та українськими нормами (НП 306.2.141-2008), будь-яка зміна в конструкції енергоблока є прийнятною, якщо вона не призводить до суттєвого зростання ризику. Для АЕС з реакторами LWR встановлено такі орієнтири:

- Приріст частоти пошкодження активної зони ΔCDF має бути меншим за 10^{-6} на рік;
- Частота великого раннього викиду $\Delta LERF$ – менше 10^{-7} на рік.

Методологія моделювання в SAPHIRE дозволяє перевірити ці умови для різних сценаріїв розміщення НТЕФ (від 100 до 1000 метрів від реакторного відділення).

Висновки. В результаті проведеного методологічного аналізу встановлено, що інтеграція системи виробництва водню на базі АЕС є безпечною з точки зору імовірнісних критеріїв за умови дотримання захисних дистанцій (не менше 500 м для відкритих майданчиків).

1. Застосування FMEA-аналізу дозволило виділити розрив ліній теплової інтеграції як найбільш вагому внутрішню ініціюючу подію.

2. Наукова новизна полягає у розробці інтегрованого дерева подій, яке поєднує технологічні параметри другого контуру АЕС із імовірнісними характеристиками вибухонебезпечності водневого комплексу.

3. Отримані результати можуть бути використані при розробці технічних умов на проектування водневих заводів, колокованих з АЕС України, для забезпечення їхньої стійкості до зовнішніх впливів.

Перелік посилань:

1. Vedros K. G., Christian R., Glover A., & Smith C. L. (2022). Probabilistic risk assessment of a light water reactor coupled with a high-temperature electrolysis hydrogen production plant – Part 2: Hazards assessment and PRA. In Proceedings of the 16th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM 16). Honolulu, HI.
2. Vedros K. G., Christian R., Glover A., & Smith C. L. (2022). Probabilistic risk assessment of a light water reactor coupled with a high-temperature electrolysis hydrogen production plant – Part 1: Hazards analysis. In Proceedings of the 16th Probabilistic Safety Assessment and Management Conference (PSAM 16). Honolulu, HI.
3. Christian R., Otani C. M. Y. H., Vedros K. G., & Glover A. M. (2023). Probabilistic risk assessment of a light water reactor coupled with a high-temperature electrolysis hydrogen production plant (Report No. INL/CON-22-70198-Revision-0). Idaho National Laboratory.
4. Vedros K. G., Christian R., & Otani C. (2022). Flexible plant operation and generation: Probabilistic risk assessment of a light-water reactor coupled with a high-temperature electrolysis hydrogen production plant (Report No. INL/EXT-20-60104, Revision 1). Idaho National Laboratory. U.S. Department of Energy.

ПЕРСПЕКТИВИ ММР В УМОВАХ ПІСЛЯВОЄННОЇ ВІДБУДОВИ УКРАЇНИ

Постановка проблеми та її актуальність. Пошкодження об'єктів генерації та електричних мереж унаслідок воєнних дій в Україні виявили високу вразливість централізованої енергосистеми та необхідність її структурної модернізації.

Внаслідок військових дій енергетична інфраструктура України зазнала значних пошкоджень. За даними міжнародної оцінки UNDP та Світового банку, генеруюча потужність електроенергетики України скоротилася приблизно на 61 %, а доступна потужність електростанцій зменшилася з 36 ГВт до 13,9 ГВт. Частина енергетичних об'єктів, зокрема Запорізька АЕС потужністю близько 6 ГВт, знаходиться на територіях, що тимчасово не контролюються Україною [2, с.4].

В умовах післявоєнної відбудови особливо актуальним є створення стійких, автономних та децентралізованих джерел генерації, здатних забезпечувати безперервне електропостачання критичної інфраструктури. Одним із перспективних напрямів вирішення цієї проблеми є застосування малих модульних реакторів (ММР), що поєднують підвищений рівень безпеки, модульність та можливість роботи в ізольованих режимах.

В огляді сучасного стану розвитку малих модульних реакторів зазначається, що ММР розглядаються як перспективна технологія для підвищення енергетичної безпеки та забезпечення гнучкості енергосистем. Завдяки меншій встановленій потужності, модульній конструкції та можливості поетапного введення енергоблоків, ММР можуть ефективно застосовуватися для відновлення або модернізації енергетичної інфраструктури, зокрема в регіонах з пошкодженою або обмеженою генерацією електроенергії [3].

Аналіз останніх досліджень. У міжнародній науково-технічній практиці питання розвитку малих модульних реакторів систематизовано в аналітичному огляді МАГАТЕ «Advances in Small Modular Reactor Technology Developments» (2020). У звіті представлено понад 70 проєктів ММР різних технологічних напрямів (водоохолоджувані, швидкі нейтронні, високотемпературні газоохолоджувані, реактори на розплавах солей тощо), що перебувають на різних стадіях розробки та ліцензування [1]. Разом із тим, у звіті переважно розглядаються технічні характеристики та глобальні тенденції розвитку ММР, тоді як питання їх системної інтеграції в енергосистеми держав із підвищеними ризиками інфраструктурних пошкоджень потребують подальшого наукового обґрунтування.

Формулювання мети. Метою дослідження є обґрунтування доцільності застосування малих модульних реакторів для підвищення стійкості та децентралізації електроенергетичної системи України в умовах післявоєнної відбудови на основі аналізу сучасного стану їх технологічного розвитку.

Основна частина. Згідно зі звітом МАГАТЕ «Advances in Small Modular Reactor Technology Developments» (2020), сучасні ММР поділяються на кілька основних технологічних напрямів: водоохолоджувані інтегральні реактори (iPWR), високотемпературні газоохолоджувані реактори (HTGR), швидкі реактори (SFR, LFR), а також реактори на розплавах солей (MSR). Найбільш близькими до комерційного впровадження є водоохолоджувані інтегральні ММР, конструкція яких передбачає розміщення основного обладнання (парогенераторів, насосів) всередині корпусу реактора, що зменшує кількість трубопроводів та підвищує рівень безпеки. МАГАТЕ відзначає, що модульність конструкції та заводське виготовлення ключових компонентів дозволяють

скоротити строки будівництва та забезпечити поступове нарощування генеруючих потужностей.

В умовах післявоєнної відбудови України найбільш доцільними виглядають водоохолоджувані інтегральні ММР, оскільки вони базуються на технологіях, близьких до традиційних реакторів типу ВВЕР, що експлуатуються в Україні. Це спрощує адаптацію нормативної бази та підготовку персоналу. Потенційними майданчиками розміщення можуть бути території існуючих атомних електростанцій (як додаткові енергоблоки меншої потужності), а також промислові регіони з високим рівнем споживання електроенергії та тепла:

Дніпропетровська область – центр металургійної та гірничодобувної промисловості;
Запорізький промисловий вузол – висока концентрація енергоємних підприємств;
Криворізький гірничо-металургійний регіон;

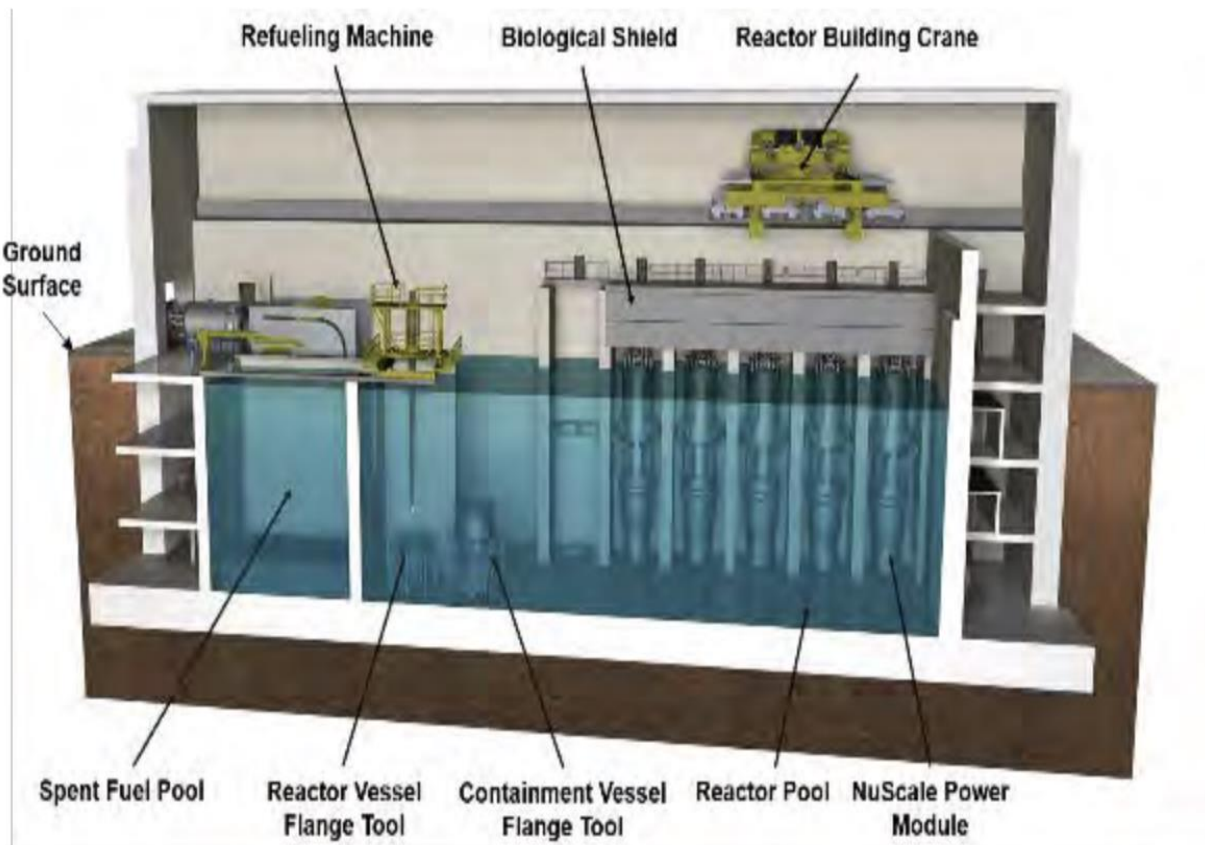
Миколаївський та Одеський регіони – з урахуванням потреб у стабільному енергопостачанні портової інфраструктури;

Відповідно до звіту МАГАТЕ (2020), водоохолоджувані інтегральні ММР (integral Pressurized Water Reactors – iPWR) характеризуються розміщенням основного обладнання першого контуру всередині корпусу реактора. До складу інтегральної установки входять: активна зона реактора, внутрішньокорпусні парогенератори, головні циркуляційні насоси (або природна циркуляція теплоносія), компенсатор тиску та системи пасивного відведення тепла. Така компоновка дозволяє суттєво скоротити кількість трубопроводів великого діаметра та зменшити ризик великих розривів першого контуру.

Принцип роботи водоохолоджуваних ММР аналогічний традиційним реакторам типу ВВЕР, що експлуатуються в Україні: у якості теплоносія і сповільнювача використовується вода під тиском, яка не кипить у першому контурі та передає тепло через парогенератор у другий контур. Саме ця технологічна спадковість робить інтегральні ММР найбільш близькими до існуючих в Україні технологій реакторів типу ВВЕР. Приклад інтегральної компоновки наведено на рис. 1–2.



Рисунок 1 – Компоновка реакторного модуля NuScale (integral PWR) [1]



Cut-away view of NuScale power plant

Рисунок 2 – Схема інтегрального водоохолоджуваного ММР (на прикладі NuScale) [1]

Висновки. Наукова новизна роботи полягає у системному обґрунтуванні доцільності застосування інтегральних водоохолоджуваних ММР як елементу післявоєнної трансформації енергосистеми України.

Технологічна подібність інтегральних ММР до реакторів типу ВВЕР, що експлуатуються в Україні, свідчить про їх потенційну сумісність із наявною інфраструктурою та регуляторною базою. Модульність, зменшення кількості трубопроводів великого діаметра та інтеграція систем безпеки підвищують рівень експлуатаційної надійності.

З огляду на виклики післявоєнної реконструкції енергетики України, водоохолоджувані інтегральні ММР можуть розглядатися як один із можливих інструментів підвищення стійкості та децентралізації електроенергетичної системи.

Перелік посилань:

1. IAEA. Advances in Small Modular Reactor Technology Developments. 2020 Edition. Vienna: International Atomic Energy Agency, 2020.
2. Ukraine Energy Damage Assessment: Executive Summary. United Nations Development Programme (UNDP), World Bank Group. March 2023.
3. Global Situation of Small Modular Reactor Development and Deployment. Jakarta: ERIA, 2021.

Даний температурний потенціал дозволяє використовувати промислові термоелектричні модулі на основі телуриду вісмуту (Bi_2Te_3). Критичним аспектом впровадження напівпровідникових елементів у гермозоні є їхня радіаційна стійкість. Аналіз сучасних досліджень доводить [2], що при робочих температурах вище 250 °С швидкість термічної рекомбінації радіаційних дефектів у кристалічній ґратці перевищує швидкість їх утворення під дією іонізуючого випромінювання (ефект in-situ annealing).

Більше того, вплив випромінювання здатен позитивно впливати на термодинамічну ефективність матеріалу. Дефекти, що виникають, діють як центри розсіювання фононів, знижуючи ґраткову теплопровідність матеріалу. Оцінка термоелектричної добротності матеріалу здійснюється за відомою залежністю:

$$ZT = \frac{\alpha^2 \cdot \sigma}{k} \cdot T, \quad (1)$$

де α – коефіцієнт Зеєбека, В/К; σ – питома електрична провідність, См/м; k – загальна теплопровідність матеріалу, Вт/(м·К); T – абсолютна температура, К.

Зниження теплопровідності матеріалу k внаслідок радіаційних дефектів без суттєвого погіршення електропровідності сумарно підвищує безрозмірну добротність ZT , що безпосередньо впливає на ККД генератора [3]. Так, наведені дослідження показали, що потужність, яка виробляється ТЕГ основі телуриду вісмуту, підвищилась з 120 мВт до 200 мВт напрутязі 20 діб роботи реактору після його запуску.

Окрім системи ТК, яка забезпечує генерацію в режимі базового навантаження, перспективним напрямом для сценаріїв повного знеструмлення (SBO) є встановлення системи термоелектричної рекуперації теплоти на вихлопних колекторах резервних дизель-електростанцій (РДЕС). Температурний потенціал вихлопних газів (350–450°C) дозволяє генерувати пікову електричну потужність для підтримки заряду стартерних батарей та живлення локальної автоматики комірки РДЕС. Головним інженерним викликом у даному сценарії, який виноситься як напрям для подальших досліджень, є розробка віброізоляційного кріплення для захисту крихких керамічних модулів від низькочастотних вібрацій дизельного двигуна.

Висновки. Впровадження термоелектричних рекуператорів на трубопроводах системи продування дозволяє створити повністю автономні вузли енергозабезпечення в гермозоні. Енергії у 5–8 Вт достатньо для живлення сучасних мікроконтролерів та бездротових передавачів (стандарту ZigBee/Wi-Fi). Це виключає необхідність прокладання нових кабельних трас та суттєво підвищує рівень інформаційної безпеки реакторної установки в режимах нормальної експлуатації та при аваріях зі знеструмленням.

Перелік посилань:

1. Технологічні системи реакторного відділення ВВЕР-1000 з РУ В-320. Частина 2. Допоміжні системи : навч. посіб. / Балаковська АЕС. Балаково, 1995. 248 с.
2. Thermoelectric Power Generation in the Core of a Nuclear Reactor / N. Kempf [et al.]. Idaho National Laboratory (INL). 2022. P. 1–15.
3. Ion Beam Irradiation Effect on Thermoelectric Properties of Bi_2Te_3 and Sb_2Te_3 Thin Films / G. Fu [et al.]. *Materials Science & Technology*. 2018. P. 1–25.

¹ Магістрант 2 курсу Ляхор Д. О.

¹ Доц., к.т.н. Коньшин В. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=G8kKS2MAAAAJ&hl>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИКА УНІФІКАЦІЇ КОМПЛЕКСУ ДАНИХ АВТОМАТИЗОВАНОГО РАДІАЦІЙНОГО МОНІТОРИНГУ ДЛЯ ВИКОРИСТАННЯ У СИСТЕМАХ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ

Постановка проблеми та її актуальність. В рамках Конвенції про оперативне сповіщення про ядерну аварію, Україна має зобов'язання з оперативної передачі інформації з надзвичайних ситуацій радіаційного характеру у випадку, якщо її територія зазнала, або може зазнати, фізичного впливу від радіаційної аварії [1].

Компіляція, обмін та обробка даних у випадках надзвичайних ситуацій радіаційного характеру не ускладнюються завдяки адаптації стандартизованого формату IRIX, яка прибирає необхідність конвертувати та транскрибувати інформацію між різними форматами [2].

Моніторинг радіаційного стану навколишнього середовища в Україні проводиться суб'єктами моніторингу за допомогою об'єктових автоматизованих систем контролю радіаційного стану, що ускладнює спільне використання даних. Отриманню узагальненої та достовірної оцінки результатів спостережень перешкоджають також відсутність єдиної методології, належного метрологічного забезпечення, сучасної телекомунікаційної техніки і ресурсів для автоматизації процесів контролю та оперативної передачі інформації до центрів її обробки та налізу в єдиному міжнародному форматі обміну даними [3].

Методика проведення уніфікації даних радіаційного моніторингу дозволяє підвищити точність отриманих даних радіаційного моніторингу, позбавившись впливу факторів, які пов'язані з характеристиками майданчиків розміщення АСКРС та виконанням моделювання джерела викиду за допомогою систем підтримки прийняття рішень. Успішне створення даної методики позитивно вплине на стратегічну мету України – створення інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу, що дозволить у режимі реального часу виявляти радіаційні забруднення та загрози транскордонного перенесення радіоактивних речовин у випадках надзвичайних ситуацій радіаційного характеру [3, 4].

Аналіз останніх досліджень. В рамках журналу Radiation Protection Dosimetry було проведено дослідження впливу різних факторів, що впливають на відмінність показів детекторів, для чого був застосований підхід «ідеального детектора» [5].

В рамках програми European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research були визначені коефіцієнти невизначеностей, що залежать від характеристик місцевості розташування детекторів радіаційного моніторингу, які впливають на точність вимірювань рівня дози [6].

Формулювання мети. Розроблення методології уніфікації даних радіаційного моніторингу з урахуванням невизначеностей, що супроводжують радіаційний моніторинг, та їх використання для уточнення оцінок джерела викиду при спільному використанні з системами підтримки прийняття рішень.

Основна частина. В рамках Порядку створення та функціонування Інтегрованої системи радіаційного моніторингу [6], розроблена методологія підвищення точності результатів моделювання за допомогою уточнення характеристик джерела викиду та метеорології даних, отриманих в результаті моделювання атмосферної дисперсії, шляхом порівняння з даними, отриманими в результаті реального радіаційного моніторингу, яка

повинна бути повністю автоматизована для ефективного подальшого використання. Вона має назву «уніфікація даних автоматизованого радіаційного моніторингу».

Уніфікація даних радіаційного моніторингу здійснюється через ряд структурованих етапів. На першому етапі дані моніторингу збираються з майданчиків детекторів та АСКРС, в результаті чого отримуються первинні дані радіаційного моніторингу. Після цього в кризовому центрі буде відбуватися їх обробка, яка передбачає компенсацію неточностей, що виникають від характеристик майданчику розміщення детектора, наближуючи їх до потенційних показників «ідеального» детектора, якби він стояв на відповідних координатах реального детектора.

На другому етапі приймаються первинні дані характеристик джерела викиду і метеорології. Використовуючи обрану систему підтримки прийняття рішень JRodos, виконується моделювання атмосферної дисперсії частинок для попередньо визначеного інтервалу. Результат, за допомогою точкової інтерполяції, зводиться до координат розміщення майданчиків детекторів.

На третьому етапі виконується співставлення даних, отриманих на першому та другому етапах. Якщо ці дані задовольняють встановленому критерію оцінки - уніфікація даних вважається завершеною, і вони можуть бути використані в подальших завданнях. Якщо ж отримані дані не задовольняють обраному критерію оцінки, наступний етап передбачає реконфігурацію параметрів джерела викиду та моделі атмосферної дисперсії. Після чого, повторно виконується другий та третій етап, ітеруючи метеорологію та джерело викиду до тих пір, поки отриманий результат не задовольнить обраному критерію оцінки.

Висновки. Запропонований підхід передбачає три етапи уніфікації: збір та обробку даних моніторингу, розрахунки з використанням СППР та співставлення отриманих даних.

Уніфікація даних радіаційного моніторингу дозволяє виконати переоцінку характеристик джерела викиду та результатів моделювання атмосферної дисперсії в СППР, значно покращуючи якість отриманих результатів.

Запропонована методологія дозволяє звести дані радіаційного моніторингу під міжнародний формат в автоматизованому режимі, що підвищить ефективність роботи кризових центрів України у випадках надзвичайних ситуацій радіологічного характеру.

Перелік посилань:

1. Convention on Early Notification of a Nuclear Accident : Information Circular dated 26.09.1986 №INFCIRC/335. Vienna : IAEA, 1986.

2. International Radiological Information Exchange (IRIX) Format. Reference Description IRIX Version 1.0 : EPR-IEComm (2019) Attachment 3. Vienna : IAEA, 2020. URL: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/EPR_IRIX_web.pdf (Дата звернення: 25.02.2026).

3. Про схвалення Стратегії інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу на період до 2024 року : розпорядження Кабінету Міністрів України від 29 квітня 2022 р. № 323-р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/323-2022-%D1%80#Text> (Дата звернення: 26.02.2026).

4. Деякі питання створення та функціонування Інтегрованої автоматизованої системи радіаційного моніторингу : розпорядження Кабінету Міністрів України від 11 лютого 2026 р. №175. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/175-2026-%D0%BF#Text> (Дата звернення: 23.02.2026).

5. Stöhlker U., Bleher M., Doll H., Dombrowski H., Harms W., Hellmann I., ... Weiler F. (2018). THE GERMAN DOSE RATE MONITORING NETWORK AND IMPLEMENTED DATA HARMONIZATION TECHNIQUES. RADIATION PROTECTION DOSIMETRY. DOI:doi:10.1093/rpd/ncy154.

6. Bleher M., Gering F., Meisenberg K. and others. D9.7 – Report on uncertainty reduction in exposure assessment based on environmental monitoring data, including concept for identifying critically exposed groups. European Joint Programme for the Integration of Radiation Protection Research. EJP-Concert. URL: https://www.meenas.eu/wp-content/uploads/2023/05/D9.7_Report-on-uncertainty-reduction-in-exposure-assessment-based-on-enviro.pdf. (Дата звернення: 27.02.2026).

¹ Магістрант 2 курсу Топал А. О.

¹ Ст.н.спів., д.т.н. Хайрмасов С. М.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=FAj2nm0AAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ВПЛИВУ НА БЕЗПЕКУ ЕНЕРГОБЛОКУ №2 ХАЕС ВИХІДНИХ ПОДІЙ НА МАЙДАНЧИКУ ВОДНЕВОЇ СТАНЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасний розвиток світової енергетики спрямований на зменшення викидів вуглецю та впровадження водневих технологій як ключового елемента «Європейського зеленого курсу». Інтеграція водневих когенераційних установок (водневих станцій – ВС) у структуру атомних електричних станцій (АЕС) розглядається як перспективний шлях підвищення ефективності атомної енергетики. Проте, з огляду на специфічні фізико-хімічні властивості водню, а саме високу вибухонебезпечність та здатність до швидкого розповсюдження, розміщення таких об'єктів у межах санітарно-захисної зони (СЗЗ) АЕС створює нові виклики для безпеки. Актуальність дослідження зумовлена необхідністю кількісної оцінки ризиків та визначення потенційного впливу аварій на ВС на цілісність критичного обладнання енергоблоків АЕС.

Виділення невирішеного раніше завдання. Попри наявність загальних методик оцінки ризиків для промислових об'єктів, питання інтеграції специфічних вихідних подій (ВП) на водневій станції безпосередньо в імовірнісній моделі аналізу безпеки конкретних енергоблоків, зокрема №2 ХАЕС, залишалось недостатньо висвітленим. Потребує деталізації механізм моделювання зовнішніх техногенних впливів від ВС як ініціюючих подій, що можуть призвести до пошкодження активної зони.

Аналіз останніх досліджень. Одною з основних робіт можна виділити статтю автора Eduard Diaz-Pescador [1] та групи науковців із Технічного університету Дрездена, що присвячена оцінці впливу інтеграції типової уставки ВС з протон обмінними (РЕМ) електролізерами потужністю 40 МВт на майданчику Рівненської АЕС. Авторами статті визначені параметри надлишкового тиску при вибухах та частоти ініціюючих подій, що дозволяє порівняти ризик для різних майданчиків АЕС.

В українському науковому просторі важливий внесок у розробку сценаріїв взаємодії ХАЕС та ВС зроблено у межах проектних робіт Олександра Мазурка [2]. Проте, попри наявність досліджень для РАЕС, питання адаптації цих розрахунків для енергоблоку №2 Хмельницької АЕС з урахуванням специфіки його імовірнісної моделі безпеки потребує окремого детального аналізу, що і зумовлює спрямованість даної роботи.

Формулювання мети. Метою роботи є кількісна оцінка впливу потенційного вибуху на водневій станції на показники безпеки енергоблоку №2 Хмельницької АЕС, а саме на частоту пошкодження активної зони (ЧПАЗ) та частоту граничного аварійного викиду (ЧГАВ).

Основна частина. В цій роботі було застосовано багаторівневий методологічний підхід. На першому етапі проведено системний аналіз компонентів водневої станції. Методика ідентифікації небезпек HAZID [3] була модифікована шляхом використання сценаріїв, що призводять до виникнення зовнішніх факторів впливу на енергоблок. В результаті було виділено дві критичні зони: контейнерний блок електролізера та буферних резервуар зберігання водню.

Ключовою методичною особливістю є пряме впровадження ідентифікованого ініціатора «Вибух на ВС» у діючу імовірнісну модель безпеки енергоблоку №2 ХАЕС. На відміну від загальних оцінок, цей метод передбачає перерахунок частоти вихідної події з

урахуванням часових часток знаходження блоку в різних експлуатаційних станах (ЕС), що забезпечує високу точність прогнозування.

В ході проведеного дослідження було отримано комплекс кількісних характеристик, що описують вплив експлуатації водневої станції на показники безпеки енергоблоку №2 ХАЕС. Встановлено, що найбільш критичною вихідною подією в межах майданчика ВС є фізичний розрив буферного резервуару для зберігання водню, частота реалізації якого становить 2.25×10^{-7} 1/рік. Оскільки зазначений показник перевищує встановлений нормативний критерій відсіву для зовнішніх техногенних впливів (1.00×10^{-7} 1/рік), ця подія була детально інтегрована в імовірнісну модель як ініціатор аварії.

Розрахунки фізичних ефектів, зокрема надлишковий тиск ударної хвилі, хімічний та фізичний вибухи, стійкість залізобетонних конструкцій та металевих елементів енергоблоку, підтвердили, що при реалізації сценарію максимального вибуху на ВС, з урахуванням фактичної відстані до критичних споруд енергоблоку, виникає надлишковий тиск, здатний потенційно вплинути на зовнішні елементи систем безпеки. Зокрема, у моделі було враховано ймовірність пошкодження імпульсних запірних пристроїв компенсатора тиску (ІЗП КТ) та оцінено ризики для надійності роботи дизель-генераторних установок. Попри це, детальний аналіз мінімальних перетинів відмов (МПВ) виявив, що подія «вибух на ВС» фігурує в аварійних ланцюжках лише на екстремально низьких рівнях імовірності – порядку 10^{-11} .

Інтегральна оцінка ризику продемонструвала високу проектну стійкість енергоблоку до розглянутого типу впливу. Кількісні показники частоти пошкодження активної зони та частоти граничного аварійного викиду після врахування подій на ВС залишилися незмінними – на рівні 1.31×10^{-6} 1/рік та 3.08×10^{-7} 1/рік. У порівнянні з дослідженням, що було проведено для Рівненської АЕС, де розглядалося розміщення ВС потужністю 40 МВт безпосередньо в межах захищеної зони для мінімізації довжини ліній електропередач та оптимізації інфраструктури, було виявлено вищі потенційні ризики для будівель, що розташовані у безпосередній близькості. Умови Хмельницької АЕС за рахунок специфіки розташування об'єктів (ВС знаходиться поза межами основної зони, між нею та енергоблоком №2 існують природні та технічні бар'єри, такі як відкритий простір, допоміжні будівлі) та існуючих бар'єрів (гермооболонка, захисні споруди систем безпеки) забезпечують рівень захищеності, за якого внесок водневих технологій у сумарний ризик є нехтовно малим. Таким чином, отримані дані свідчать про безпечність поточної конфігурації інтеграції ВС у структуру ХАЕС.

Висновки. Вперше для умов ХАЕС проведено інтеграцію подій на водневій станції безпосередньо в актуалізовану (станом на 2022 р.) імовірнісну модель безпеки енергоблоку №2. Визначено, що фізичний вибух буферного резервуару є домінуючим фактором ризику серед подій на ВС. Попередній аналіз свідчить про незначний вплив експлуатації типової водневої установки на загальний рівень безпеки енергоблоку, оскільки внесок ВС у частоту пошкодження активної зони є мінімальним порівняно з іншими ініціюючими факторами. Отримані результати можуть бути використані при проектуванні розміщення водневих когенераційних установок на майданчиках АЕС України.

Перелік посилань:

1. Diaz-Pescador E., Viebach M., Gamaleja F., Lippmann W., Hurtado A., 2025. Impact assessment of the integration of a generic PEM electrolyser facility into Rivne nuclear station. <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113767>.
2. Mazurok O., Calle-Martí J., Ruiz-Martín J.-A., Herrero-Moriana, C., 2024. Techno-economic Cost Models for NPHyCo Business Plan. NPHyCO Deliverable D3.1 Rev. A.
3. European Maritime Safety Agency (2024), Hazard identification of generic hydrogen fuel systems, EMSA, Lisbon.

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ФЕНОМЕНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ, ЩО СУПРОВОДЖУЮТЬ РОЗВИТОК АВАРІЙ НА РЕАКТОРНІЙ УСТАНОВЦІ

Постановка проблеми та її актуальність. Одним із перспективних напрямів розвитку ядерної енергетики є впровадження малих модульних реакторів (ММР), що вирізняються високим рівнем безпеки, компактністю та економічною доцільністю. Особливої уваги заслуговують пасивні системи безпеки, які застосовуються в ММР покоління III/III+ і функціонують без зовнішнього енергозабезпечення, що є ключовим чинником для забезпечення надійного функціонування реакторів в умовах аварій, зокрема у випадку втрати теплоносія (LOCA).

Феноменологія процесів у ММР дещо відрізняється від процесів у реакторних установках великої потужності через їхні принципові конструктивні відмінності. Відповідно, феномени, які не є характерними для традиційних повномасштабних реакторів, потребують детального дослідження для ММР.

До одного з таких феноменів відноситься температурна стратифікація охолоджуючої води в охолоджуючому басейні (див. п. 4.2.6 [1]), яка є характерною для ММР з контайментом зануреним (повністю або частково) у басейн з охолоджуючою водою (наприклад, NuScale Power Module, LDR-50).

Аналіз останніх досліджень. Для цілей виконання аналізів безпеки в основному застосовуються одномірні розрахункові коди (RELAP5 [6], MELCOR [5], ATHLET [7] та ін.), які є кодами усереднених параметрів. Феноменологічне моделювання ММР з пасивними системами безпеки із природньою циркуляцією може мати значні невизначеності у прогнозуванні теплової стратифікації у великих басейнах.

Необхідність точного моделювання та більш детального опису нових концепцій охолодження зумовлює використання (принаймні для локальних детальних аналізів) тривимірних і нестационарних кодів обчислювальної гідродинаміки (CFD).

У межах огляду наукових праць розглянуто результати експериментального визначення зміни температури теплоносія у ключових точках басейну, в який занурений у зменшеному масштабі контаймент ММР з електронагрівачами [2]. Використання цих експериментальних даних є необхідною умовою для валідації розрахункової моделі в контексті дослідження феномену температурної стратифікації.

Формулювання мети. Метою даної роботи є валідація розрахункової моделі температурної стратифікації на основі експериментальних даних, отриманих на зменшеному у масштабі стенді інтегрального ММР, а також визначення температурних градієнтів теплоносія за допомогою валідованої моделі в умовах важкої аварії з втратою цілісності корпусу реактора. Реалізація поставленої мети дозволить подолати можливі невизначеності існуючих одномірних кодів шляхом застосування CFD-моделювання для більш точного відображення даного феномену під час важких аварій.

Основна частина. У цій роботі розглядається узагальнений проєкт інтегрального ММР з водою під тиском. У якості теплоносія використовується легка вода. Реакторна установка має теплову потужність 160 МВт, і реактор повністю занурений у заповнений водою басейн. Ця конструкція є спрощеною у порівнянні з класичними легководними реакторами під тиском і передбачає реалізацію тепловідведення за рахунок природної

циркуляції теплоносія у всіх режимах нормальної експлуатації (НЕ), порушеннях нормальної експлуатації (ПНЕ) та аварійних [3].

Одним із малодосліджених питань при виконанні аналізу безпеки таких реакторів є феномен температурної стратифікації води у басейні реактора.

У межах даної роботи проводиться чисельне дослідження температурної стратифікації з використанням CFD-коду ANSYS CFX для моделювання конвективного теплообміну в умовах аварії.

Для цілей валідації розрахункової моделі були використані результати експериментальної установки [2], отримані в межах проекту ELSMOR.

Експериментальна установка відтворює модель інтегрального ММР у масштабі 1/20. Тепло генерується внутрішнім електричним нагрівачем, передається стінкам сталевому контейнеру, а далі відводиться у воду басейну. Нагріта вода підіймається вгору вздовж зовнішніх стінок, а розташовані в басейні термопари фіксують динаміку температур. Для дослідження температурної стратифікації теплоносія обрано шість контрольних точок, розташування яких наведено на рис. 1,а. Проведено серію тестів за різних умов (див. табл. 1) із безперервним збором даних [2]. Дані вимірювань у цих точках використано для порівняння з профілями, отриманими у CFD-моделі (див. рис. 1,б).

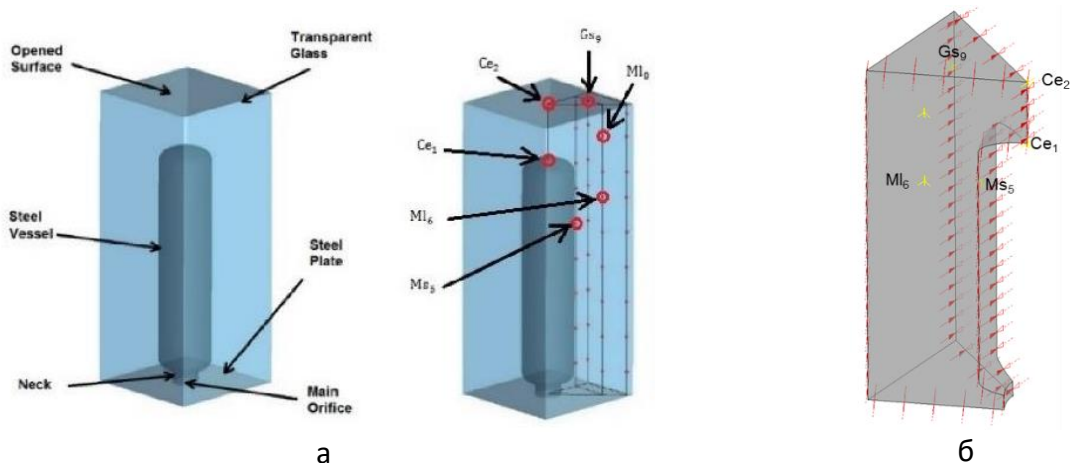


Рисунок 1 – Розташування точок вимірювання температури:
а – експериментальна установка; б – розрахункова модель

Для цілей валідації розрахункової моделі розглядається два варіанти (табл. 1): з мінімальним та максимальним підведеним тепловим потоком. Також, з метою оптимізації розрахункового часу розглядається лише 1/8 частина експериментальної установки із заданням періодичних умов на границях моделі. У розрахунковій моделі, аналогічно до експериментальної установки, тепловий потік прикладено до внутрішньої поверхні, а бічні стінки та днище басейну вважаються адіабатними. Теплообмін всередині рідини забезпечується за рахунок конвективного перемішування та теплопровідності. Радіаційний теплообмін не враховується через його незначну частку.

У моделі обрано турбулентний режим, оскільки оцінене число Релея перевищує 10^9 , що відповідає турбулентному потоку. Для проведення варіантних розрахунків обрано дві моделі турбулентності k-ε, яка добре зарекомендувала себе для подібних задач [8], хоча має обмеження у приграничному шарі, та SST [4].

Обчислення виконуються з адаптивним часовим кроком, що забезпечує ефективну обробку як стабільних, так і нестационарних режимів теплообміну.

У моделі теплофізичні властивості води вважаються змінними. Зміну густини з температурою є важливою величиною, оскільки саме ця залежність забезпечує виникнення природної конвекції.

Таблиця 1 – Початкові умови

№ режиму	Потужність, кВт	Тепловий потік, Вт/м ²	Температура води, °С	Температура навколишнього середовища, °С	Вологість повітря, %	Тепловий потік, що відводиться, Вт/м ²
1	1	1597,19	25	25	64	183,8
2	4	6388,76	29,5	25	64	402,5

Отримані у валідаційному розрахунку значення зміни температур мають задовільну збіжність з експериментальними даними.

Висновки. Отримані результати валідаційного розрахунку із використанням коду ANSYS CFX підтверджують застосовність зазначеного коду для цілей моделювання температурної стратифікації.

Результати валідації розрахункової моделі (в частині прийнятих налаштувань) будуть використані для моделювання поведінки теплоносія у басейні реактора в умовах важкої аварії із втратою герметичності корпусу реактора.

Перелік посилань:

1. Natural circulation in water cooled nuclear power plants [Електронний ресурс] : phenomena, models, and methodology for system reliability assessments : IAEA-TECDOC-1474 / International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2005. 648 p. Режим доступу: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE_1474_web.pdf.
2. The Effect of Using a Virtual Reality-Based Driving Simulator to Explore the Driving Confidence and Driving Performance of Learner Drivers [Електронний ресурс] / W. Y. Wu et al. // Sustainability. 2018. Vol. 10, iss. 7. Art. 2332. URL: <https://www.mdpi.com/2071-1050/10/7/2332>. DOI: 10.3390/su10072332.
3. Natural Circulation Phenomena and Modelling for Advanced Water Cooled Reactors [Електронний ресурс]: IAEA-TECDOC-1677 / International Atomic Energy Agency. Vienna: IAEA, 2012. 436 p. Режим доступу: https://www-pub.iaea.org/MTCD/Publications/PDF/TE-1677_web.pdf.
4. Menter F. R. Best Practice: RANS Turbulence Modeling in Ansys CFD [Електронний ресурс] / F. R. Menter, R. Lechner, A. Matyushenko. [б. м.]: Ansys, Inc., 2021. Режим доступу: <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2022/march/quick-request/Best%20Practice%20RANS%20Turbulence%20Modeling%20in%20Ansys%20CFD.pdf>.
5. Malicki M., Lind T. MELCOR 2.2 iPWR LOCA type accident analysis, PART II: BDBA. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 430. P. 113667. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.113667>.
6. Zingales V., D'Auria F., Hassan Y. A. RELAP5-3D simulation of natural circulation start-up and station blackout benchmark for a NuScale-like iPWR. *Progress in Nuclear Energy*. 2026. Vol. 194. P. 106265. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pnucene.2026.106265>.
7. NuScale-like SMR Model Development and Applied Safety Analyses with the Code Chain Serpent-DYN3D-ATHLET / E. Diaz-Pescador et al. *Nuclear Engineering and Design*. 2024. Vol. 418. P. 112909. URL: <https://doi.org/10.1016/j.nucengdes.2024.112909>.
8. Yilmaz T., Fraser S. M. Turbulent natural convection in a vertical parallel-plate channel with asymmetric heating. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2007. Vol. 50, no. 13-14. P. 2612–2623. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2006.11.027>.

¹ Аспірант 3 курсу Печериця І. О.

¹ Доц., к.т.н. Клевцов С. В.

https://scholar.google.com.ua/citations?user=NAul3_MAAAAJ&hl=ru

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

УКРАЇНОЦЕНТРИЧНА МЕТОДИКА ПІДВИЩЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГОБЛОКУ ВВЕР-1000 ДО ЗБУРЕНЬ ЕНЕРГОСИСТЕМИ

Постановка проблеми та її актуальність. Події 2022–2023 років в Об'єднаній енергосистемі (ОЕС) України супроводжувалися системними збуреннями, що характеризувалися глибокими надирями частоти та напруги, повторними втратами зовнішнього електропостачання та ризиком переходу до сценаріїв повного знеструмлення. У зазначених умовах стандартні алгоритми автоматики енергоблоків ВВЕР-1000, розраховані на класичні проєктні режими, виявили обмеження щодо забезпечення мінімізації динамічних перевантажень та оптимізації часу введення резервного живлення.

Особливу роль відіграє не лише глибина надирів параметрів, але й динаміка перехідних процесів, послідовність пуску дизель-генераторів (ДГ), характер прийняття навантаження та логіка повторного підключення до мережі. Вказані фактори потребують комплексної оцінки та системного підходу до управління режимами.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика підвищення стійкості енергоблоків АЕС традиційно розглядається в контексті аналізу сценаріїв втрати зовнішнього електропостачання / повного знеструмлення та оптимізації уставок автоматики [1,3]. Після аварії на АЕС «Фукусіма-Даїчі» значна увага приділялася питанням резервування джерел живлення, мобільним ДГУ та процедурним заходам з управління важкими аваріями[4].

Разом з тим, більшість досліджень зосереджені на окремих параметрах (частота, напруга, час пуску ДГ) без формування інтегрального критерію оцінки стійкості та без урахування специфіки багаторазових системних збурень енергосистеми, характерних для умов України 2022–2023 років.

Формулювання мети. Розроблення україноцентричної методики підвищення стійкості енергоблоку ВВЕР-1000 до збурень в ОЕС на основі імітаційно-аналітичного дослідження та інтегральної оцінки перехідних процесів.

Основна частина. Застосовано комплексний імітаційно-аналітичний метод дослідження, що включає:

- аналіз експлуатаційних подій 2022–2023 років [2];
- моделювання сценаріїв втрати зовнішнього електропостачання / повного знеструмлення на повномасштабному тренажері ВВЕР-1000;
- порівняльний експеримент «до/після» впровадження алгоритмів;
- статистичну перевірку результатів.

Запропонована методика передбачає перехід від реактивної порогової логіки до інтегрально-керованого управління перехідними процесами та включає чотири блоки:

А. Превентивна логіка відокремлення енергоблоку.

Рішення про відокремлення приймається на основі сукупності параметрів режиму, що дозволяє зменшити глибину надирів та стабілізувати динаміку процесу.

В. Оптимізація пуску ДГ.

Реалізовано поступовий старт (staggered-start), вузькі вікна синхронізації (Synch-Check) та виключення «перегонів» автоматики. Це дозволило скоротити середній час введення ДГ до 88,6 с ($\Delta \approx -45,5$ с).

С. Кероване прийняття навантаження.

Застосовано ступінчасте/плавне (ramp/step-load) підключення навантаження з контролем надирів частоти та напруги.

Д. Витримка короткочасних провалів напруги (ride-through) та вузькі вікна повернення.

Впроваджено логіку витримки короткочасних провалів напруги та обмежені коридори повторного підключення для уникнення повторних відключень.

Для кількісної оцінки ефективності запропоновано інтегральний нормований показник стійкості S , що агрегує:

- збереження функцій безпеки (%FS),
- ймовірність небажаного відключення (NUT),
- мінімальний запас стану (SOCmin),
- надир частоти та напруги (F_{nadir} , U_{min}).

Нормування показників здійснюється відносно допустимих меж, що дозволяє об'єднати параметри різної фізичної природи в єдиному критерії.

Інтегральний показник формується як нормована зважена сума часткових критеріїв:

$$S = w_1 \cdot FS_n + w_2 \cdot (1 - NUT_n) + w_3 \cdot SOC_{min,n} + w_4 \cdot F_{nadir,n} + w_5 \cdot U_{min,n} \quad (1)$$

де w_i – вагові коефіцієнти ($\sum w_i = 1$); FS_n – нормований показник збереження функцій безпеки; NUT_n – нормована частота небажаного відключення; $SOC_{min,n}$ – нормований мінімальний запас; $F_{nadir,n}$, $U_{min,n}$ – нормовані надир частоти та напруги.

За результатами 12 парних прогонів встановлено:

- зниження NUT до 0;
- підвищення %FS до 99,68 %;
- зростання SOCmin до 84,7 %.

Наукова новизна

Наукова новизна полягає у формалізації інтегрального підходу до оцінки стійкості енергоблоку при збуреннях в ОЕС, розробленні структури алгоритмів А–Д (А. Превентивна логіка відокремлення енергоблоку, В. Оптимізація пуску ДГ, С. Кероване прийняття навантаження, Д. Витримка короткочасних провалів напруги) та вперше виконаному їх статистичному порівнянні в умовах багаторазових системних впливів ОЕС України.

Висновки. Розроблена україноцентрична методика дозволяє підвищити стійкість енергоблоку ВВЕР-1000 до збурень в ОЕС шляхом комплексної оптимізації алгоритмів пуску, навантаження та логіки повернення на основі інтегральної оцінки режиму.

Запропонований підхід може бути адаптований для інших типів енергоблоків та умов функціонування енергосистеми.

Методика може бути використана як інструмент експертної оцінки та аналітичної підтримки при аналізі аварій в ОЕС.

Перелік посилань:

1. Комариця В., Молчанов О., Білан С., Ізбенко В., Грудзинський В. Проблеми забезпечення стійкості енергоблоків АЕС у складі ОЕС України в умовах зовнішніх впливів // Ядерна та радіаційна безпека. – 2022. – № 3. – С. 45–52.
2. Звіти ДП «НАЕК «Енергоатом» щодо експлуатації енергоблоків АЕС під час ракетних атак 2022–2023 рр. – Київ, 2023.
3. U.S. Nuclear Regulatory Commission. Loss of Offsite Power Operating Experience. – NRC Report, Washington, 2019.
4. International Atomic Energy Agency. Design of Electrical Power Systems for Nuclear Power Plants. Safety Standards Series No. SSG-34. – Vienna: IAEA, 2016. – 145 p.

¹ Аспірант 1 курсу Шахов Є. О.¹ Доц., к.т.н. Клевцов С. В.https://scholar.google.com.ua/citations?user=NAul3_MAAAAJ&hl=ru¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОГЛЯД СУЧАСНОГО СТАНУ МЕТОДОЛОГІЇ АНАЛІЗУ НАДІЙНОСТІ ПЕРСОНАЛУ ПРИ БАГАТОБЛОКОВИХ АВАРІЯХ

Постановка проблеми та її актуальність. На даний час методологія розробки багатоблокового ІАБ активно розвивається. Одним із найкритичніших аспектів у цьому контексті є надійність дій персоналу, від якої залежить ефективність реалізації процедур ліквідації аварій, аварійного реагування та керівництв із управління важкими аваріями. Досвід аварії на АЕС «Фукусіма» наочно продемонстрував, що в умовах одночасного розвитку подій на кількох енергоблоках людські ресурси можуть бути перевантажені масштабом аварії. Це породжує питання щодо адекватності наявних підходів до аналізу надійності персоналу.

Аналіз останніх досліджень. Відповідно до рекомендацій International Atomic Energy Agency (IAEA), оцінка безпеки багатоблокового майданчика має здійснюватися інтегрально. У Розділі II документа IAEA Safety Standards Series No. 96 [1] зазначено, що взаємозалежності між енергоблоками, спільні системи, спільні структури та організаційні фактори повинні враховуватися в межах єдиної моделі оцінки ризику.

Як приклад у зазначеному документі наведено результати ІАБ рівня 1 для двох 4-контурних реакторів типу Westinghouse PWR зі спільними структурами та системами (див. табл. 1).

Таблиця 1 – Значення частоти пошкодження активної зони (ЧПАЗ) за результатами багатоблокового імовірнісного аналізу безпеки (ІАБ) АЕС [1]

Назва аналізу	Назва показника	Значимість, 1/рік
ІАБ енергоблока №1	ЧПАЗ одного енергоблока	2.3E-04
Інтегрований ІАБ енергоблоків №1,2	ЧПАЗ одного енергоблока	4.0E-04
	ЧПАЗ, багатоблокова	3.2E-05
	ЧПАЗ майданчика	4.3E-04

Цей приклад демонструє, що ризик на рівні майданчика не є простою арифметичною сумою ризиків окремих енергоблоків. Міжблокові залежності можуть як збільшувати, так і зменшувати інтегральний показник ризику залежно від характеру спільних систем та організації реагування.

Подальший розвиток концепції багатоблокового ІАБ відображено також у документах OECD Nuclear Energy Agency (OECD/NEA) [2], де наголошується на необхідності врахування:

- спільних ініціюючих подій;
- спільних систем безпеки;
- спільних людських ресурсів;
- інтегральних показників ризику для майданчика.

Аналогічні підходи підтримуються U.S. Nuclear Regulatory Commission (US NRC) у межах постфукусімських програм перегляду ризик-інформованих підходів.

Формулювання мети. Вдосконалення методики АНП з урахуванням обмежень при багатоблокових аваріях на рівні майданчика.

Основна частина. Аналіз надійності персоналу (АНП) є невід’ємною складовою ІАБ та спрямований на визначення ймовірності помилок персоналу, які можуть впливати на реалізацію функцій безпеки.

Класичні методи АНП, зокрема THERP (Swain & Guttman, NUREG/CR-1278), ASEP (NUREG/CR-4772), SPAR-H (NUREG/CR-6883), HEART (Human Reliability Assessment Methods (RR679), р. 48-52), CREAM (Hollnagel), були розроблені для одноблокового ІАБ та передбачають відносну ізолюваність енергоблоку.

У багатоблоковому контексті виникають додаткові ускладнюючі фактори:

- одночасність розвитку аварій на кількох блоках.
- обмеженість людських ресурсів.
- організаційні взаємодії між кількома центрами управління.
- конкуренція за спільні системи та мобільне обладнання.
- міжблоковий радіаційний вплив.

Таким чином, класичні АНП-моделі не охоплюють повний спектр факторів, характерних для багатоблокових аварій.

Дослідження [2-3] показали, що в умовах багатоблокової аварії доступність персоналу та аналіз залежностей дій персоналу стає ключовим параметром моделі АНП.

Особливо критичними є:

- кількість персоналу, доступного для розгортання мобільного обладнання;
- наявність осіб, які приймають рішення;
- час мобілізації аварійних бригад.

Висновки. Таким чином, аналіз міжнародних нормативних документів та наукових досліджень свідчить про таке:

Міжнародні організації (IAEA, OECD/NEA, US NRC) визнають необхідність інтегральної оцінки ризику багатоблокових майданчиків.

1. Багатоблоковий ІАБ активно розвивається в частині аналізу залежностей дій персоналу різних енергоблоків в умовах одночасних аварій.

2. Питання багатоблокового АНП залишається недостатньо формалізованим.

3. Відсутня інтегрована методика, що одночасно враховує:

- залежності дій персоналу різних енергоблоків в умовах одночасних аварій;
- достатність ресурсів, що використовує персонал в умовах багатоблокових аварійних сценаріїв;
- моделюванні зростання когнітивного навантаження та стресових факторів;
- включенні впливу радіаційної обстановки одного блоку на можливість виконання дій на іншому блоці;
- запровадженні механізму коригування ймовірності помилок персоналу з урахуванням багатоблокового контексту.

Перелік посилань:

1. International Atomic Energy Agency. Development and Application of Level 1 Probabilistic Safety Assessment for Nuclear Power Plants. IAEA Safety Reports Series No. 96. Vienna: IAEA.

2. OECD Nuclear Energy Agency. Multi-Unit Probabilistic Safety Assessment: Recent Developments. Paris: OECD/NEA.

3. Kumar S. C. Reliability and Probabilistic Safety Assessment in Multi-Unit Nuclear Power Plants. Academic Press, 2023.

4. Park J., Kang S. W. Considering the availability of required staffs in terms of the human reliability analysis of multi-unit accidents.

5. Park G., Arigi A. M., Koo S.-R., Kim J. Dependency Analysis of Human Failures in Multi-unit Scenarios: Types and Evaluation Method.

¹ Postgraduate 4th year Sushchenko K. O.

¹ Prof., doc.eng.sc. Nosovskyi A. V.

<https://scholar.google.com/citations?user=TnzOpWUAAAAJ&hl=uk&oi=ao>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

ASSESSMENT OF CRITICALITY POTENTIAL IN LARGE VERTICAL FLOW OF FUEL-CONTAINING MATERIALS AT CHORNOBYL NPP

Statement of the problem and its relevance. The beyond design basis accident at the Chornobyl NPP (ChNPP) in 1986 led to the destruction of Unit 4. The installation of New Safe Confinement (NSC) arch in the design position above the Shelter at the end of 2016 terminated atmospheric precipitation access to the Shelter. This, together with the completion of NSC commissioning in 2019 and the isolation of the Shelter from the environment, formed a unique dynamic system of two facilities, which received the name “the complex of the New Safe Confinement and the Shelter Object”.

The state of nuclear safety of the NSC-Shelter Complex is assessed by regular measurements of neutron flux density (NFD) characterizing the clusters of fuel-containing materials (FCM). The highest absolute value of the NFD in the Shelter is registered by the DU No. 5 located directly in the cluster in the 4th steam dump valve (SDV) in the southwestern part of the base plate of the reactor shaft. The main component of this cluster is brown lava-like FCM (LFCM), formed by corium interaction with serpentinite of the backfill of the lower biological shield of the reactor core and dumped in the southwestern sector of room 305/2 during the active stage of the accident [1, 2]. This cluster experienced a 1.5-fold increase in NFD in 2019 and continued growth in 2020, sparking discussions about its nuclear safety.

Analysis of the latest research. In 1991, the bulk density of the fuel in the 4th SDV was estimated using the calibrated source method [3]. According to these estimates, the volume density of nuclear fuel was $0.5 \pm 0.1 \text{ g/cm}^3$ resulting in $\sim 20 \%$ mass fraction of uranium in FCM.

In 1997, neutronic characteristics of fuel-containing materials based on simplified one-dimensional models were calculated [4]. The obtained dependences of K_{eff} on the water content in the neutron breeding medium (NBM) indicate the subcriticality and the presence of a specific water-uranium ratio where K_{eff} reaches its maximum. However, as the authors pointed out, the one-dimensional model is well suited for the FCM layer, which can be represented in the form of a parallelepiped, while for the FCM in SDV, which has a more complex shape of NBM and reflectors, it is necessary to use a three-dimensional physical model.

In the early 2000s, criticality calculations were performed for a physical model with a heterogeneous NBM and periodic boundary conditions (calculation for an infinite NBM) in the MCNP4B and SCALE 4.4a program codes [5, 6]. The calculations indicated that the physical model, assuming a fuel content of up to 18 % and a fuel burnup of 10 MW·day/kg, remains deeply subcritical yielding a K_{eff} of approximately 0.449.

However, due to limited data, including the reliance on a theoretical isotopic chemical composition and the reconstruction of cluster geometry based on indirect indicators, this cluster was classified as potentially hazardous, considering the possibility of a hypothetical composition in which criticality could, in principle, occur.

Goal formulation. The purpose of this study is to simulate the LFCM cluster in the 4th SDV, taking into account current knowledge, as well as to determine the minimum fuel concentration to achieve the critical mass in the volume of the SDV due to the admixture of fuel pellets into the brown LFCM.

Main part. The simulation was performed with the MCNP6 program code, and the parameters of criticality and the possibility of its achievement were determined. For the modelling purpose, the weighted average concentration of the leading chemical elements in brown LFCM, given in [7] was used (see Table 1).

Table 1 – Weighted average concentration of the main chemical elements in brown LFCM

Chemical element	U	Si	Al	Mg	Ca	Na	Zr	Fe
Mass fraction, %	9.7	32.2	3.3	5.2	4.5	3.1	4.5	1.0

Note: Oxygen takes the rest of the mass fraction.

The geometric model is based on known data on the design of the RBMK-1000 SDV. The geometric parameters are presented in Figure 1: a cylindrical cluster with a height of 3.7 m and a diameter of 1.5 m.

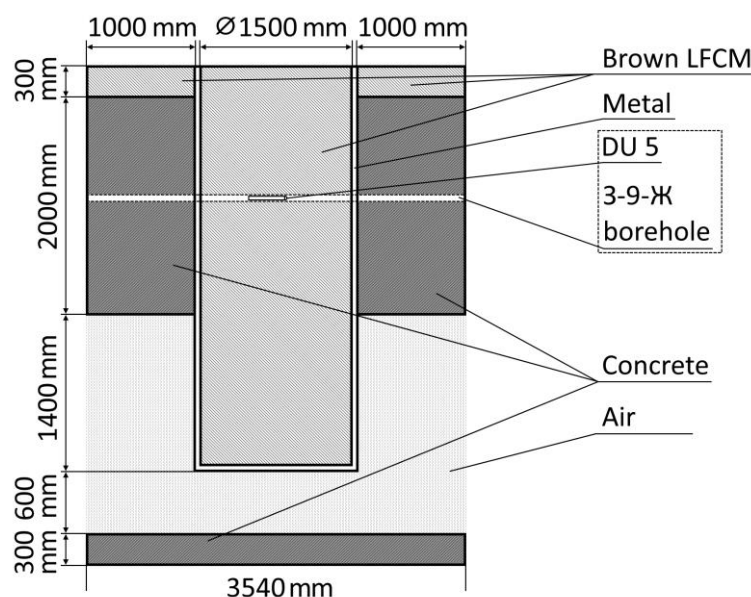


Figure 1 – Physical model of the cluster of brown LFCM

Based on findings in [8, 9, 10], an averaged porosity range of 20 – 50 % was adopted for calculations.

In this physical model the heterogeneity was executed in the delineation of separate volumes for water and FCM. Since the relaxation length of a neutron with an energy of 2 MeV in water is 2.88 cm, the lattice step interval of the model was chosen conservatively in the range of 2–4 cm associated with a maximum K_{eff} values at the optimal water-uranium ratio.

The average uranium concentration in brown LFCM in room 210/7 was previously sampled at 9.7 % [7]. According to experimental estimates [3] uranium concentration in the 4th SDV results in ~20 %. However, since there is a hypothetical possibility of inclusion in the stream of brown LFCM fragments of the reactor core and fuel pellets, calculations were also performed for compositions with uranium content up to 50 %.

Estimates of fuel burnup in brown LFCM were conducted in the work [11]. Calculated fuel burnup yielded a value of 12.5 ± 1.4 MW·day/kg of U corresponds to an equivalent enrichment from 1.24 % to 1.13 % in ^{235}U , accounting for the presence of ^{240}Pu .

Based on the developed physical model described above, an input file was specified for simulations using the Monte-Carlo program MCNP6. To determine the impact of water on the NFD and criticality, K_{eff} was calculated as a function of the water content ($\text{C}_{\text{H}_2\text{O}}$) in the NBM of brown LFCM (Figure 2).

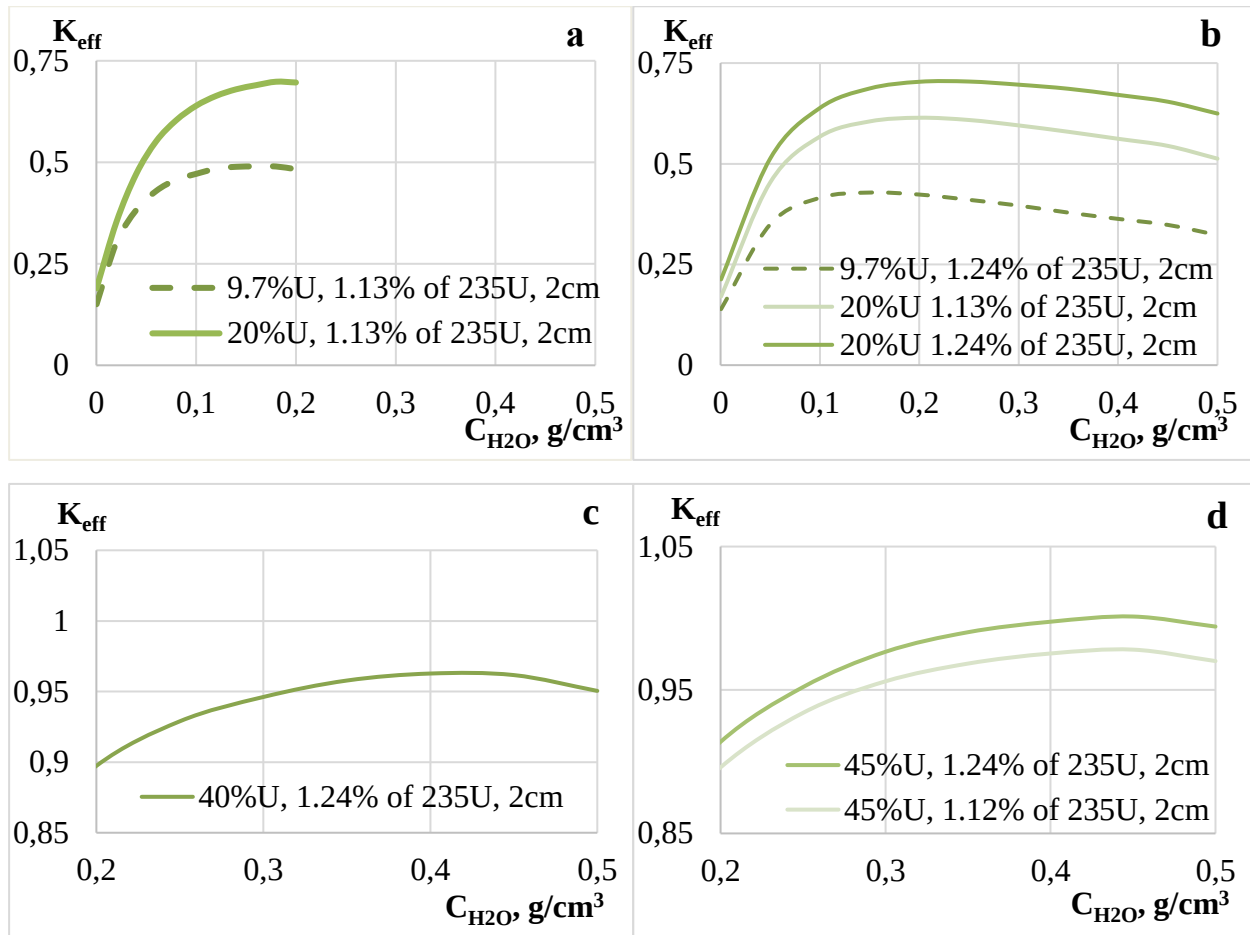


Figure 2 – Calculated K_{eff} as a function of the level of volume content of water in the NBM (C_{H_2O}) of brown LFCM for different enrichments (% of ^{235}U), uranium contents (%U) and porosity:

a – Porosity of NBM – 20 %; b-d – Porosity of NBM – 50 %

Figure 2 presents the model parameters in the following sequence: mass content of 9.7 % of U (e.g. 9.7 %U); fuel enrichment (e.g. 1.13 % of ^{235}U); modelling grid step (e.g. 2 cm). The critical mass in the volume of the 4th SDV is reached with a mass content of 45 % of uranium in brown LFCM, which is 10.8 tons of uranium. As a result, the cluster of brown LFCM in the 4th SDV with the chemical composition determined by sampling brown LFCM and considering experimental estimates of fuel density is deeply subcritical (see Fig. 2,a and Fig. 2,b). Safety limits are exceeded, and criticality is achieved only in a conservative hypothetical cluster model with uranium content of 40 % and 45 %, respectively (see Fig. 2,c and Fig. 2,d).

At porosity levels exceeding 20 %, low enriched NBM exhibits a specific (optimal) water-uranium ratio at which K_{eff} reaches its maximum, while the water content in the NBM remains lower than its maximum possible value. This implies that as water exits from the so-called “overwetted” NBM (with porosity exceeding 20 %), K_{eff} will increase until the optimal water content is reached. Once this optimum is surpassed, further water loss will result in a decrease in K_{eff} (see Fig. 2,c and Fig. 2,d).

Conclusions. By combining Monte-Carlo simulations using MCNP6 and experimental observations, it can be concluded that the fuel containing material cluster in the 4th steam dump valve at ChNPP Unit 4 has been and will continue to stay subcritical. It was determined that the fuel containing material cluster in the 4th steam pump valve can reach a critical mass with a fuel content of at least 45 %. In practice, achieving such a fuel concentration in this location is unlikely to occur.

References:

1. Pazuhin Ye. M. (1994). Lava-Like Fuel-Containing Masses of Chernobyl NPP Unit 4: Topography, Physico-Chemical Properties and Formation Scenario. *Radiochemistry*, 36(2), 78–99.
2. Klyuchnikov A. A., Krasnov V. A., Rud'ko V. M., & Shcherbin V.N. (2011). The Shelter: 1986–2011. On the Way to Transformation. NAS of Ukraine. Institute for Safety Problems of Nuclear Power Plants.
3. Belyaev S. T., et al. (1991). Techniques and Methods for Studying the Neutronic Characteristics of Fuel-Containing Masses of ChNPP Unit 4. Preprint IAE-5312/3.
4. Babenko V. A., et al. (1997). Study of the Multiplying Properties of Fuel-Containing Masses of ChNPP Unit 4. Preprint of the NAS of Ukraine. Institute of Nuclear Research KIYa14-97-1.
5. Bobro D. G., & Khomenko I. M. (2001). Using MCNP4B and SCALE 4.3 Program Codes to Assess the Criticality of FCM of the Shelter. In Glygalo, V. N., & Nosovskyi, A. V. (Eds.), *Scientific and Technical Aspects of International Cooperation in Chornobyl (Issue 3)*. Kyiv, High School.
6. Bobro D. G., et al. (2002). Using the MCNP4B and SCALE4.4A Program Codes to Assess the Criticality of Fuel-Containing Materials at the Shelter. *Problems of Chornobyl*, 10, 256.
7. Mykhailov O. V. (2016). On Material and Energy Sources of Formation of Fuel-Containing Materials during Chernobyl NPP UNIT 4 accident. *Nuclear Physics and Atomic Energy*, 17(4), 354.
8. Gabelkov S. V., Klyuchnikov A. A., Parkhomchuk P. E., & Chemersky G.F. (2015). Nature of Formation of Nanosized Pore Channels of Lava-Like Fuel-Containing Materials of “Shelter” Object. *Problems of Atomic Science and Technology*, 2(96), 77–83.
9. Gonchar V. V., Dvoeglazov A. M., Zhidkov A. V., Pazukhin E. M., & Petrov, V. V. (1996). Study of Some Physical Characteristics of LFCM of the Shelter. *The Shelter – 10 years. Main Results of Scientific Research (P. 173-182)*. Chornobyl: ISTC “Shelter”.
10. Zhidkov A. V. (2001). Fuel-Containing Materials of the Shelter Today: Current Physical Properties and Possibilities of Predicting Their Condition. *Problems of Chornobyl*, 7, 23.
11. Borovoj A. A., et al. (2001). Lava-Like Fuel-Containing Materials in the Bubbler Pool and Steam Distribution Corridor of ChNPP Unit 4. *Problems of Chornobyl*, 7, 181.

ОПТИМІЗАЦІЯ ЯДЕРНОГО ПАЛИВНОГО ЦИКЛУ УКРАЇНИ ШЛЯХОМ ВПРОВАДЖЕННЯ ТЕХНОЛОГІЙ ЗАМКНЕНОГО ЦИКЛУ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах глобальних кліматичних змін атомна енергетика є ключовим низьковуглецевим джерелом енергії [1]. Для України, з її значним ядерним парком, критично важливим є подолання викликів щодо залежності від імпорту палива та накопичення відпрацьованого ядерного палива (ВЯП) [2, 3]. Оптимізація ядерного паливного циклу шляхом впровадження технологій замкненого типу, що передбачають переробку ВЯП та рециклінг матеріалів, є необхідною умовою для підвищення ресурсоефективності, мінімізації обсягів радіоактивних відходів та зміцнення енергетичної незалежності держави [4].

Аналіз останніх досліджень. Питання оптимізації ядерного паливного циклу (ЯПЦ) та переходу до його замкненої моделі активно досліджуються провідними міжнародними організаціями, зокрема МАГАТЕ та ОЕСР/АЯЕ, які вказують на низьку ресурсну ефективність сучасних відкритих циклів [1, 3]. У працях закордонних вчених, таких як С. Forsberg та R. Taylor, обґрунтовано екологічні та економічні переваги рециклінгу ядерних матеріалів для зменшення обсягів високоактивних відходів [4]. Важливим етапом у дослідженні матеріальних потоків є використання імітаційного моделювання, зокрема програмного комплексу NFCSS, методологія якого детально описана в технічних звітах МАГАТЕ [5, 6]. В Україні стратегічні вектори розвитку галузі, що передбачають диверсифікацію постачання та розвиток елементів власного циклу, визначені в Енергетичній стратегії до 2050 року [2].

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка рекомендацій щодо оптимізації ядерного паливного циклу України шляхом техніко-економічного обґрунтування переходу від відкритої до замкненої моделі. Основна увага приділяється кількісному оцінюванню матеріальних потоків за допомогою програмного комплексу NFCSS для порівняння сценаріїв використання стандартного уранового палива (UOX) та часткового впровадження змішаного оксидного палива (MOX), з метою досягнення ресурсної автономності та мінімізації екологічного навантаження.

Основна частина

Для оцінки перспектив оптимізації ядерного паливного циклу (ЯПЦ) України було проведено імітаційне моделювання трьох сценаріїв розвитку енергосистеми до 2060 року за допомогою програмного комплексу NFCSS:

1. *(Існуючий парк):* Продовження експлуатації 15 енергоблоків (ВВЕР-1000/440) у межах відкритого циклу без переробки ВЯП.
2. *(Впровадження MOX-палива):* Часткове замикання циклу з 2030 року шляхом переробки ВЯП та завантаження 20 % активної зони реакторів ВВЕР змішаним оксидним паливом.
3. *(Повний цикл + РШН):* Інтеграція з 2032 року реактора на швидких нейтронах (на прикладі проєкту TerraPower) у поєднанні з 20 % використанням MOX-палива в реакторах ВВЕР.

Результати порівняння матеріальних потоків на 2060 рік наведено в табл. 1 та на рис.

Таблиця 1 – Результати порівняння матеріальних потоків на 2060 рік

Показник матеріального потоку	Сценарій 1 (Відкритий)	Сценарій 2 (з частковою переробкою)	Сценарій 3 (повний цикл)
Потреба в природному урані (Nat U), т	257,224	186,234	181,755
Обсяг накопиченого ВЯП (SF Storage), т	10102,2	3706,5	2365,6
Обсяг переробки (Reprocess), т	—	198,7	248,4
Регенований уран (Rep U Stock), т	—	186,3	231,1

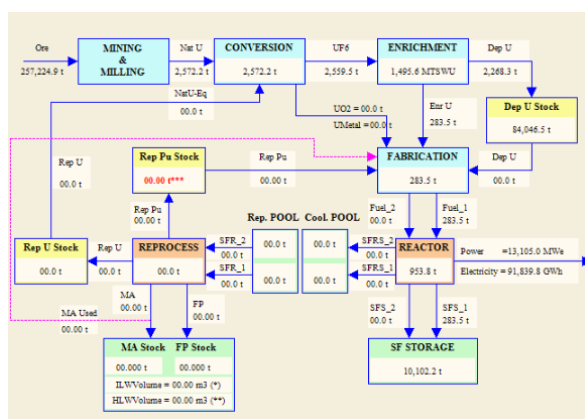


Рисунок 1 – Схема матеріального потоку (Сценарій 1) на кінець розрахункового періоду (2025-2060р.)

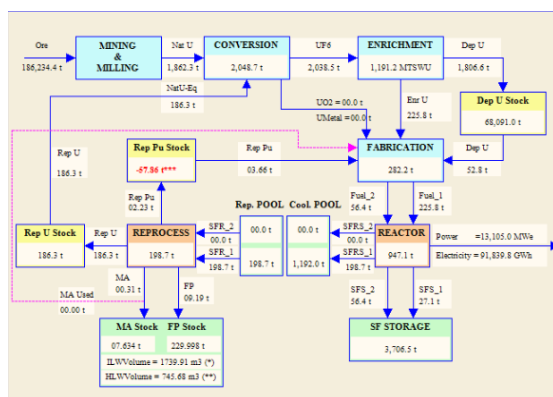


Рисунок 2 – Схема матеріального потоку (Сценарій 2) на кінець розрахункового періоду (2025-2060р.)

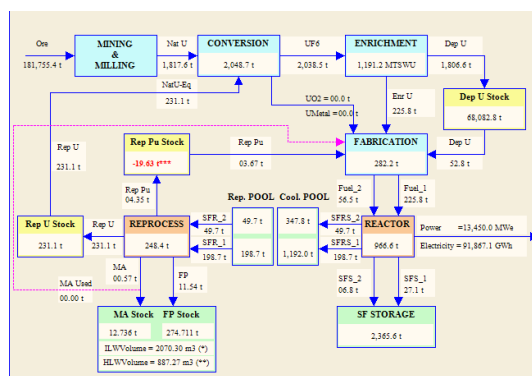


Рисунок 3 – Схема матеріального потоку (Сценарій 3) на кінець розрахункового періоду (2025-2060р.)

Впровадження реактора на швидких нейтронах дозволяє не лише знизити споживання природного урану на 29,3 % порівняно з базовим сценарієм, але й радикально (у 4,2 раза) зменшити обсяги ВЯП, що потребують тривалого зберігання (з 10,1 тис. т до 2,3 тис. т). Використання регенованого урану (Rep U) обсягом 231,1 т створює стабільний внутрішній ресурс для фабрикації нового палива.

Висновки.

– За результатами проведеного імітаційного моделювання в програмному комплексі NRCSS можна зробити наступні висновки:

– Теоретичний ресурсний потенціал: Розрахунки підтверджують, що за умови успішної інтеграції технологій замкненого циклу та реакторів на швидких нейтронах (РШН), теоретично можливе зниження потреби в природному урані до 30 % порівняно з існуючою моделлю. Проте реалізація такого потенціалу критично залежить від темпів комерціалізації інноваційних реакторних установок.

– Технологічні виклики: Розглянутий сценарій із впровадженням реактора типу Sodium (TerraPower) наразі є перспективним варіантом для стратегічного планування, проте він потребує ретельного моніторингу результатів демонстраційних проєктів у світі, оскільки технологія перебуває на стадії доопрацювання та виявлення експлуатаційних особливостей.

– Економічні та інфраструктурні обмеження: Незважаючи на позитивну динаміку матеріальних потоків (зокрема скорочення обсягів накопиченого ВЯП на 76%), перехід до замкненого циклу вимагає створення високовартісної та складної промислової інфраструктури з переробки палива та фабрикації МОХ-композицій. Економічна доцільність таких проєктів на даному етапі залишається дискусійною та потребує подальшого комплексного аналізу з урахуванням капітальних витрат і ризиків.

– Стратегічне значення: Отримані результати можуть бути використані як аналітичне підґрунтя для довгострокового прогнозування розвитку атомної енергетики України. Вони вказують на необхідність поступового вивчення інноваційних паливних технологій при збереженні надійності поточної експлуатації парку реакторів ВВЕР.

Перелік посилань:

1. IAEA. Energy, Electricity and Nuclear Power Estimates for the Period up to 2050. Vienna: International Atomic Energy Agency; 2020.
2. Міністерство енергетики України. Енергетична стратегія України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність». Київ, 2017.
3. OECD/NEA. Management of Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Policies and Options. Paris: OECD Nuclear Energy Agency; 2003.
4. Forsberg CW. Advanced Nuclear Fuel Cycles for Sustainable Nuclear Energy. Cambridge, MA: Massachusetts Institute of Technology; 2005.
5. Paris Agreement Paris, 12 December 2015. URL: https://treaties.un.org/pages/ViewDetails.aspx?src=TREATY&mtdsg_no=XXVII-7-d&chapter=27&clang=en.
6. Editorial: Fuel Cycle Simulation TWoFCS 2021. Fanny Courtin, Francisco Alvarez-Velarde, Philippe Moisy and Léa Tillard (Guest editors) 12 August 2022. URL: https://www.epj.org/articles/epjn/full_html/2022/01/epjn220044/epjn220044.html.

СЕКЦІЯ № 2

**Ядерна захищеність
та
нерозповсюдження**

¹ Young scientist Gergiieva V. O.

¹ Black Sea Women in Nuclear (BSWN)

BUILDING NUCLEAR FUTURES TOGETHER: THE NUCTALKS INITIATIVE OF THE BLACK SEA WOMEN IN NUCLEAR NETWORK

Statement of the problem and its relevance. Russia's war on Ukraine has created new challenges and exposed serious gaps for both Ukraine and the wider Black Sea region, with far-reaching global consequences. The nuclear field has become a major area of concern: threats to nuclear safety and security, as well as the rapid spread of nuclear-related disinformation, have underscored the need to raise awareness and provide accurate information on these issues. Traditional formats, such as large conferences or closed expert meetings, often remain inaccessible or too formal to encourage open dialogue, particularly for younger experts. After the Covid-19 pandemic highlighted the risks of an isolated society and disrupted in-person exchanges, webinars emerged as an effective way to sustain knowledge-sharing and foster dialogue online.

Analysis of the latest research. NucTalks is an educational and networking initiative established by the Black Sea Women in Nuclear (BSWN) network in August 2022. Since then, the series has hosted around twenty webinars on nuclear security, non-proliferation, arms control, women's leadership, and related topics, bringing together experts and early-career professionals from across the Black Sea region and beyond. This work will emphasize the importance of the initiative and its development.

Goal formulation. The goal of NucTalks is to support professionals in the nuclear field, raise awareness, counter disinformation, and provide a platform for people from the Black Sea region and other interested communities. Because it is open to any professional, regardless of their level of knowledge, area of expertise, or country of origin or residence, it has become an inclusive space for dialogue and learning in a less formal atmosphere.

Main part. NucTalks has addressed a wide spectrum of contemporary nuclear challenges, ranging from strategic stability and regional crises to emerging technologies and the human dimension of nuclear policy. The series has brought together senior practitioners and researchers to discuss, among other issues, the deployment of Russian tactical nuclear weapons in Belarus and its implications for escalation risks and the global non-proliferation regime, as well as the universalisation of the Convention on the Physical Protection of Nuclear Material and its Amendment and the practical benefits and challenges of its implementation for national regulators and operators. Other events have focused on nuclear security fundamentals and radiation protection, exploring what professionals and the broader public need to know in an oversaturated information space and how to distinguish accurate technical information from disinformation and fear-based narratives.

Several NucTalks have highlighted the strategic and geopolitical context of nuclear issues. Sessions have examined US–Russia relations and their consequences for Ukraine's security and future, and analysed how crises in the Middle East, such as Iran–Israel escalation affect regional stability, non-proliferation norms, and nuclear security arrangements. High-level speakers, including former U.S. Ambassador Laura Holgate, have discussed topics such as small modular reactors, their potential contribution to decarbonisation, and the specific safety, security, and safeguards questions they raise, helping audiences to critically assess both the promises and risks of new reactor technologies. Another webinar addressed artificial intelligence at the nuclear crossroads, looking at how AI tools may influence nuclear weapons decision-making, verification, and security, and what governance frameworks are needed to mitigate new risks.

NucTalks has also devoted particular attention to the human and ethical dimensions of the nuclear field. A special history session centred on the testimony of an atomic-bomb survivor, linking diplomatic debates on disarmament to lived experience and intergenerational memory, while another event honoured Marie Skłodowska-Curie and examined her life as a lens on discrimination and barriers faced by women in science. The series regularly features discussions on women's leadership in nuclear professions, bringing together experts from international organisations, national regulatory bodies, academia, and industry to share leadership experiences, career challenges, and strategies for making nuclear institutions more diverse and inclusive. Taken together, these webinars show how NucTalks connects technical, political, and societal perspectives, providing participants with both substantive knowledge and a supportive professional community.

Building on the success of the online series, NucTalks has also evolved into in-person formats, the workshop "Regional Perspectives on Non-Proliferation, Radiological and Nuclear Security" held at the Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation on 9–11 February. This meeting brought together experts from across the Black Sea region, with a particularly strong representation from Ukraine, including academics, regulators, nuclear industry specialists, and civil society leaders from institutions such as Odesa I. I. Mechnikov National University, Energoatom, George Kuzmycz Training Center for Physical Protection, Control and Accounting of Nuclear Material, the State Scientific and Technical Center for Nuclear and Radiation Safety, the Ukrainian Nuclear Society, and youth and professional networks. By deliberately inviting many Ukrainian participants and creating space for them to present research and share wartime experiences, the in-person NucTalks workshop strengthened regional collaboration, amplified Ukrainian expertise, and translated the online community into concrete joint projects and professional ties.

Due to the webinars all members were able to get in touch with many important organizations in nuclear field, some examples are: James Martin Center for Nonproliferation Studies (CNS-MIIS), George Kuzmycz Training Center for Physical Protection, Control and Accounting of Nuclear Material, Vienna Center for Disarmament and Non-Proliferation (VCDNP), TSU Andronikashvili Institute of Physics, World Institute for Nuclear Security (WINS), Institute for Peace Research and Security Policy at the University of Hamburg (IFSH), Odesa Center for Nonproliferation (OdCNP), Odesa I. I. Mechnikov National University, Ukrainian Nuclear Society, CNE Cernavoda in Romania, National Agency for Regulation of Nuclear and Radiological Activities (NARNRA) in Moldova.

As the regular moderator of NucTalks, I can also share my personal experience with this initiative. After the start of the war on Ukraine, I lost my job and was unsure how to continue my professional path. Taking on a leadership role in NucTalks helped me regain confidence in my future and in the importance of my voice. Leading the series allows me to learn every day, expand my network, and strengthen my belief in my own capabilities. Such initiatives should be widely promoted among young professionals, as they can help people discover their interests, meet like-minded colleagues, and build lasting friendships.

Conclusions. In summary, webinars are an important tool for developing strong professional connections and generating new ideas for research, collaboration, and exchange. As no one can make the world safer alone, meaningful change requires a community of colleagues working together, and the Black Sea Women in Nuclear network embodies this principle by using its initiatives as practical tools. By combining accessible online formats with active engagement, NucTalks helps to demystify complex nuclear issues and creates entry points for those who might otherwise remain outside specialized expert circles. Looking ahead, we plan to integrate NucTalks more closely with conference activities by organising dedicated panels and side events, as well as to launch several webinars in Ukrainian in order to engage a broader range of professionals from Ukraine.

¹ Мол. вчений Самсоненко А. В.; ² асист. Остапенко І. А.

¹ Асист., к.ф.-м.н. Драпей С. С.

¹ Інститут ядерних досліджень НАН України

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГАЛИНИ У ПРАВОВОМУ РЕГУЛЮВАННІ ФІЗИЧНОГО ЗАХИСТУ ДЖЕРЕЛ ІОНІЗУЮЧОГО ВИПРОМІНЮВАННЯ ТА РАДІОАКТИВНИХ ВІДХОДІВ

Актуальність. Фізичний захист джерел іонізуючого випромінювання (ДІВ) та радіоактивних відходів (РАВ) є ключовим елементом державного режиму ядерної та радіаційної безпеки, спрямованим на захист життя, здоров'я та довкілля. Нормативна база України включає закони про використання ядерної енергії й радіаційну безпеку, поведінку з РАВ, захист людини від іонізуючого випромінювання та міжнародні зобов'язання щодо фізичного захисту ядерного матеріалу. Проте відсутній окремий нормативно-правовий акт – «Правила фізичного захисту ДІВ та РАВ», що ускладнює впровадження єдиних стандартів безпеки і порушує принцип системності правового регулювання.

Об'єкт і предмет дослідження. Об'єкт – публічно-правові відносини у сфері фізичного захисту ДІВ і РАВ; предмет – система правових норм, принципів і механізмів реалізації вимог фізичного захисту.

Методологія. Використано системний, функціональний та порівняльно-правовий підходи для аналізу принципів безпекового права та нормативних конструкцій.

Особливої актуальності проблема набуває в умовах воєнних загроз, гібридних ризиків та підвищеної імовірності диверсійних і терористичних посягань на об'єкти, де використовуються або зберігаються ДІВ і РАВ. Пошкодження чи незаконне використання таких матеріалів може спричинити масштабні соціальні, екологічні та економічні наслідки, що виходять за межі окремого об'єкта та становлять загрозу національній безпеці.

Крім того, активна інтеграція України до європейського правового простору зумовлює необхідність гармонізації національного законодавства з міжнародними стандартами та рекомендаціями у сфері фізичного захисту. Формування цілісного, системного нормативного акта дозволить забезпечити єдність правозастосовної практики, підвищити передбачуваність регулювання для ліцензіатів і зміцнити інституційну спроможність держави у сфері безпеки поведінки з ДІВ та РАВ.

Теоретико-правові аспекти проблеми

1. Фізичний захист як спеціальний адміністративно-правовий режим

Фізичний захист ДІВ і РАВ доцільно розглядати як спеціальний адміністративно-правовий режим, що характеризується:

- імперативним методом регулювання;
- підвищеним рівнем державного контролю;
- обмеженням дискреції суб'єктів господарювання;
- превентивною спрямованістю.

Водночас законодавство не формує цілісної концепції цього режиму як окремого інституту права, що зумовлює фрагментарність норм.

2. Порушення принципу системності правового регулювання

3 позиції теорії права ефективно правове регулювання має відповідати принципам:

- системності;
- внутрішньої узгодженості;
- ієрархічності;
- правової визначеності.

Фізичний захист ДІВ та РАВ регламентується розпорощеними нормами різної юридичної сили. Відсутність єдиного системоутворюючого акту порушує принцип системності та ускладнює формування стабільної правозастосовної практики.

Аналіз чинних норм засвідчує фрагментарність регулювання: вимоги викладені в різних законах і підзаконних актах, відсутній комплексний акт із детальними правилами фізичного захисту ДІВ і РАВ [1–4].

Національне законодавство не забезпечує повної реалізації ризик-орієнтованого підходу: відсутня диференційована категоризація загроз, уніфіковані процедури оцінки вразливості й ризику для різних категорій ДІВ та РАВ [5,6].

Простежуються нечіткі межі компетенції між регулюючим органом, ліцензіатами й іншими суб'єктами господарювання, що порушує принцип юридичної визначеності та ускладнює координацію у разі виявлення правопорушень (інцидентів) пов'язаними з ДІВ та РАВ.

Чітко не врегульовано забезпечення фізичного захисту РАВ під час транспортування, тимчасового зберігання та дій які мають виконуватися у разі настання надзвичайних або кризової ситуацій.

Сучасні загрози (кібер втручання, внутрішній правопорушник) не отримали адекватного правового відображення у вимогах щодо фізичного захисту, що створює розрив між доктринальним розвитком безпекового права та практичними нормами.

Кодекс поведінки щодо забезпечення безпеки й збереження радіоактивних джерел затверджений Радою Управляючих МАГАТЕ у вересні 2003 року й надрукований у січні 2004 року. Кодекс є першим міжнародним документом, який стосується фізичного захисту ДІВ.

Кодекс поведінки застосовується для джерел радіації, які можуть являти собою реальний ризик для окремих осіб, суспільства й довкілля (джерела категорій 1 – 3) [7].

Кодекс не розповсюджується на ядерні матеріали й ДІВ, які використовуються у військових чи оборонних програмах.

Кодекс забезпечує державні органи рекомендаціями з таких питань:

- Досягнення та підтримка високого рівня безпеки й збереженості ДІВ.
- Запобігання несанкціонованому доступу до ДІВ, завдання їм шкоди, їх втрати, викрадення, несанкціонованої передачі з метою зниження імовірності випадкового шкідливого опромінення такими джерелами чи зловмисному застосуванню таких джерел для нанесення шкоди окремим особам, суспільству чи довкіллю.
- Пом'якшення чи зведення до мінімуму радіаційних наслідків будь-якої аварії чи зловмисних дій, які пов'язані з ДІВ.

Для виконання своїх завдань у сфері фізичної ядерної безпеки держава створює власний державний режим фізичної ядерної безпеки. Уряд держави має забезпечити, щоб усі організації, які мають обов'язки в державному режимі фізичної ядерної безпеки, мали необхідні компетенції та постійно їх підтверджували.

Держава має гарантувати, що уряд й організації, відповідальні за фізичну ядерну безпеку, матимуть достатню кількість людських, фінансових і технічних ресурсів, а також наявність у державі достатньої кількості кваліфікованих осіб для успішного створення, підтримання та забезпечення довгострокового функціонування режиму фізичної ядерної безпеки.

Наукова новизна. Доведено, що фізичний захист ДІВ і РАВ повинен розглядатися як самостійний адміністративно-правовий режим із визначеними принципами та механізмами реалізації. Виділено конкретну прогалину – відсутність окремого акту

«Правила фізичного захисту ДІВ та РАВ», що ускладнює правозастосування. Запропоновано концептуальні напрями модернізації законодавства з урахуванням сучасних безпекових викликів.

Висновки. Система нормативного регулювання фізичного захисту ДІВ та РАВ є фрагментарною: існуючі закони та підзаконні акти не формують єдиного, системного підходу, що ускладнює впровадження стандартів безпеки.

Відсутність окремого нормативного акту «Правила фізичного захисту ДІВ та РАВ» створює прогалину в правовому регулюванні і підвищує ризики невідповідності між законодавчими нормами та практичними заходами безпеки.

Недостатня деталізація ризик-орієнтованого підходу призводить до того, що рівні загроз визначаються непослідовно, а процедури оцінки вразливості та загрози не стандартизовані.

Нечітке розмежування повноважень та відповідальності між регулюючими органами, ліцензіатами та іншими суб'єктами господарювання ДІВ створює потенційні конфлікти і знижує ефективність правозастосування.

Сучасні загрози (кібер, внутрішні загрози, гібридні ризики) не враховані чинними нормативно-правовими актами, що потребує перегляду та удосконалення існуючих вимог.

Практичні рекомендації:

– розробити окремий нормативно-правовий акт «Правила фізичного захисту ДІВ та РАВ»;

– запровадити диференційовані вимоги залежно від категорії об'єкта та рівня загрози;

– чітко визначити повноваження та відповідальність всіх суб'єктів поводження з ДІВ та РАВ;

– інтегрувати сучасні загрози у нормативні вимоги, зокрема кіберзахист та протидію внутрішнім правопорушникам на об'єктах, які здійснюють поводження з ДІВ та РАВ;

– забезпечити міжвідомчу координацію у разі виявлення правопорушень (інцидентів) та уніфікацію процедур оцінки ризику.

Наукова та практична значущість: реалізація зазначених заходів сприятиме підвищенню ефективності фізичного захисту ДІВ та РАВ, мінімізації ризиків для життя, здоров'я та довкілля, а також узгодженню національної нормативної бази з міжнародними стандартами безпеки.

Перелік посилань:

1. Закон України «Про використання ядерної енергії та радіаційну безпеку» // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 8. – С. 39.

2. Закон України «Про поводження з радіоактивними відходами» // Відомості Верховної Ради України. – 1995. – № 27. – С. 255.

3. Закон України «Про захист людини від впливу іонізуючого випромінювання» // Відомості Верховної Ради України. – 1998. – № 3. – С. 15.

4. Конвенція про фізичний захист ядерного матеріалу: з поправками 2005 р. – Відень: МАГАТЕ, 2005. – 45 с.

5. IAEA. Nuclear Security Series No. 13: Nuclear Security Recommendations on Physical Protection of Nuclear Material and Nuclear Facilities (INFCIRC/225/Revision 5) – Vienna: IAEA, 2011. – 54 p.

6. IAEA. Nuclear Security Series No. 14: Nuclear Security Recommendations on Radioactive Material and Associated Facilities – Vienna: IAEA, 2011. – 62 p.

7. Кодекс поведінки щодо забезпечення безпеки й збереження радіоактивних джерел // URL: <https://www.iaea.org/ru/publications/13449/kodeks-povedeniya-po-obespecheniyu-bezopasnosti-i-sokhrannosti-radioaktivnykh-istochnikov>.

¹Пров. інженер Катунін Є. В.

²Заст. директора з навчально-виховної роботи, к.пед.н. Пихтар М. П.,

²Заст. директора з планування та координації розвитку, к.т.н. Салій Л. М.

¹ДСП «Чорнобильська АЕС»

²Славутицька філія КПІ ім. Ігоря Сікорського

ФІЗИЧНА ЯДЕРНА БЕЗПЕКА НА ЕТАПІ ЗНЯТТЯ З ЕКСПЛУАТАЦІЇ АТОМНИХ СТАНЦІЙ

Постановка проблеми та її актуальність. Завдання фізичної ядерної безпеки (ФЯБ) на етапі зняття з експлуатації полягає в тому, щоб ядерні та інші радіоактивні матеріали не потрапили до недержавних суб'єктів, які можуть використати їх у зловмисних цілях.

Договір про нерозповсюдження ядерної зброї передбачає обов'язки, яких повинні дотримуватися держави щоб довести, що вся ядерна діяльність використовується тільки за призначенням і що ядерні матеріали не переключаються з мирного використання на створення ядерної зброї. В доповнення до цього принципу гарантій була розроблена концепція фізичної ядерної безпеки.

Разом з цим, фізичний захист спрямований на захист інтересів національної безпеки держави, попередження та припинення диверсій, крадіжки або будь-якого іншого незаконного вилучення ядерного матеріалу, а також зміцнення режиму нерозповсюдження ядерної зброї. Все те, що стосується сфери національної безпеки, підпадає під дію фундаментальної концепції принципу державного суверенітету, яка відповідає Вестфальській системі та залишається найважливішим елементом розвитку міжнародної нормативної бази ФЯБ та формування державної політики в сфері фізичного захисту.

Основна частина. Одним з головних атрибутів впровадження державного суверенітету в сфері ФЯБ має бути базова проєктна загроза. Забезпечення безпечної діяльності в ядерному секторі вимагає від держави взяти на себе відповідальне політичне рішення. Воно може взяти на себе одноосібну відповідальність, або застосувати варіант інтегрованого підходу за участю державних органів виконавчої влади та операторів ядерних установок (ЯУ).

Чим нижче рівень ризиків на які погоджується держава, тим має бути вищий рівень ФЯБ, що вимагатиме більших витрат на забезпечення заходів з безпеки. Рівень прийнятного ризику є суцільно політичним рішенням і він повинен періодично переглядатися в залежності від зміни загроз. Цей аспект неможливо недооцінювати оскільки вартість безпеки може бути дуже значною і тому вона має бути врахованою в розрахунках економічної складової проєктів.

Базова проєктна загроза поряд з неприйнятними радіологічними наслідками обов'язково має враховувати можливі соціально-політичні наслідки диверсії та несанкціонованого вилучення ядерного матеріалу (ЯМ). Аналіз ризиків має бути основаним на масштабах наслідків диверсії або заволодіння ЯМ з метою створення ядерного вибухового чи імпровізованого пристрою.

До основних сценаріїв подій пов'язаних з ФЯБ мають бути віднесені:

- викрадення ядерної зброї;
- заволодіння ЯМ та створення ядерного вибухового пристрою;
- диверсія (саботаж) по відношенню до ЯУ або перевезення (транспортування) ядерного або радіоактивного матеріалу;
- заволодіння ЯМ для створення імпровізованого ядерного пристрою;

- створення радіологічного диспергуючого пристрою, радіаційно опромінюючого пристрою або радіологічного розсіювального пристрою.

З урахуванням наявних насильницьких протиправних дій диверсійного спрямування на АЕС існують підстави зробити припущення, що диверсії на ядерних установках України не можуть вважатися гіпотетичними подіями.

Новітні технології такі як безпілотні летальні системи та штучний інтелект є питаннями, яким необхідно приділяти все більше уваги і які вірогідно будуть залишатися в полі зору в майбутньому. Вони можуть бути надзвичайно корисними для підвищення ефективності фізичної ядерної безпеки. Наприклад технології штучного інтелекту та великих масивів даних можуть допомогти у вирішенні проблем з виявленням подій пов'язаних з ФЯБ, запобігання та реагування на них. Ці технології та їх використання відкривають нові можливості, але і породжують певні проблеми. Застосування таких технологій зловмисниками створює додаткові потенційні ризики фізичному захисту. Так, сучасні системи ФЯБ установок не мають ефективних засобів протидії БПЛА, а результати аналізу сучасного стану безпеки комп'ютерних систем свідчить про суттєву їх уразливість.

Поряд з вирішенням питань науково-технічного плану в майбутньому треба звернути увагу на зростаючий вплив соціальних, політичних, правових та економічних аспектів зняття ядерних установок з експлуатації та створення об'єктів необхідної для цього інфраструктури, включаючи реалізацію концепції довгострокового зберігання відпрацьованого ядерного палива. З екологічної точки зору можливо перевага повинна надаватися невеликій кількості крупних сховищ ніж велику кількість малих.

Використанню ядерної енергії, як багатьом іншим промисловим технологіям, притаманні специфічні ризики. Однією з особливостей ядерної сфери є ризики нанесення шкоди в результаті впливу іонізуючого випромінювання на великі території не тільки навколо ядерної установки, а й далеко за її межами. Ядерна галузь може бути головною ціллю нападників, в першу чергу через можливі жакливі наслідки для населення, тому найголовнішим питанням має бути протидія ядерному тероризму від якого не застрахована жодна країна в світі.

Напередодні будь-яких змін інвентарної кількості ЯМ та іншого радіоактивного матеріалу на ЯУ та модифікаціями обладнання, систем та пристроїв ліцензіат має здійснити аналіз можливого впливу цих змін на рівень неприйнятних радіологічних наслідків в разі диверсії. Повинна бути організована робота з моніторингу змін інвентарної кількості ЯМ, включаючи будь-які пов'язані з ними зміни категоризації ЯМ та ЯУ, необхідно здійснювати аналіз можливого впливу на рівень неприйнятних радіологічних наслідків та корегувати заходи фізичного захисту (ФЗ) для забезпечення відповідного рівня ФЯБ. В разі зміни конфігурації ЯУ оператор має здійснити розробку, оцінку та оновлення планів, процедур, проектної документації стосовно ФЯБ.

Заключним етапом життєвого циклу ЯУ є етап зняття з експлуатації. Відповідно до законодавства України експлуатуюча організація ще на етапі експлуатації ЯУ забезпечує розроблення проєкту зняття з експлуатації ЯУ та приведення системи ФЗ установки у відповідність до проєкту зняття з експлуатації ЯУ.

Стадія зняття з експлуатації передбачає діяльність, яка в кінцевому етапі має призвести до видалення з ЯУ всього ядерного палива та радіоактивних відходів. Якщо на етапі зняття ЯУ з експлуатації зберігається ризик несанкціонованого вилучення ЯМ або загроза здійснення диверсії, що може призвести до неприйнятних радіологічних наслідків, термін виконання заходів з ФЯБ має бути продовженим, можливо у адаптованому вигляді в залежності від характеристик об'єктові проектної загрози та особливостей технологічних процесів, характеру технічного обслуговування, демонтажу тощо.

Характерною особливістю етапу зняття ядерної установки з експлуатації для ФЯБ є можлива зміна рівня неприйнятних радіологічних наслідків в результаті диверсії,

трансформація об'єктової проектної загрози по мірі реалізації проекту зняття з експлуатації, припинення використання певних систем життєзабезпечення важливих для ядерної безпеки та ФЯБ, переміщення радіоактивних матеріалів, обладнання, устаткування та залучення до робіт представників сторонніх організацій, що вимагає застосування додаткових заходів ФЯБ тощо.

Перед початком робіт з вивантаження з активної зони реактора ядерного палива має передувати розроблення нових і приведення у відповідність до вимог законодавства діючих процедур з фізичного захисту. Розробляючи такі процедури, особливу увагу слід приділяти процедурам ФЗ при переміщенні ядерних матеріалів (ядерного палива) як в межах зон обмеження доступу ЯУ, так і поза ними.

Доречно звертати увагу на певні особливості процесу видалення відпрацьованого ядерного палива, характерними особливостями якого може бути підвищення рівня уразливості ЯУ та ЯМ при здійсненні переміщення ядерних матеріалів в зонах обмеження доступу з періодичних перетворюються в постійні і стають частиною основного технологічного процесу на ядерній установці, що полегшує правопорушникам реалізацію сценарію злочинних дій. ЯМ на стадії його видалення за межі майданчика перевозиться, як правило, по одному й тому ж маршруту, що може бути використане правопорушником для вчинення диверсії.

На етапі життєвого циклу ЯУ зняття з експлуатації, як правило, психологічний стан у персоналу не оптимістичний через відсутність перспектив і статистика свідчить що персонал, частіше допускає помилки при виконанні своїх обов'язків, висококваліфіковані фахівці, включаючи фахівців з фізичного захисту, звільняються з роботи. Скорочення посад сприяє появі мотивації у потенційних внутрішніх правопорушників, що вимагає від ліцензіата розробки та впровадження комплексу заходів щодо зниження рівня ризиків впливу людського фактору на стан ФЯБ. Ліцензіат має здійснювати оцінку впливу на стан ФЯБ скорочення штатного персоналу та збільшення підрядників та інших категорій сторонніх робітників, (врахування перерозподілу кадрових ресурсів). При цьому, не зважаючи на можливі зміни проектної загрози повинна бути забезпечена функція контролю доступом та інших функцій ФЯБ для підтримання діяльності зі зняття з експлуатації.

Цілі ФЯБ на стадії зняття з експлуатації мають передбачати повторну оцінку вимог ФЗ у зв'язку зі зміною інвентарної кількості ЯМ та рівнем потенційних радіологічних наслідків пов'язаних з диверсією, забезпечення збалансованого співвідношення ФЯБ та ЯБ, врахування термінів реалізації виведення з експлуатації (негайне або відтерміноване вилучення ЯМ). Модифікацію по мірі необхідності заходів ФЯБ в ситуаціях коли інвентарна кількість ЯМ переміщується (перевезення, транспортування), видаляється, збільшується або змінюються в будь-який інший спосіб.

Трансформація рівня ФЯБ під час вивантаження ЯП та забрудненого обладнання із приміщень ЯУ має бути здійсненим на основі диференційованого підходу. При цьому повинні бути передбачені заходи ФЗ з утилізації списаного обладнання систем ФЗ, управління змінами робочої сили, скорочення персоналу, або структурні зміни, які можуть вплинути на ФЯБ ЯУ та заохочення персоналу стосовно культури захищеності в період зняття ЯУ з експлуатації.

По мірі заповнення сховища відпрацьованого ядерного палива та звільнення активної зони і басейну витримки необхідно здійснювати моніторинг цього процесу та готуватися до можливого перегляду заходів ФЗ зважаючи на зміну умов об'єктової проектної загрози щодо місць розміщення ЯМ та можливу зміну рівня неприйнятних радіаційних наслідків в результаті диверсії або ризиків викрадення ЯМ, здійснювати оцінку ефективності можливих змін в заходах ФЯБ, які можуть негативним чином вплинути на вірогідність диверсії або несанкціонованого вилучення ЯМ, передбачати зміну меж зон обмеження доступу після внесення змін в конфігурацію ЯУ з метою забезпечення у відповідних випадках подальшого застосування заходів ФЯБ.

Висновки. Аналіз забезпечення фізичного захисту ЯМ вказує на те, що їх перевезення є одним з найбільш привабливих станів для правопорушників, тобто радіоактивні матеріали найбільш вразливі під час їх переміщення. Рекомендації МАГАТЕ на базі показника радіоактивності вмісту одиначної упаковки визначає такі рівні фізичного захисту - практика розсудливого управління, базовий рівень фізичного захисту та підвищений рівень фізичного захисту. Відповідальний ліцензіат визначає та створює систему фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні на етапі підготовки до перевезення, забезпечує її функціонування на етапах завантаження, відправки, транспортування, розвантаження ядерних матеріалів і припиняє функціонування системи після передачі ядерних матеріалів вантажоодержувачу, розробляє і здійснює заходи із забезпечення якості при здійсненні діяльності з фізичного захисту на етапах визначення, створення та експлуатації системи фізичного захисту ядерних матеріалів при їх перевезенні.

Перелік посилань:

1.Зняття з експлуатації атомних електростанцій: Навчальний посібник / А. В. Носовський, В. К. Кучинський, А. І. Савін, М. В. Савельєв, Л. М. Салій ; за заг. ред. А. В. Носовського. – Вид. 2-ге (відредаг. і доповн.). – Київ: НАН України, ІПБ АЕС, 2025. – 616 с.

2. Серія видань МАГАТЕ по фізичній ядерній безпеці № 26-G, Практичне керівництво, «Фізична безпека ядерних матеріалів при перевезенні», 2024 рік.

3 Серія видань МАГАТЕ по фізичній ядерній безпеці № 37-G, Практичне керівництво, «Створення національної системи управління реагуванням на події, пов'язані з фізичною ядерною безпекою», 2023 рік.

¹ Аспірант Штефан В. М.

¹ Зав. відділу, к.т.н. Гречанинов В. Ф.

https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=04DH_WMAAAAJ

¹ ІПММС НАН України

РОБОТИЗОВАНЕ РАДІАЦІЙНЕ КАРТОГРАФУВАННЯ ЗОВНІШНЬОЇ ОБШИВКИ НБК ПІСЛЯ УДАРУ РОСІЙСЬКОГО БПЛА

Постановка проблеми та її актуальність. Радіаційний контроль промайданчика АЕС, її санітарно-захисної зони (СЗЗ) та зони спостереження (ЗС) є важливим завданням, яке виконується протягом усього життєвого циклу атомної електростанції, включаючи період зупинки та виведення з експлуатації. З метою безперервного контролю радіаційної обстановки у вищезазначених зонах за будь-яких умов експлуатації АЕС, включаючи аварії проєктного та позапроєктного рівнів, нормативно-правові документи більшості країн вимагають створення автоматизованої системи контролю радіаційної обстановки (АСКРО). Окрім моніторингу зовнішнього радіаційного середовища (як всередині, так і поза межами промислової території АЕС), ці системи виявляють рівні іонізуючого випромінювання, що перевищують допустимі межі, та передають сигнали тривоги персоналу АЕС через інформаційні та керуючі системи (ІКС) АЕС, а також зовнішнім споживачам, включаючи повідомлення компетентних державних органів про погіршення радіаційної обстановки для прийняття відповідних управлінських рішень.

Відповідно до галузевих стандартів України, при формуванні мережі станцій радіаційного контролю (СРК) та АСКРО для атомних електростанцій слід враховувати метеорологічні умови та розміщення моніторингових станцій поблизу або в межах населених пунктів, розташованих у зоні контролю [1] (СЗЗ+ЗС). Водночас автори [1], посилаючись на роботи [2, 3], зазначають, що такі мережі СРК та АСКРО будуть «прозорими» для радіонуклідів, що вивільняються з АЕС у разі несприятливих погодних умов, які спричиняють поширення шлейфу викидів у вузькому секторі (15–20 °) або в умовах промайданчика, і роблять тривожний висновок, що жодна з існуючих мереж СРК або АСКРО на українських атомних електростанціях не надає точної інформації про радіаційну обстановку в зоні впливу атомної електростанції [1].

Формулювання мети. Не ставлячи під сумнів необхідність вдосконалення та оптимізації розміщення систем СРК та АСКРО, у цій доповіді пропонується модернізувати існуючі системи шляхом доповнення їх робототехнічними мобільними системами з метою розширення зони охоплення радіаційного моніторингу ЗС.

Основна частина. Для підтвердження життєздатності роботизованої системи радіаційної розвідки було проведено повітряну радіаційну розвідку зовнішньої обшивки НБК після удару російським БПЛА.

Пропонована роботизована система ІПММС та ІПБ АЕС ґрунтується на використанні більш дешевих платформ, таких як DJI Mavic 2 або Autel Evo 2, а також FPV-коптерів, оснащених модулем для реєстрації параметрів польоту та вимірюваних доз. У якості детекторів використовуються європейські прилади виявлення гамма-випромінювання Mirion AccuRad PRD та українські БДБГ-15С-09. Ці пристрої мають відносно низьку ціну та прийнятну чутливість.

Таке рішення обмежує дальність та висоту повітряного сканування території, але дозволяє масово застосовувати повітряні дрони за низької вартості [3]. Крім того, такі дрони дають можливість швидкого розгортання та оперативного реагування на події, що могли

призвести до зміни радіаційного забруднення. Дані про радіаційну обстановку, отримані з таких дронів, дозволять розширити та перевірити вимірювання, отримані СРК та АСКРО.



Рисунок 1 – 3D модель системи на базі дрону DJI Mavic 2:
а – модель дрону з детектором Mirion AccuRad PRD; б – схематичне зображення корисного навантаження системи

Нами було розроблено та створено систему радіаційної розвідки на основі FPV-дрону. Корисне навантаження системи включає детектор Mirion AccuRad PRD, комп'ютер Raspberry Pi Zero, GNSS модуль для геолокації, LoRa модуль для передачі даних і зв'язку з операторами системи, та камери.

За допомогою розробленої системи проведено обстеження зовнішньої обшивки НБК, під час якої було зроблено фото зовнішньої обшивки та проведено вимірювання інтенсивності радіації біля поверхні зовнішньої обшивки.

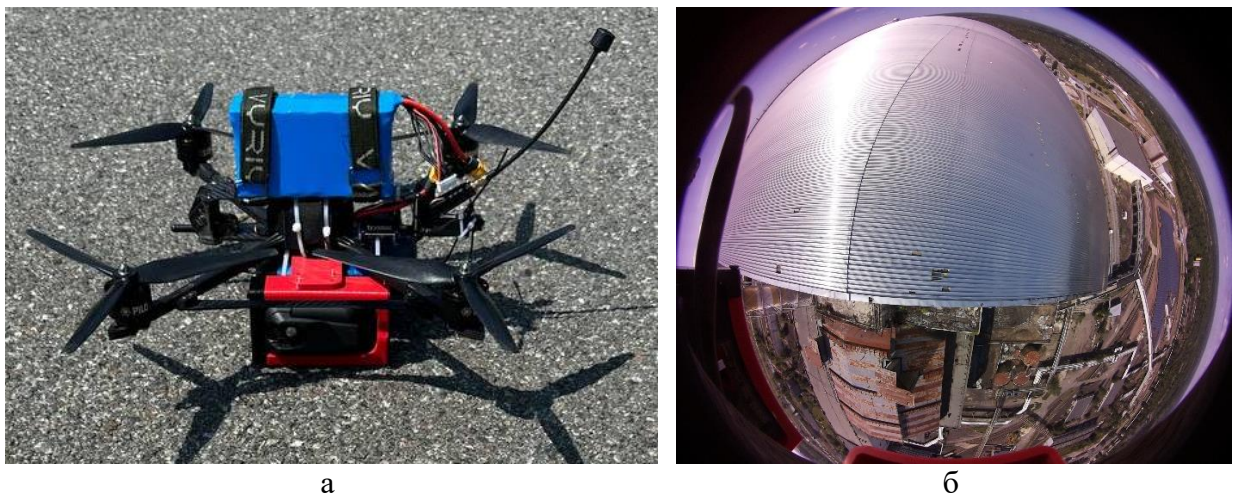


Рисунок 2 – Результати розвідки на базі FPV-дрону з детектором Mirion AccuRad PRD:
а – зовнішній вигляд дрону; б – фото отримане під час обстеження зовнішньої обшивки НБК

Отримані дані були нанесені на поверхню НБК та інтерпольовані методами лінійної інтерполяції. Отримані дані дозволяють оцінити дозові навантаження на персонал для планування робіт з відновлення НБК після удару і пожежі. Дані було передано ІПБ АЕС та ДСП ЧАЕС для подальшого аналізу.

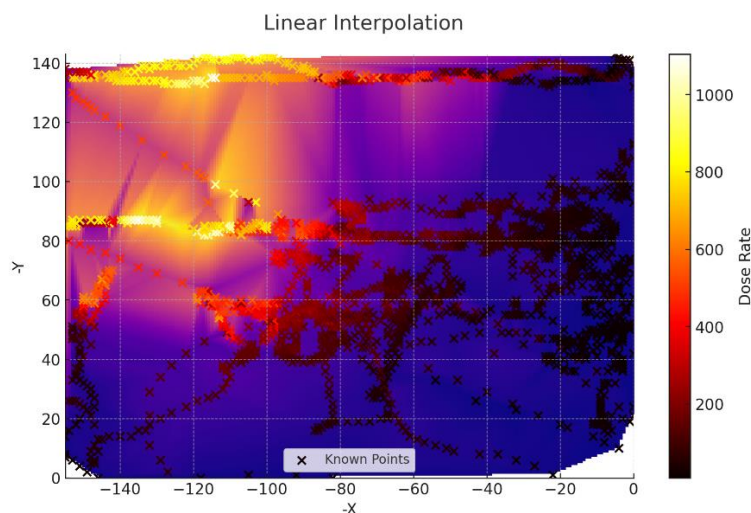


Рисунок 3 – Результати інтерполяції зібраних даних

Висновки. Розроблена роботизована система радіаційної розвідки на базі малогабаритних дронів продемонструвала практичну ефективність для оперативного обстеження важкодоступних та потенційно небезпечних ділянок інфраструктури АЕС. Проведене картографування зовнішньої обшивки НБК після удару БПЛА підтвердило можливість швидкого отримання просторово прив'язаних даних про рівні гамма-випромінювання та їх подальшої інтерполяції для оцінки дозових навантажень на персонал. Використання недорогих платформ і доступних детекторів робить систему придатною для масового застосування та інтеграції в існуючі мережі СРК та АСКРО, розширюючи їх функціональні можливості та підвищуючи достовірність радіаційного моніторингу в умовах аварійних ситуацій.

Перелік посилань:

1. Barbashev S., Prister B. Автоматизовані системи контролю радіаційної обстановки. *Nuclear and Radiation Safety*. 2013. № 1(57). С. 41–47. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2013.1\(57\).08](https://doi.org/10.32918/nrs.2013.1(57).08) (дата звернення: 15.03.2026).
2. Барабашев С. Система комплексного радіоекологічного моніторингу районів розташування АЕС України : дис. канд. техн. наук. Одеса, 2009. 394 с.
3. Multi-Robot Radiation Reconnaissance in the Chornobyl NPP Exclusion Zone / M. Saveliev та ін. *Nuclear and Radiation Safety*. 2024. № 4(104). С. 41–49. URL: [https://doi.org/10.32918/nrs.2024.4\(104\).05](https://doi.org/10.32918/nrs.2024.4(104).05) (дата звернення: 15.03.2026).

СЕКЦІЯ № 3

**Теплогідравлічні
процеси в тепло- і
парогенеруючих
установках**

¹ Аспірант 3 курсу Половинкін К. О.

¹ Проф., д.т.н. Сорокова Н. М.

https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ru&user=6iPYO_sAAAAJ&view_op=list_works&sortby=pubdate

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПЕРЕХІДНИХ ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ СИСТЕМ СКЛАДНОЇ КОНСТРУКЦІЇ ЗА ДІЇ НЕСТАЦІОНАРНИХ ПРОМЕНЕВИХ ТЕПЛОВИХ ПОТОКІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення допустимого теплового стану є ключовою умовою надійної роботи систем складної конструкції, що функціонують за умов дії нестационарних променевих теплових потоків і змінних внутрішніх теплових навантажень. Для таких систем характерні циклічні процеси нагрівання та охолодження, формування температурних коливань і локальних пікових значень температури, які часто визначають допустимі режими експлуатації, вимоги до термостабілізації та конструктивні обмеження. У практиці теплотехнічних розрахунків застосування стаціонарних або усереднених підходів без урахування перехідних процесів може призводити до недооцінки максимальних температур і теплових запасів, що підвищує ризик локальних перегрівів. Це зумовлює актуальність використання чисельного моделювання у нестационарній постановці для аналізу теплового стану систем складної компоновки.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних дослідженнях теплових режимів інженерних систем широко застосовуються чисельні методи моделювання, які дозволяють враховувати складну геометрію конструкцій, поєднання променевого та кондуктивного теплообміну, а також змінність граничних умов у часі [1, 2]. Значна кількість робіт присвячена визначенню температурних рівнів і розподілів у системах із циклічним тепловим навантаженням, однак у багатьох випадках недостатньо уваги приділяється інтерпретації перехідних процесів, аналізу амплітуд температурних коливань і критеріям встановлення квазістаціонарного режиму для систем складної конструкції. Це обмежує можливості інженерної оцінки пікових температур і коректного вибору заходів термостабілізації.

Формулювання мети. Метою роботи є чисельне моделювання перехідних теплових режимів системи складної конструкції за умов дії нестационарних променевих теплових потоків і змінних внутрішніх теплових навантажень з подальшою оцінкою процесу встановлення квазістаціонарного теплового режиму, характеристик температурних коливань і пікових температур ключових елементів системи.

Короткий опис використаних методів. Чисельне моделювання виконано в нестационарній постановці з використанням вузлового підходу, що дозволяє враховувати теплові зв'язки між елементами конструкції, термооптичні властивості зовнішніх поверхонь і часову змінність граничних умов. Внутрішні теплові навантаження задавалися у вигляді часових профілів тепловиділення, які відповідають змінним режимам роботи окремих елементів системи. Для зменшення обчислювальної складності застосовано спрощене подання окремих компонентів зі збереженням їх теплової інерційності та основних теплових зв'язків. Інженерна схема та компоновка системи, що використовувалася при побудові теплової моделі, наведена на рис. 1.

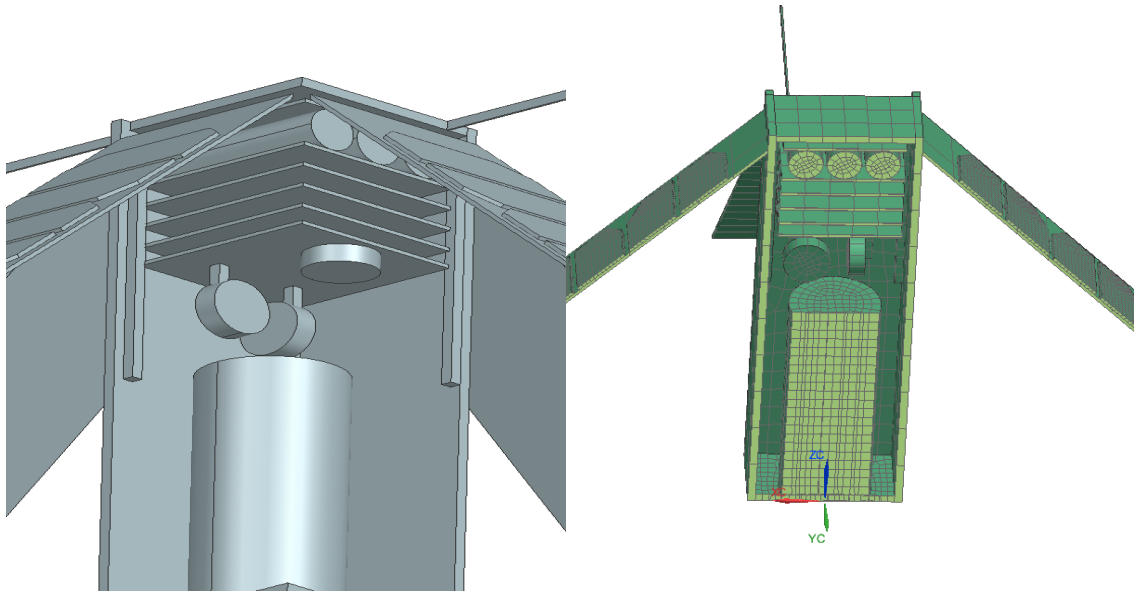


Рисунок 1 – Спрощена модель (зліва) та вузлова дискретизація (справа) теплової моделі PolyITAN-3-PUT

Основні отримані результати. За результатами чисельного моделювання отримано часові залежності температур ключових елементів системи та просторові розподіли температур на зовнішніх поверхнях. Аналіз просторового температурного поля у репрезентативний момент циклу (рис. 2) показав виражену нерівномірність нагрівання за дії променевого теплового впливу та дозволив ідентифікувати локальні зони підвищених температур, що є критичними з точки зору теплової надійності.

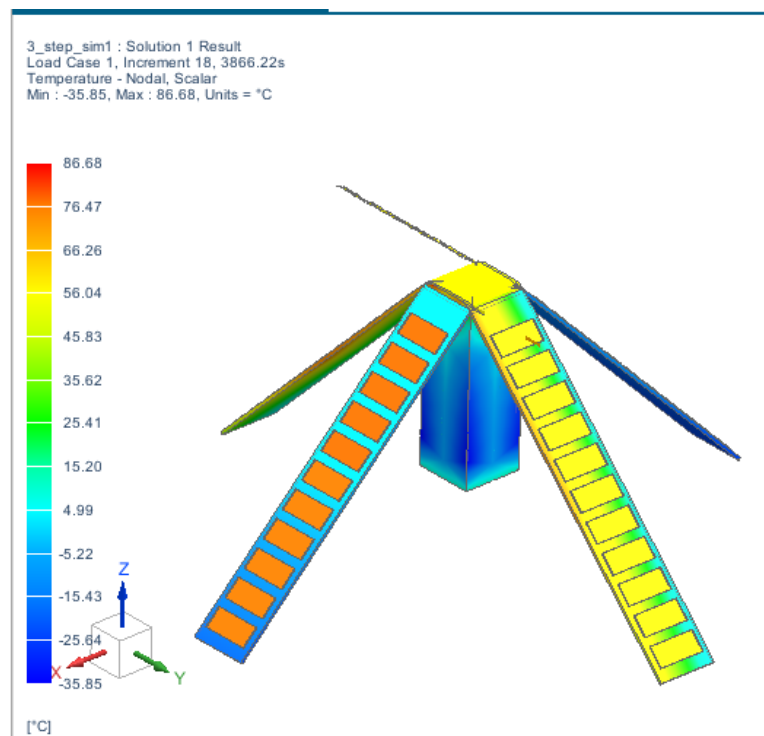


Рисунок 2 – Розподіл температур на зовнішніх поверхнях конструкції PolyITAN-3-PUT для репрезентативного моменту орбітального циклу. Діапазон температур за результатами розрахунку: від -35,85 °C до 86,68 °C

Часові залежності температури елементів з активним тепловиділенням характеризуються циклічним характером, обумовленим чергуванням фаз підвищеного та зниженого навантаження. Як приклад на рис. 3 наведено часову залежність температури елемента з імпульсним тепловиділенням. Аналіз показав наявність виражених температурних піків, асиметрію процесів нагрівання й охолодження та відсутність довготривалого дрейфу середнього рівня температури, що свідчить про встановлення квазістаціонарного теплового режиму.

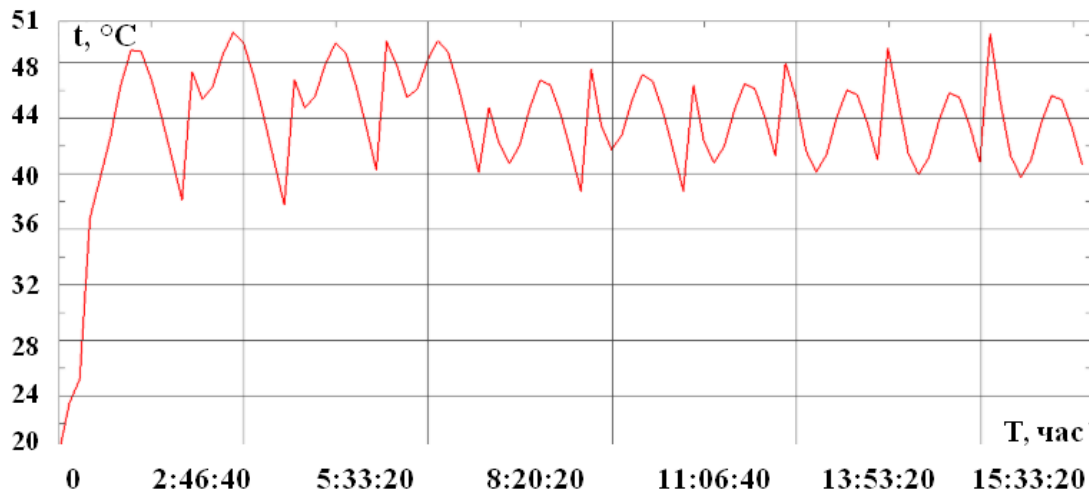


Рисунок 3 – Часова залежність температури процесора при змінних режимах навантаження

Висновки. У роботі виконано чисельне моделювання перехідних теплових режимів системи складної конструкції в умовах дії нестационарних променевих теплових потоків і змінних внутрішніх теплових навантажень. Показано процес встановлення квазістаціонарного теплового режиму та визначено, що пікові значення температури й амплітуди температурних коливань є ключовими інженерними показниками теплової стабільності систем з локальними джерелами тепла. Наукова новизна роботи полягає в узагальненні підходу до інтерпретації результатів нестационарного чисельного моделювання через аналіз повторюваності температурних циклів і пікових температур. Отримані результати можуть бути використані при проєктуванні та оптимізації систем термостабілізації технічних об'єктів і при аналізі теплових режимів систем складної конфігурації, що працюють у нестационарних умовах.

Перелік посилань:

1. Gilmore D. G. Spacecraft Thermal Control Handbook. Vol. I: Fundamental Technologies. USA : The Aerospace Press, 2002. 872 p.
2. Liles K., Gilmore D., Mesmer G. NASA Passive Thermal Control Engineering Guidebook. USA : NASA Goddard Space Flight Center, 2023.
3. National Aeronautics and Space Administration. General Environmental Verification Standard (GEVS) for GSFC Flight Programs and Projects. GSFC-STD-7000B. USA : NASA Goddard Space Flight Center, 2021.
4. Zavadzka Ye. S., Rassamakin B. M., Rogachov V. A., Khairnasov S. M., Khominich V. I. Експериментальне моделювання теплових режимів наносупутника. Технологія і конструювання в електронній апаратурі. 2013. № 4. С. 27–30.

¹ Аспірант 2 курсу Коваль С. О.¹ Ст.н.спів., д.т.н. Хайрнасов С. М.¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ФОРМУВАННЯ ВЕНТИЛЬОВАНОЇ КАВЕРНИ ПРИ ТУРБУЛЕНТНОМУ РЕЖИМІ ОБТІКАННЯ ДИСКОВОГО КАВІТАТОРА

Постановка проблеми та її актуальність. Зниження гідравлічного опору і підвищення енергоефективності є ключовими завданнями у розвитку сучасних енергетичних систем. Особливо актуальними ці питання є для рухомих підводних пристроїв, де високі втрати на опір суттєво впливають на ефективність роботи. Одним із найбільш перспективних методів вирішення цієї проблеми є застосування вимушеної кавітації. Окрім суттєвого зменшення гідродинамічного опору, цей підхід дозволяє мінімізувати кавітаційну ерозію поверхонь, що дозволяє суттєво подовжити термін служби обладнання [1]. Для дослідження цих процесів ефективно застосовується метод об'ємної рідини (Volume of Fluid, VOF), який надійно відслідковує динаміку вільних меж розділу фаз [2]. Замикання системи рівнянь при цьому найчастіше здійснюється за допомогою однорівнянневої моделі турбулентності Spalart-Allmaras, яка є високоефективною для моделювання аеродинамічних та гідродинамічних течій [3].

Аналіз останніх досліджень. Результати сучасних досліджень підтверджують ефективність використання вимушеної кавітації. Зокрема, доведено, що використання систем на стисненому повітрі та суперкавітації дозволяє суттєво зменшити опір підводних апаратів [4]. Чисельне моделювання таких течій активно розвивається за допомогою сучасних методів, які детально досліджують взаємодію фаз у процесі кавітації (перехід від природної до вентильованої) [5], а також вплив вільної поверхні води на форму вентильованої каверни [6].

Формулювання мети. Основною метою роботи є проведення чисельного моделювання процесу вимушеної кавітації навколо дискового кавітатора у програмному середовищі OpenFOAM [7] для визначення оптимальних параметрів вентиляції та аналізу механізмів зниження гідравлічного опору.

Основна частина. Для чисельного моделювання течії нестисливого двофазного потоку (вода–повітря) використано модель incompressibleVoF у вісі-симетричній постановці без урахування сили тяжіння. Метод VOF базується на розв'язанні рівнянь Нав'є-Стокса із врахуванням індикаторної функції фазової частки α , де $\alpha = 1$ відповідає воді, а $\alpha = 0$ – повітряю.

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho_{eff}\vec{U})}{\partial t} + \vec{U}\vec{\nabla}(\rho_{eff}\vec{U}) &= -\vec{\nabla}p + \vec{\nabla}(\tau_{ij}) + \sigma\kappa(\vec{\nabla}\alpha) \\ \vec{\nabla} \cdot \vec{U} &= 0 \\ \frac{\partial\alpha}{\partial t} + \vec{\nabla}(\alpha\vec{U}) + \vec{\nabla}(\vec{U}_c\alpha(1-\alpha)) &= 0 \end{aligned} \quad (1)$$

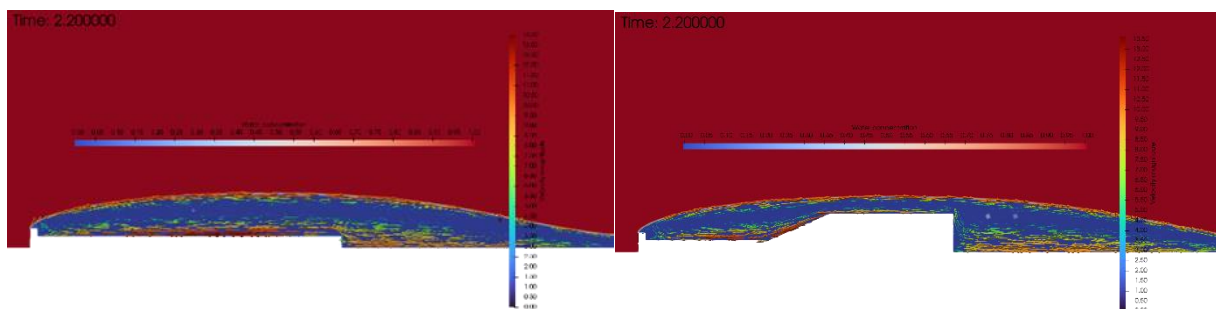


Рисунок 1 – Поле концентрації α та векторне поле швидкості навколо кавітатора в процесі формування порожнини.

Розрахунок виконувався у нестационарному режимі (швидкість набігаючого потоку води $U_\infty = 10$ м/с, швидкість вдуву повітря $U_a = 6$ м/с) до досягнення квазі-стационарного стану течії. Результати розрахунку поля об'ємної частки води та векторного поля швидкостей свідчать про те, що безпосередньо за кавітатором утворюється відривна зона суміші води і повітря. У межах газової порожнини швидкість рідини практично нульова. Стаціонарна порожнина встановлюється приблизно за $t = 1,3$ с.

Зважаючи на вісі-симетричність течії, поверхню розділу фаз було апроксимовано двовимірним еліпсом, який у 3D-вимірі утворює еліпсоїд.

$$\frac{(x-x_0)^2}{a^2} + \frac{(y-y_0)^2}{b^2} + \frac{(z-z_0)^2}{c^2} = 1. \quad (2)$$

Встановлено, що максимальна довжина стабільної частини порожнини складає $2c = 340$ мм, максимальний радіус $a = 38$ мм, а максимальне видовження $\gamma = \frac{2c}{L_{body}} \approx 1,66$.

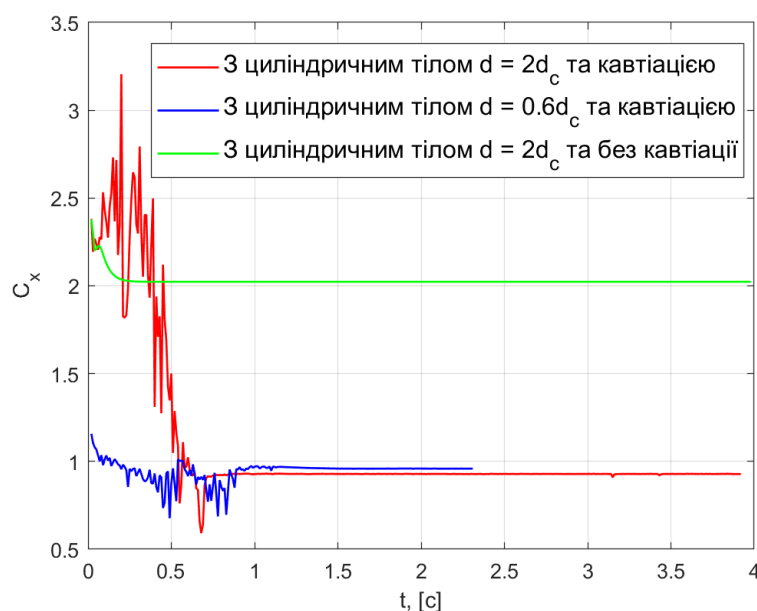


Рисунок 2 – Миттєві значення коефіцієнта опору C_x для тіл різної конфігурації.

Аналіз полів тиску показав, що всередині вентиляваної порожнини тиск розподілений відносно рівномірно і підтримується на зниженому рівні (близькому до тиску газу, що подається). Завдяки цьому значна частина поверхні тіла виявляється ізольованою від рідини. Як наслідок, коефіцієнт гідродинамічного опору C_x , для циліндричного тіла

діаметром $d = 2d_c$ при наявності порожнини становить $C_x = 0,9285$, що приблизно на 50 % менше порівняно з обтіканням цього ж тіла лише водою без вентиляції ($C_x = 2,0231$).

Висновки. Проведене чисельне моделювання показало, що дисковий кавітатор при заданій витраті газу генерує стійку зону відриву, в якій вода заміщується газом. Формується стабільна газова порожнина еліпсоїдальної форми, максимальна ширина якої більш ніж у 3 рази перевищує діаметр кавітатора. Примусова вентиляція дозволяє ізолювати тіло від води, що знижує гідродинамічний опір приблизно на 50 %. Це підтверджує доцільність застосування повітряних каверн як ефективного засобу зменшення опору для рухомих підводних апаратів

Перелік посилань:

1. Xu Y., Zhang M., Li H. Experimental research on the effect of air concentration on cavitation erosion development // *Ultrasonics Sonochemistry*. – 2021. – Vol. 72.
2. Hirt C. W., Nichols B. D. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries // *J. Comput. Phys.* – 1981. – Vol. 39, No. 1. – P. 201–225.
3. Spalart P. R., Allmaras S. R. A one-equation turbulence model for aerodynamic flows // *Recherche Aerospatiale*. – 1994. – No. 1. – P. 5–21.
4. He Y., Zhang H. Analysis of characteristics of a compressed air power system generating supercavitation drag reduction for underwater vehicles // *Energies*. – 2024. – Vol. 17, No. 4. – P. 1735.
5. Malekshah E. H., Wróblewski W., Majkut M. Investigation on natural to ventilated cavitation considering the air-vapor interactions by Merging theory... // *Int. Journal of Heat and Mass Transfer*. – 2024. – Vol. 220. – 124968.
6. Zhi Y., Zhan J., Huang R., Wang Y., Li N. Numerical Investigation on the Ventilated Supercavity around a Body under Free Surface Effect // *J. Mar. Sci. Eng.* – 2023. – Vol. 11. – P. 912.
7. Koval S. O., Voropaiev G. O., Dimitrieva N. F. Calculation of a Ventilated Cavity in OpenFOAM // *In Proc. Topical Problems of Fluid Mechanics* – 2023, Prague. – P. 88–95.

¹ Аспірант 3 курсу Новосад Ю. І.

¹ Доц., к.т.н. Воробйов М. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=mxNIgEoAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ПІДХІД У ВИЗНАЧЕННІ ЕКОНОМІЇ ПРИРОДНОГО ГАЗУ ПРИ ЙОГО ЗАМІЩЕННІ НИЗЬКОКАЛОРІЙНИМ ГАЗОВИМ ПАЛИВОМ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах декарбонізації промисловості та зростання вартості природного газу актуальним є його часткове або повне заміщення технологічними та альтернативними газовими паливами. Однак суттєвим обмеженням такого заміщення є їх порівняно невисокі енергетичні характеристики, зокрема нижча теплота згоряння та знижена теоретична температура горіння. У високотемпературних теплотехнологічних агрегатах (зокрема, нагрівальних печах металургійного виробництва з робочими температурами 1100–1300 °С) температурний потенціал низькокалорійних газів часто є співмірним із технологічною температурою процесу, що призводить до зменшення температурного напору теплопередачі та ускладнює забезпечення стабільної роботи агрегатів [1]. Водночас існують технічні рішення, здатні компенсувати зазначені обмеження, зокрема високотемпературний підігрів компонентів горіння, утилізація теплоти відхідних газів, збагачення паливної суміші більш калорійними газами або підвищення концентрації кисню в окиснювачі. У зв'язку з цим виникає науково-практична задача кількісної оцінки можливості використання альтернативних газових палив у високотемпературних процесах з урахуванням їх енергетичного потенціалу, температурних обмежень та умов забезпечення необхідного теплового режиму агрегатів..

Аналіз останніх досліджень. Особливого поширення набули водневмісткі енергоносії [2] та альтернативні газові палива [3], що зумовлено зростанням вартості традиційних вуглеводнів і необхідністю зменшення залежності від природного газу. Паралельно розвиваються нові підходи до організації процесів горіння, зокрема впроваджуються киснево-паливні технології, спеціальні режими для когенераційних систем, що спрямовані на підвищення енергетичної та екологічної ефективності. У наукових працях українських і зарубіжних дослідників розглянуто питання заміщення природного газу синтез-газом [4], біогазом [5] та іншими технологічними газами. Водночас більшість досліджень мають прикладний характер і орієнтовані на окремі установки або конкретні умови експлуатації, що зумовлює потребу у розробленні узагальненої методології оцінювання енергетичної доцільності заміщення палив у високотемпературних агрегатах.

Формулювання мети. Метою роботи є оцінка можливої економії природного газу при його заміщенні альтернативними низькокалорійними газовими паливами з урахуванням їх характеристик горіння, енергетичного потенціалу та технологічних параметрів роботи паливо-використовуючих установок.

Основна частина. Розглядаючи проблему ефективності економії природного газу шляхом його часткового або повного заміщення альтернативними низькокалорійними газовими паливами, такими як біогаз, синтез-газ, а також інші технологічні гази промислового походження важливим є коректно оцінити реальну економію природного газу в залежності від параметрів роботи обладнання. Науково-обґрунтований підхід до оцінки реальної економії природного газу при переході на змішані паливні суміші має враховувати не лише теплоту згоряння, а і термодинамічні та технологічні особливості процесу горіння.

Традиційний метод оцінки економії палива [4], заснований на балансі нижчої теплоти згоряння (НТЗ) (див рівняння (1) та (2)):

$$\begin{cases} B'_{\text{нал},V} \cdot Q'_{\text{н},V} = B''_{\text{нал},V} \cdot Q''_{\text{н},V}; \\ B'_{\text{нал},m} \cdot Q'_{\text{н},m} = B''_{\text{нал},m} \cdot Q''_{\text{нал},m}; \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} \frac{B'_{\text{нал},V}}{B''_{\text{нал},V}} = \frac{Q''_{\text{н},V}}{Q'_{\text{н},V}}; \\ \frac{B'_{\text{нал},V}}{B''_{\text{нал},V}} = \frac{B'_{\text{нал},m}}{B''_{\text{нал},m}} \cdot \frac{M''_{\text{нал}}}{M'_{\text{нал}}}. \end{cases} \quad (2)$$

Традиційний підхід не враховує зміни корисно використаної теплової енергії в залежності від складу паливної суміші та робочих умов енергетичної установки. Це призводить до завищених оцінок ефективності заміщення. Запропонований підхід базується на принципах рівноважної термодинаміки та враховує другий закон термодинаміки, зокрема, збереження корисно засвоєної теплоти безпосередньо в топковій камері.

$$\begin{cases} Q'_{\text{вик.}} = Q''_{\text{вик.}} & \text{або} \\ B'_{\text{нал},m} (1 + \lambda' \cdot \Omega') \cdot (I'_{\text{н.з.},T} - I'_{\text{н.з.},\text{вих.}}) = B''_{\text{нал},m} (1 + \lambda'' \cdot \Omega'') \cdot (I''_{\text{н.з.},T} - I''_{\text{н.з.},\text{вих.}}). \end{cases} \quad (3)$$

Такий підхід (3) дозволяє кількісно оцінити придатність альтернативних газових палив для використання в конкретних технологічних умовах, зокрема в умовах високотемпературних процесів.

Ключовим результатом дослідження є встановлення того, що реальна економія природного газу при його заміщенні альтернативними паливами є значно нижчою, ніж передбачає традиційний метод, це можна побачити на рис. 1, де наведено економію природного газу при заміні його біогазом. Більше того, із зростанням частки низькокалорійного газу в суміші та підвищенням робочої температури (наприклад, від 800 до 1200 °С) економія природного газу зменшується ще більше. Це пов'язано з тим, що продукти згоряння альтернативних палив мають інший склад, ентальпію та теплоємність, що впливає на ефективність теплопередачі та загальну енергетичну продуктивність системи.

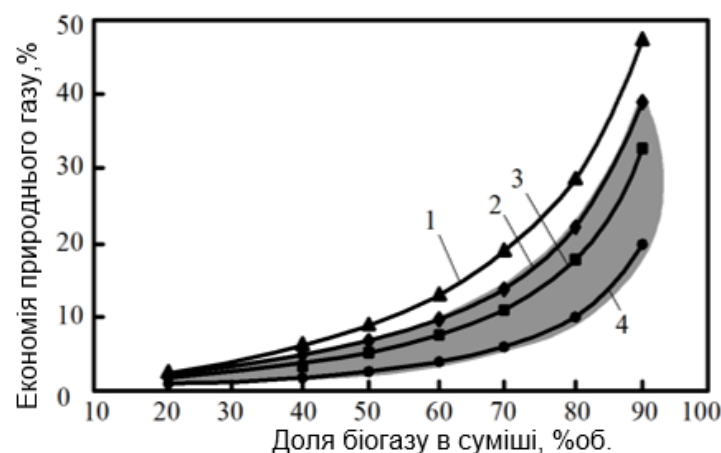


Рисунок 1 – Економія природного газу при його заміні біогазом залежно від частки газу в суміші з природним газом: 1 – існуюча (традиційна балансова) методика заміщення палива [4]; 2–4 – запропонована методика заміщення палива (з урахуванням збереження корисно сприйнятого теплового потоку). Технологічна робоча температура $t_{\text{роб}}$, °С: 2 – 800; 3 – 1000; 4 – 1200. Коефіцієнт надлишку повітря $\lambda = 1,1$. Початкові умови: температура «холодного» палива та повітря $t_{\text{нал.}} = t_{\text{нов.}} = 25$ °С.

Запропонована методика може бути застосована до будь-яких паливо-окиснювальних сумішей і дозволяє враховувати температурні та енергетичні обмеження, що є критичним для високотемпературних теплотехнологічних процесів. Таким чином, підхід, є більш точним і реалістичним інструментом для планування енергоефективних заходів з диверсифікації паливного балансу, зокрема в умовах децентралізованої енергетики та сталого розвитку.

Висновки. Підсумовуючи, хочемо зазначити що, запропонований підхід є термодинамічно-обґрунтованим та враховує енергетичний потенціал процесу до оцінки економії природного газу при його заміщенні альтернативними низькокалорійними газами (біогаз, синтез-газ із соломи чи рослинних олій). На відміну від традиційного методу, що ґрунтується лише на балансі нижчої теплоти згоряння, враховано збереження корисно засвоєної теплової енергії всередині топкової камери, що відповідає другому закону термодинаміки. Розрахунки показали, що реальна економія природного газу значно нижча, ніж за класичним підходом, і зменшується зі зростанням долі альтернативного газового палива та підвищення робочої температури.

Перелік посилань:

1. Hakan Gür C., Pan J. (2008) Handbook of Thermal Process Modeling of Steels. CRC Press, 180 p. / ISBN 978-0-8493-5019-1.
2. Huber A. (2020). Impact of hydrogen and mixtures of hydrogen and natural gas on forced draught burners for gaseous fuels. Walter Dreizler GmbH, A 1434 EN, 11 p. URL: <https://www.dreizler.com/wp-content/uploads/2021/02/A-1434-EN-1.20-Impact-of-hydrogen-on-burners.pdf>.
3. Assis A. C.; Panizio R.; Calado L.; Brito P.; Mourão P.(2023) Use of By-Products from Gasification and Carbonization from Polymeric Residues and Biomass for Application in Liquid Phase Adsorption. Environments , 10, 74. <https://doi.org/10.3390/environments10050074>.
4. Карп І. М., Никитін Є. Є, П'яних К. Є., П'яних К. К. (2019) Заміщення природного газу альтернативними паливами. НАН України. Ін-т газу НАН України. – Київ: Наук. думка. – 231 с.
5. Блюм Я. Б., Гелетуша Г. Г., Григорюк І. П. та ін. (2010) Новітні технології біоенергоконверсії. Аграр Медіа Груп. – 326 с.

¹ Магістрант 1 курсу Волошин В. С.¹ Доц., к.т.н. Новаківський Є. В.<https://scholar.google.com/citations?user=ovbouE8AAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДОЛОГІЧНІ АСПЕКТИ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ РОБОТИ ТОПКИ КОТЛА НА БІОМАСІ ПРИ ЗМІННІЙ ВОЛОГОСТІ ПАЛИВА

Постановка проблеми та її актуальність. Зі зміщенням української енергетики на альтернативні види палива, спалювання біомаси на колосниковій решітці набуває все більшого поширення. Проте, у реальних умовах експлуатації вологість біомаси є нестабільною величиною, що суттєво впливає на теплотехнічні процеси в топковому об'ємі. Збільшення вологості біомаси знижує температуру в зоні горіння, змінює розташування активної зони горіння та збільшує ймовірність хімічного та механічного недопалу. Тому актуальним є пошук шляхів стабілізації процесу горіння шляхом режимної оптимізації без втручання в конструкцію агрегату.

Аналіз останніх досліджень. Для аналізу складних аеродинамічних та теплообмінних процесів у сучасній теплоенергетиці активно застосовуються методи обчислювальної гідродинаміки CFD-моделювання. Зміна співвідношення первинного та вторинного дуттьового повітря є одним із методів впливу на температурні поля та повноту згоряння при змінних характеристиках палива. Проте більшість досліджень описують абстрактні або спрощені моделі, які не враховують специфіку розподілу повітря через систему дросельних заслінок у реальних промислових установках.

Формулювання мети. Метою даної роботи є теоретичне обґрунтування та розробка методології створення 3D-моделі топки котла для подальшого дослідження впливу вологості біомаси на процеси горіння в середовищі обчислювального комплексу ANSYS.

Основна частина. З термодинамічної точки зору, збільшення частки вологи в паливі призводить до різкого зниження нижчої теплоти згоряння робочої маси. Для задання коректних граничних умов при моделюванні нестандартних режимів необхідно перераховувати енергетичну цінність палива. Згідно з класичних методів, перерахунок нижчої теплоти згоряння з відомої початкової вологості на нову розрахункову вологість здійснюється за емпіричним рівнянням [1]:

$$Q_{\text{н2}}^{\text{р}} = (Q_{\text{н1}}^{\text{р}} + 24,4 \cdot W_1^{\text{р}}) \cdot \frac{100 - W_2^{\text{р}}}{100 - W_1^{\text{р}}} - 24,4 \cdot W_2^{\text{р}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{н2}}^{\text{р}}, Q_{\text{н1}}^{\text{р}}$ – нижча робоча теплота згоряння палива при розрахунковій (кінцевій) та початковій вологості відповідно, кДж/кг; $W_2^{\text{р}}, W_1^{\text{р}}$ – розрахункова та початкова відносна вологість робочої маси палива, %/

Фізика процесу спалювання біомаси на колосниковій решітці включає кілька послідовних стадій: підсушування, вихід та займання летких речовин, а також горіння коксового залишку. Підвищена вологість затягує стадію підсушування, що призводить до зсуву зони активного горіння вглиб решітки та зниження температури в ядрі факела.

Зниження температурного фону безпосередньо впливає на кінетику хімічних реакцій у надшаровому (топковому) просторі. Для повного вигорання летких речовин та уникнення емісії чадного газу (СО) критично важливим є час перебування газів у високотемпературній зоні. У базовій геометричній моделі топки при падінні температури швидкість реакцій окислення сповільнюється. Відповідно, наявного об'єму та стандартного часу перебування газів може виявитися недостатньо без інтенсифікації турбулентного перемішування.

Саме тому компенсація негативного впливу вологи має здійснюватися за рахунок керування аеродинамічним режимом – шляхом зміни співвідношення та швидкостей подачі первинного і вторинного дуттьового повітря. Підготовка до CFD-розрахунку включає створення твердотільної моделі внутрішнього газового тракту топки в SolidWorks з подальшим імпортом геометрії до ANSYS Fluent. Побудова адекватної математичної моделі вимагає врахування особливостей процесу горіння (табл. 1).

Таблиця 1 – Основні виклики при CFD-моделюванні топки на біомасі [2, 3]

Назва проблеми	Сутність виклику	Плановані шляхи вирішення
Адаптація CAD-геометрії	Наявність дрібних конструктивних елементів, що перевантажують розрахункову сітку.	Спрощення 3D-моделі: видалення деталей, які суттєво не впливають на аеродинаміку газового тракту.
Моделювання шару палива	Складність прямого прорахунку горіння щільного твердого шару біомаси на колосниковій решітці.	Заміна фізичного шару еквівалентними джерелами маси і тепла на основі попередніх теплових балансів.
Оптимізація розрахункової сітки	Потреба у високій точності біля сопел дуття без критичного збільшення часу комп'ютерного розрахунку.	Побудова гібридної сітки з локальним згущенням (ущільненням) виключно у зонах активного горіння та змішування потоків.
Турбулентність та хімія горіння	Складність опису реакцій згоряння летких речовин у середовищі з високою концентрацією водяної пари.	Використання адаптованих моделей турбулентного перемішування.

Після налаштування сіткової моделі планується проведення серії віртуальних експериментів. Змінюючи граничні умови щодо вологості палива в діапазоні від 20% до 50% буде досліджено вплив перерозподілу дуття, що дозволить стабілізувати температурні поля та мінімізувати хімічний недопал незалежно від якості біомаси.

Висновки. На основі проведеного теоретичного аналізу встановлено, що коливання вологості біомаси критично впливають на температурний режим та повноту згоряння в топках з колосниковою решіткою. Показано, що компенсація цих негативних ефектів без зміни конструкції котла можлива за рахунок динамічного перерозподілу первинного та вторинного дуттьового повітря. Для детального дослідження цього процесу обґрунтовано доцільність застосування методів обчислювальної гідродинаміки (CFD) у середовищі комплексу ANSYS. Визначено основні методологічні етапи та інженерні виклики розробки адекватної математичної моделі, від адаптації CAD-геометрії до налаштування еквівалентних граничних умов для шару палива. Очікується, що реалізація запропонованої методології дозволить у майбутньому отримати достовірні дані для розробки оптимізаційних режимних карт керування котельними установками.

Перелік посилань:

1. Ткаченко С. Й., Степанов Д. В., Боднар Л. А. Котельні установки : навч. посіб. [Електронний ресурс] / Вінницький нац. техн. ун-т. – Вінниця : ВНТУ, 2016. – 185 с. – Режим доступу: <https://ctor.com.ua/wp-content/uploads/2024/05/Електроний-підручник.pdf>. – Назва з екрана.
2. Yin C., Rosendahl L. A., Kær S. K. Grate-firing of biomass for heat and power production. Progress in Energy and Combustion Science. 2008. V. 34, № 6. P. 725–754.
3. Collazo J., Porteiro J., Patiño D., Granada E. Numerical simulation of a small-scale biomass boiler. Energy Conversion and Management. 2012. V. 64. P. 87–96.

¹ Бакалаврант 4 курсу Петрук А. І.

¹ Доц., к.т.н. Новаківський Є. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВІДВЕДЕННЯ ТЕПЛА ВІД БАСЕЙНУ ВИТРИМКИ АЕС

Постановка проблеми та її актуальність. Безпека атомних електростанцій (АЕС) залежить не лише від надійності реакторної установки, але й від стійкості систем проміжного зберігання відпрацьованого ядерного палива (ВЯП). Після вилучення з активної зони паливні збірки (ТВЗ) продовжують генерувати значну кількість залишкового тепловиділення за рахунок бета- та гамма-розпаду продуктів поділу та актиноїдів. Проблема полягає в тому, що на відміну від реактора, який можна заглушити, процес радіоактивного розпаду у ВЯП є некерованим і тривалим, що потребує безперервного охолодження протягом років.

Басейн витримки (БВ) відіграє роль критично важливого бар'єра, де водне середовище одночасно слугує теплоносієм, біологічним захистом та сповільнювачем нейтронів для забезпечення підкритичності. Актуальність дослідження зумовлена тим, що традиційні проєктні рішення покладаються переважно на активні системи охолодження, що живляться від зовнішніх мереж. Досвід важкої аварії на АЕС Фукусіма-Даїчі виявив критичну вразливість таких систем: при тривалому повному знеструмленні (Station Blackout) та відмові резервних дизель-генераторів втрата примусової циркуляції призводить до швидкого прогріву води, її закипання та випаровування. Подальше оголення палива ініціює незворотні деструктивні процеси, включаючи пароцирконієву реакцію з інтенсивним утворенням водню, що створює загрозу вибухового руйнування контейнменту та масштабного викиду радіонуклідів. У пост-фукусімський період постає гостра необхідність у перегляді стратегій тепловідведення, впровадженні пасивних систем та пошуку способів раціональної утилізації скидного тепла, що робить дану тематику пріоритетною для ядерної безпеки та енергоефективності.

Аналіз останніх досліджень. Вимоги до безпеки басейнів витримки безперервно еволюціонують. Фундаментальні міжнародні стандарти МАГАТЕ (SSR-4, SSG-15) та директиви WENRA деталізують застосування принципу глибокоешелонованого захисту до об'єктів зберігання ВЯП. У національному правовому полі України діють норми НП 306.2.141-2008 та ПНАЕ Г-5-006-87, які встановлюють вимоги до унеможливлення спорожнення БВ та визначають необхідну категорію сейсмостійкості обладнання. Сучасні наукові дослідження важких аварій активно використовують методи обчислювальної гідродинаміки (CFD, наприклад у середовищі ANSYS) для точного моделювання природної конвекції та фазових переходів у басейнах. Окрім питань безпеки, низка останніх праць присвячена оптимізації енергоспоживання АЕС, зокрема шляхом утилізації низькопотенційного тепла за допомогою абсорбційних теплових насосів.

Формулювання мети. Метою роботи є проведення комплексного експертного аналізу систем відведення тепла від басейнів витримки АЕС (на прикладі реакторів типу ВВЕР-1000), що включає оцінку динаміки залишкового тепловиділення, розгляд теплогідрравлічних процесів в умовах аварійного знеструмлення, а також визначення інноваційних шляхів підвищення енергоефективності систем охолодження за рахунок рекуперації тепла.

Основна частина. Фундаментальною основою для проєктування систем охолодження БВ є розрахунок потужності джерела тепла. Для реакторів типу ВВЕР-1000 теплове навантаження стандартної вивантаженої партії палива експоненційно спадає від 1000 кВт у момент зупинки до приблизно 10,6 кВт після 50 років зберігання. Для аналітичного прогнозування залишкового тепловиділення на етапі оцінок застосовується формула Вея-Вігнера:

$$P_d(t) = 0.0622 \cdot P_o \cdot [t^{-0.2} - (t_0 + t)^{-0.2}],$$

де $P_d(t)$ – поточна потужність залишкового тепловиділення, P_o – номінальна теплова потужність до зупинки, t_0 – час роботи реактора, t – час витримки.

Специфікою реакторів ВВЕР-1000 є розміщення басейну витримки безпосередньо всередині герметичної захисної оболонки (контейнменту). Штатна система охолодження складається з трьох незалежних каналів активного розхолодження (система TQ), кожен з яких включає циркуляційний насос, теплообмінник та систему іонообмінного очищення для підтримки сталого хімічного режиму (вміст борної кислоти близько 16 г/кг). Теплота від першого контуру БВ передається системі проміжного контуру охолодження відповідальних споживачів.

Втрата примусової циркуляції внаслідок знеструмлення ініціює перехід до режиму природної конвекції. Результати CFD-моделювання аварій доводять, що теплової інерції водного об'єму (близько 1700 м³ у номінальному режимі) достатньо для стримування кризи: вода досягає температури об'ємного кипіння орієнтовно через 4,44 години. Процес випаровування веде до поступового зниження рівня теплоносія. Критичною точкою є оголення активної частини ТВЗ, що провокує екзотермічну пароцирконієву реакцію.

Виділення водню та зростання тиску в контейнменті загрожують цілісності захисних бар'єрів. Однак часовий запас у кілька діб до критичного зростання тиску є достатнім для реалізації стратегій керування аваріями (FLEX), що передбачають підключення мобільних дизель-насосних установок для підживлення басейну борованим розчином.

Враховуючи експоненційне падіння тепловиділення, тривала експлуатація потужних циркуляційних насосів на фіксованій номінальній потужності є економічно неефективною. Системний підхід до оптимізації передбачає впровадження абсорбційних бромистолітєвих теплових насосів (АБТН). Використання АБТН дозволяє корисно утилізувати низькопотенційне скидне тепло басейну витримки (35–50°C), трансформуючи його для потреб опалення промислового майданчика або підігріву хімічно знесоленої води. Інтеграція таких рекупераційних систем здатна суттєво підвищити енергоефективність блоку (до 8,7%), демонструючи прийнятний термін окупності інвестицій на рівні 19,8 років за методом дисконтованих грошових потоків.

Висновки. Системи відведення тепла від басейнів витримки потребують наукоємного комплексного підходу, який поєднує нейтронно-фізичне обґрунтування потужності тепловиділення з тривимірним CFD-моделюванням кризових станів. Традиційна парадигма виключно активного, енергозатратного охолодження потребує модернізації. Впровадження засобів мобільного підживлення для управління аваріями, а також застосування інноваційних абсорбційних теплових насосів для рекуперації тепла є безальтернативним напрямком розвитку, що одночасно підвищує економічну рентабельність та рівень глибокоешелонованого захисту сучасних АЕС у пост-Фукусімський період.

Перелік посилань

1. Загальні положення безпеки атомних станцій : НП 306.2.141-2008 / затв. наказ. Держатомрегулювання України від 19.11.2007 № 162. Київ, 2008. 48 с.
2. Safety of Nuclear Fuel Cycle Facilities : IAEA Safety Standards Series No. SSR-4. Vienna : IAEA, 2017. 135 p.
3. Storage of Spent Nuclear Fuel : IAEA Safety Standards Series No. SSG-15 (Rev. 1). Vienna : IAEA, 2020. 134 p.
4. WENRA Safety Reference Levels for Existing Reactors. WENRA, 2020. 135 p.

¹ Аспірант 1 курсу Гапоненц Є. Р.¹ Доц., к.т.н. Новаківський Є. В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

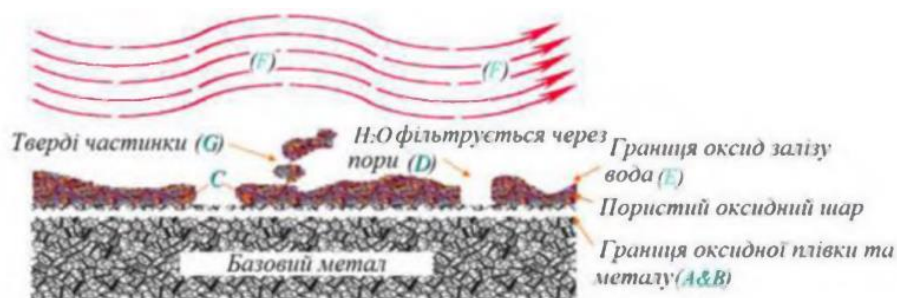
ПІДВИЩЕННЯ ДОВГОВІЧНОСТІ ТРУБОПРОВОДІВ ДРУГОГО КОНТУРУ АТОМНИХ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЙ ШЛЯХОМ ЗМЕНШЕННЯ ЕРОЗІЙНО- КОРОЗИЙНИХ ПРОЦЕСІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Ерозійно-корозійне зношування (ЕКЗ) обладнання є поширеною проблемою промислових підприємств. ЕКЗ матеріалів є дороговартісною проблемою у численних промислових процесах. Особливо прискіпливо слід ставитися до характеристик трубопроводів у такій відповідальній сфері як атомна енергетика, адже від надійності трубопроводів безпосередньо залежить безпека самої ядерної установки і, відповідно, населення та навколишнього середовища.

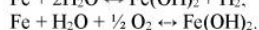
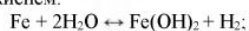
Аналіз останніх досліджень. Статистика причин аварій вказує на те, що частка причин аварійних ситуацій, які походять із другого контуру (ДК) АЕС, становить 27 % для багатоблокових аварій та 47 % - для одnobлокових аварій [1]. Аналіз аварійних випадків на блоках АЕС (Суррі-2, Мігама-3, Троян), які пов'язані з ДК, показує, що однією з основних причин їхнього виникнення є знос трубопроводів ДК внаслідок ЕКЗ.

Формулювання мети. Науково обґрунтувати та оцінити основні чинники ерозійно-корозійних процесів (ЕКП) у трубопроводах ДК АЕС; проаналізувати методи й технічні шляхи їх пригнічення, що базуються на регулюванні водно-хімічного режиму (концентрації розчиненого кисню, показника рН теплоносія тощо) з метою підвищення довговічності й надійності трубопровідних систем.

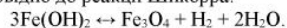
Основна частина. Процес ЕКЗ початково спричиняється корозією поверхні стінки трубопроводу, що послаблює поверхню металу, утворюючи оксидний шар. Оксидна плівка руйнується потоком середовища швидше, ніж чистий метал. Частинки зруйнованого оксидного шару, захоплені потоком середовища, можуть вдарятися об стінки трубопроводу нижче за потоком, прискорюючи руйнування оксидного шару в інших його місцях і таким чином прискорювати ЕКЗ. Наочно схема ЕКЗ наведена на рис. 1 [2].



A. Взаємодія заліза з водою та киснем:



B. Формування магнетиту відповідно до реакції Шикорра:



C. Продукти корозії, які утворилися в результаті реакцій A та B.

D. Продукти корозії розчиняються в порах оксидного шару.

E. Продукти корозії розчиняються на границі оксидна плівка-теплоносій (корозійне середовище).

F. Теплоносій забирає розчинені продукти корозії в потік за рахунок масообмінних процесів.

G. Під дією потоку відбувається ерозійне розмивання захисного шару.

Рисунок 1 – Схема ерозійно-корозійного зносу металу [2]

На українських АЕС трубопроводи ДК поділяють на 5 блоків за властивими їм процесами ЕКЗ [2]. I, II та III блоки – паропроводи ДК, різниця між якими полягає у ступені вологості робочої пари. Для I блоку (паропроводу свіжої пари) ЕКЗ відсутній через малий ступінь вологості ($<1\%$); II блок паропроводів працює з більш вологою парою ($1\text{--}2\%$), що призводить до краплинного ЕКЗ; III блок паропроводів працює з ще більш вологою парою (дренажі основного паропроводу, трубопроводи випару), тож до краплинного ЕКЗ додається ерозійно-корозійне розмивання (ЕКР). IV та V блоки – трубопроводи основного конденсату та живильної й продувної води ПГ відповідно. Для IV блоку властивими є ЕКР та кавітаційний ЕКЗ; для V блоку властиве ЕКР.

Фактори впливу на ЕКП у трубопроводах ДК АЕС можна умовно поділити на залежні від властивостей середовища (температура, концентрація розчиненого кисню чи твердих частинок, швидкість, показник рН) та залежні від трубопроводу (розміри, матеріал, конфігурація).

Зростання швидкості потоку середовища однозначно провокує прискорення ЕКЗ (рис. 2) [3]. Ріст температури, показника рН, концентрації розчиненого кисню має складний і несталий вплив на ЕКП. За сталої швидкості ріст температури до певного значення спричиняє прискорення ЕКП, а після – сповільнення [3]. Схожий характер впливу на ЕКП має і показник рН [3]. Особливу увагу слід приділити залежності швидкості ЕКЗ від концентрації розчиненого кисню. Із рис. 2 видно, що ріст концентрації розчиненого кисню в загальному випадку спричиняє сповільнення ЕКП і може доходити практично до нуля. Відповідне значення концентрації розчиненого кисню змінюється з температурою води: за $t_b = 140\text{ }^\circ\text{C}$ – $C^0_{O_2} = 50\text{--}55$ мкг/л [3]; при $t_b = 180\text{ }^\circ\text{C}$ – $C^0_{O_2} = 25\text{--}30$ мкг/л [3]. Цей факт відкриває можливості для дослідження застосування цього явища з метою суттєвого сповільнення ЕКЗ трубопроводів ДК АЕС.

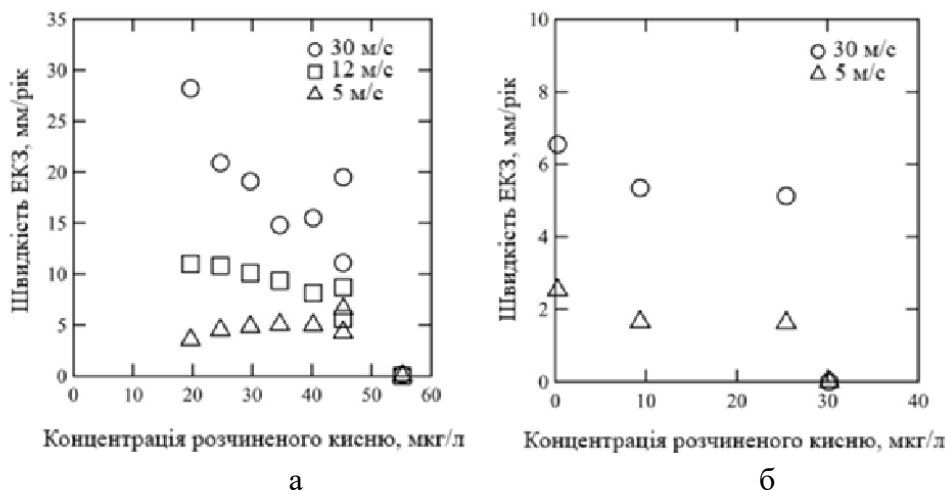


Рисунок 2 – Залежність швидкості ЕКЗ від концентрації розчиненого у воді кисню: а – при 140 °C; б – при 180 °C

Щодо умов, залежних від трубопроводу, можна зазначити, що для початку ЕКП необхідно, щоб матеріалом трубопроводу була вуглецева або низьколегована сталь [4]. Також необхідна різниця хімічних потенціалів між середовищем і стінкою трубопроводу для руйнування оксидного шару [4]. Зміна конфігурації трубопроводу впливає на перебіг ЕКП тою мірою, якою він збурює потік середовища, звідки можна зробити висновок, що основними місцями дії ЕКЗ є згини, трійники, діафрагми, конфузори, тощо.

Заходи щодо сповільнення та попередження ЕКЗ трубопроводів ДК, що запроваджуються на українських АЕС, переважно спрямовані на вдосконалення контрольно-попереджувальних заходів, вдосконалення водно-хімічного режиму ДК і заміни матеріалів трубопроводів на неіржавіючі сталі та титанові сплави, використання

захисних покриттів. Найширшим полем для заходів щодо сповільнення ЕКЗ є водно-хімічний режим. Із уже впроваджених заходів можна назвати перехід від корекційної обробки середовища гідразином до обробки етаноламіном та морфоліном, підвищення показника рН, зниження концентрації розчиненого у воді кисню шляхом зменшення присмокту повітря в ДК [2].

Висновки. ЕКЗ є важливою проблемою експлуатації трубопроводів ДК АЕС, недооцінка якої може призвести до аварійних ситуацій. ЕКП є наслідком синергетичної дії процесів ерозії та корозії. Фактори, що впливають на швидкість ЕКЗ трубопроводів поділяються на залежні від середовища та залежні від трубопроводу. Фактори, залежні від середовища, переважно мають неоднозначний вплив на швидкість ЕКЗ. З розглянутих факторів лише швидкість середовища має однозначний вплив на швидкість перебігу ЕКП. Решта з них мають складний вплив на швидкість ЕКЗ.

Заходи щодо сповільнення ЕКЗ трубопроводів ДК українських АЕС переважно спрямовані на вдосконалення водно-хімічного режиму ДК. Важливо наголосити, що зниження концентрації розчиненого кисню, згідно з даними дослідження [3], не сповільнює ЕКЗ трубопроводу, а навпаки – прискорює його. Цей захід потребує подальшого детального комплексного аналізу та можливої корекції, що може бути темою майбутнього дослідження.

Перелік посилань:

1. Ayoub A., Stankovski A., Kröger W., & Sornette D. (2021). Precursors and startling lessons: Statistical analysis of 1250 events with safety significance from the civil nuclear sector. *Reliability Engineering & System Safety*, 214, 107820. <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107820>
2. JSC NNEGC Energoatom (Joint-Stock Company “National Nuclear Energy Generating Company Energoatom”). (2024). SOU NAEK 040:2024. Management of the specific degradation mechanism of NPP pipeline elements – erosion-corrosion wear: General requirements. Kyiv, Ukraine. https://energoatom.com.ua/download?path=/info_for_members/tUyLWYILAaaMdS8KUvvnvMEib4SkBy3QkiKKDFCBE.pdf
3. Fujiwara K., Yoneda K., & Inada F. (2010). Effect of dissolved oxygen on flow-accelerated corrosion in neutral and alkaline solutions. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 47(4), 362–370. <https://doi.org/10.1080/18811248.2010.9711656>
4. Ahmed W. H. (2012). Flow accelerated corrosion in nuclear power plants. In *Flow accelerated corrosion*. InTech. <https://doi.org/10.5772/51346>.

¹ Аспірант 2 курсу Чикало В. Б.

¹ Проф., д.т.н. Кравець В. Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=l8nJrv0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МАКСИМАЛЬНІ ТЕПЛОВІ ПОТОКИ ПРИ КИПІННІ НА ДИСКРЕТНО-НЕІЗОТЕРМІЧНИХ ПОВЕРХНЯХ З КРАПКОВИМ ДЖЕРЕЛОМ ЕНЕРГІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Подальший розвиток сучасної радіоелектронної техніки, особливо стрімке впровадження в наше життя штучного інтелекту, потребує збільшення функціональних можливостей комп'ютерного обладнання. Збільшення потужності напівпровідникових елементів в мікросхемах при одночасному зменшенні їх масогабаритних характеристик призводять до підвищення енергоспоживання елементів приладів. Питомі теплові навантаження при цьому суттєво збільшуються і температурний режим напівпровідникових елементів мікросхем може перевищити їх максимальне значення. Тому основною проблемою в даному випадку є забезпечення заданого температурного режиму роботи малогабаритної радіоелектронної апаратури при відведенні великих теплових потоків. З метою підтримки заданого температурного рівня сучасного електронного обладнання широко застосовуються процеси пароутворення на кристалі напівпровідника.

Аналіз останніх досліджень. В даний час іде пошук ефективного відведення підвищених теплових потоків при кипінні на поверхнях малих розмірів. Проводяться експериментальні дослідження для вивчення механізмів кипіння та визначення характеристик теплообміну [1]. Розробляють поверхні з підвищеними теплопередавальними характеристиками на основі крапкових джерел енергії. В результаті було створено теплообмінну поверхню де маленькі ділянки із високою теплопровідністю розділені матеріалом із низькою теплопровідністю [2].

Формулювання мети. Метою дослідження є вивчення температурних режимів, максимальних теплових потоків та інтенсивності тепловіддачі при кипінні води у великому об'ємі на дискретно-неізотермічній поверхні при проектуванні нових систем охолодження для сучасних електронних компонентів. Встановлення впливу взаємного розташування високотеплопровідних ділянок на максимальні теплові потоки, яку може відводити така дискретно-неізотермічна поверхня.

Основна частина. Було виготовлено три таких поверхні з різним відношенням діаметра крапкових ділянок до відстані між ними $d/l = 0,33; 0,37$ та $0,62$ (рис. 1). Мідні ділянки 1 розташовувалися по кутам рівнобічного трикутника з довжиною сторін l . Це забезпечувало найбільш щільну упаковку та однакові відстані між ділянками. Крапкові джерела теплоти були роз'єднані між собою матеріалом з низькою теплопровідністю 2 (склотекстоліт), коефіцієнт теплопровідності якого не перевищував $0,3 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$.

Конструкція таких ділянок дозволяла фіксувати температурний рівень поверхні та густину теплового потоку, що відводиться. Тепловий потік розраховувався для кожної ділянки крапкового джерела з урахуванням їх площі. Середній еквівалентний діаметр ділянок для всіх досліджених дискретно-неізотермічних поверхонь складав $1,25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$. Нагрівач 3 запобігав вільному підтоку рідини до центрів пароутворення і, таким чином, створював умови протяжної поверхні. Після початку кипіння при малих теплових потоках, на кожній ділянці діє деяка кількість центрів пароутворення, які генерують окремі парові бульбашки. Підвищення теплового потоку призводить до появи додаткових центрів пароутворення, і режим бульбашкового кипіння переходить в стадію злиття всіх парових

бульбашок в окрему парову хмару. В даному випадку генерація парових утворень здійснюється тільки на поверхнях тепловіддаючих ділянок.

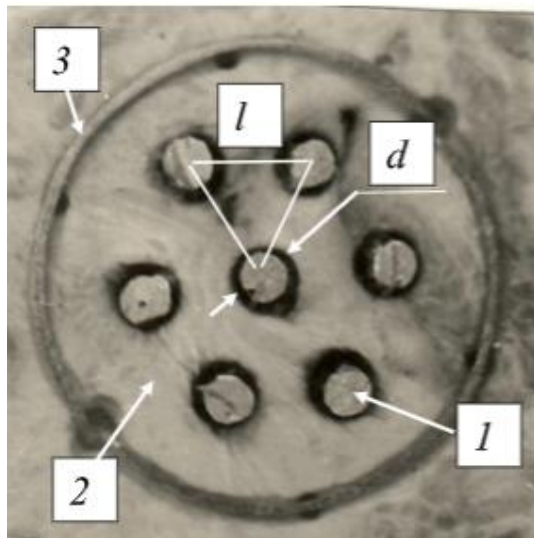


Рисунок 1 – Фото поверхні з дискретним розташуванням крапкових джерел теплоти (вид зверху): 1 – ділянки крапкових джерел теплоти; 2 – стінка з низькою теплопровідністю; 3 – нагрівач, який імітує граничні умови протяжної дискретно-неізотермічної поверхні

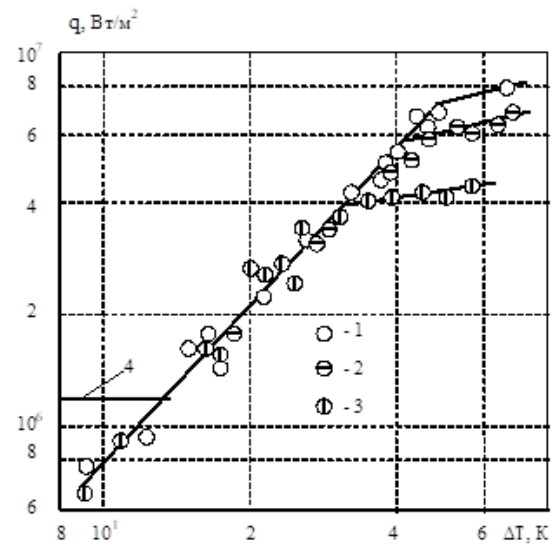


Рисунок 2 – Залежність $q = f(\Delta T)$ при кипінні води на центральних ділянках дискретно-неізотермічних поверхонь: 1 – $d/l = 0,33$; 2 – $d/l = 0,37$; 3 – $d/l = 0,62$; 4 – $q_{кр.\infty} = 1,2 \cdot 10^6 \text{ Вт/м}^2$

На ділянці з малою теплопровідністю центри пароутворення не виникають, так як рідина з температурою насичення підтікає зверху вниз та руйнує тепловий пограничний шар на ній. До ділянки, де тепло віддається, рідина підтікає з боку ділянок з малою теплопровідністю з температурою, що практично дорівнює температурі насичення. Тому для формування теплового пограничного шару на тепловіддаючих ділянках необхідно затратити додаткову кількість енергії. Це призводить до інтенсифікації тепловіддачі, а процес кипіння заходить в область теплових потоків, що значно перевищує критичний тепловий потік на ізотермічній поверхні $q_{кр.\infty}$ (лінія 4, рис. 2). Такий режим теплообміну може відбуватися до деякого значення $q > q_{кр.\infty}$, при якому вже неможливе виникнення додаткових центрів пароутворення на тепловіддаючих ділянках. Подальше збільшення теплового навантаження призводить до появи локальних парових плівок та інтенсивність тепловіддачі плавно знижується.

Наближення тепловиділяючих ділянок одна до одної, тобто збільшення d/l , призводить до зменшення максимальних теплових потоків (лінія 3, рис. 2). Але на центральній ділянці все одно густина теплового потоку перевищує $q_{кр.\infty}$ приблизно у 4 рази. На рис. 3 показано процес бульбашкового кипіння води на дискретно-неізотермічній поверхні у великому об'ємі.

В результаті проведених досліджень отримано залежність, яка дозволяє розрахувати діапазон значень d/l , при яких загальний тепловий потік, що відводиться від дискретно-неізотермічної поверхні $q_{кр.днп\Sigma}$ перевищує тепловий потік, який можна відвести від ізотермічної поверхні однакової площі $q_{кр.\infty}$.

$$\frac{q_{кр.днп\Sigma}}{q_{кр.\infty}} = \frac{\pi}{2\sqrt{3}} \frac{d_{cp}^2}{l^2} \left[3 \left(1 - \frac{d_{cp}}{l} \right) \left(\frac{R_{нмр}}{l_k} \right)^{-0,65} + \frac{d_{cp}}{l} \right],$$

де, $q_{кр.\infty}$ – критичний тепловий потік при кипінні на протяжній ізотермічній поверхні; $R_{нмр}$ – радіус поверхні малого розміру (крапкове джерело); l_k – капілярна стала.

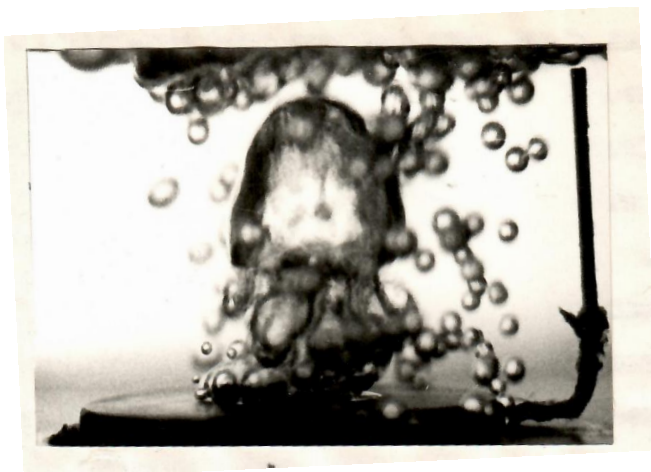


Рисунок 3 – Фото режиму бульбашкового кипіння води на дискретно-неізотермічній поверхні при густині теплового потоку на центральній ділянці $6,4 \cdot 10^6$ Вт/м²

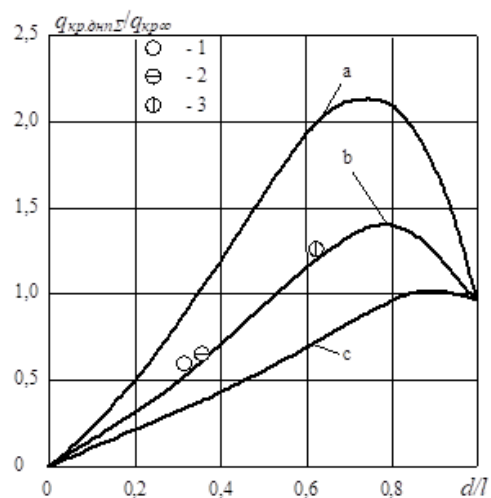


Рисунок 4 – Розподіл $q_{кр.днпΣ} / q_{кр.∞}$ в залежності від взаємного розташування ділянок d/l за рівняннями: 1 – діаметр поверхонь $d = 1,14 \cdot 10^{-3}$ м; 2 – $1,28 \cdot 10^{-3}$ м; 3 – $1,25 \cdot 10^{-3}$ м. Лінії: а – діаметр тепловіддаючих поверхонь $d = 0,5 \cdot 10^{-3}$ м; б – $1,25 \cdot 10^{-3}$ м; с – $3,0 \cdot 10^{-3}$ м.

З рис. 4 видно, що максимальне збільшення $q_{кр.днпΣ}$ спостерігається у діапазоні d/l від 0,5 до 0,9. Також чим менше діаметр тепловіддаючої ділянки, тим більше $q_{кр.днпΣ}$.

Висновки. Показано, що можна збільшити густину теплового потоку при кипінні на поверхнях з дискретним розташуванням тепловіддаючих ділянок, ніж на ізотермічній поверхні.

Перелік посилань:

1. Zhang Xi., El Mellas Is., Andreini N., Magnini M. The microlayer and force balance of bubbles growing on solid in nucleate boiling. – International Journal of Multiphase Flow, – 2025, v. 183, 105049. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2024.105049>.
2. Kravets V. Yu. Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. – Kyiv: Interservice, 2023. – 204 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67111>.

Робота виконана за підтримки Національного фонду досліджень України, проєкт № 110.07/0231.

¹ Магістрант 2 курсу Баричук З. В.; ¹ Мол. вчений Шепель Г. С.

¹ Проф., д.т.н. Кравець В. Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=l8nJrv0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВПЛИВ КОЕФІЦІЄНТА ЗАПОВНЕННЯ НА ТЕПЛОПЕРЕДАВАЛЬНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Проблеми з підтриманням температурного режиму та охолодженням різного типу обладнання з кожним днем стають дедалі гострішими та складнішими, що вимагає дедалі більш комплексного підходу до їхнього вирішення. Ця проблема стає особливо актуальною у зв'язку з підвищенням потужності приладів і систем, які потребують ефективного відводу значних теплових потоків. Це може бути як охолодження електронного обладнання так і великих об'єктів. Наприклад відведення теплоти від відпрацьованого ядерного палива, що знаходиться у приреакторному басейні витримки ядерних реакторів. До таких пасивних систем охолодження відносяться двофазні термосифони, принцип роботи яких базується на циклі випаровування-конденсації.

Аналіз останніх досліджень. Двофазний термосифон є різновидом автономних теплопередаючих пристроїв, що представляє собою вакуумований металевий контейнер, частково заповнений теплоносієм [1]. У герметичній порожнині термосифона відбуваються процеси кипіння (випаровування) теплоносія, конденсація та перенос теплоти та маси між ділянками кипіння і конденсації. По довжині його умовно розділяють на ділянки: нагрівну (випарна зона), транспортну та зону конденсації. Транспортна зона може бути відсутня – її довжину можна не враховувати в порівнянні з довжиною випарника та конденсатора.

Процеси в термосифоні відбуваються безперервно, що забезпечує передачу тепла від однієї зони до іншої. У транспортній зоні зазвичай створюються адіабатні умови, тобто теплота не підводиться і не відводиться через стінки.

Висока ефективність теплопереносу за допомогою термосифонів пояснюється високими коефіцієнтами тепловіддачі при кипінні та конденсації циркулюючого теплоносія в процесі послідовних фазових перетворень [2].

Формулювання мети. Для застосування двофазних термосифонів в якості ефективних систем відведення теплоти необхідно визначити вплив кута нахилу та коефіцієнта заповнення на їх теплопередаючі характеристики.

Основна частина. Дане дослідження присвячено визначенню впливу кута нахилу та коефіцієнту заповнення K_z , що є відношенням об'єму, займаного теплоносієм V_p до об'єму всієї зони нагріву V_{zn} на термічний опір R і максимальний тепловий потік Q_{max} , що передається. Довжина термосифону складала $L=700$ мм, довжина зони нагріву та конденсації: $L_{zn}=L_{zk}=200$ мм. Зовнішній діаметр термосифону становив $d_{зов}=10$ мм, а внутрішній – $d_{вн}=9$ мм. Розміщення термосифону в просторі – довільне. В якості теплоносія використовувалася дистильована вода. Об'єм заповнення термосифону робочою рідиною становить $V_{тн}=3,8 \cdot 10^{-3}$ л.

Зміна коефіцієнту заповнення K_z відбувалася за рахунок різної довжини зони нагріву і складала від 0,3 до 1,2. Експеримент проводився для кутів нахилу термосифону від 5° до 90° (рис. 1).

При проведенні дослідження було зафіксовано пульсації температури в зонах теплообміну термосифонів. Такі пульсації мали місце тільки після активації перших центрів пароутворення.

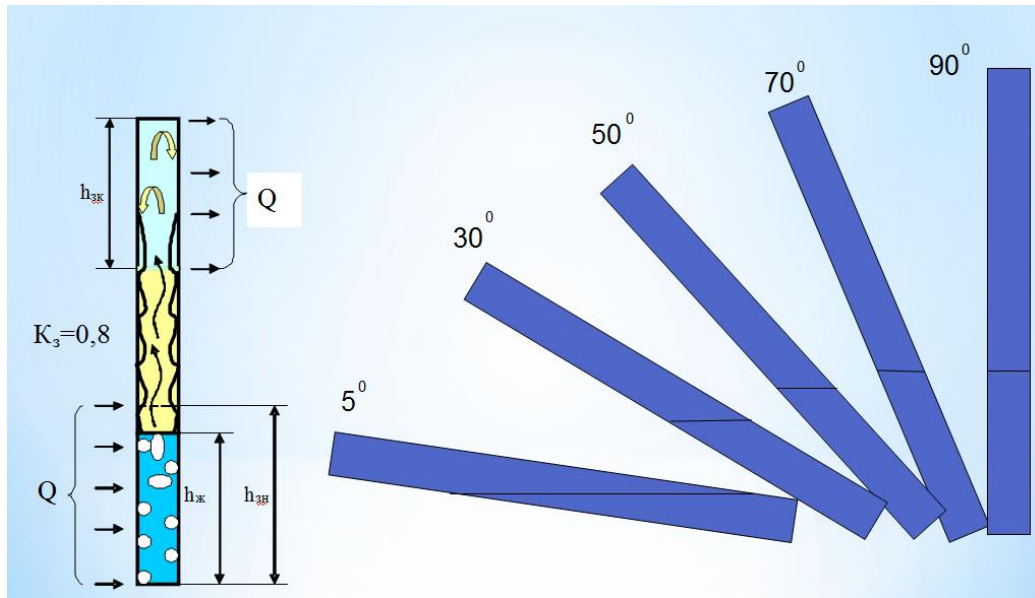


Рисунок 1 – Схема для дослідження впливу кута нахилу на теплопередаючу здатність двофазних термосифонів

При цьому відбувався снарядний режим течії паро-рідинної суміші від зони нагріву до зони конденсації. Подальше збільшення теплового потоку приводило до підвищення тиску в термосифоні і зменшенні амплітуди пульсацій температури. Таке явище спостерігалось аж до різкого підвищення температури в зоні нагріву, що характерно для переходу від бульбашкового до плівкового режиму кипіння (рис. 2).

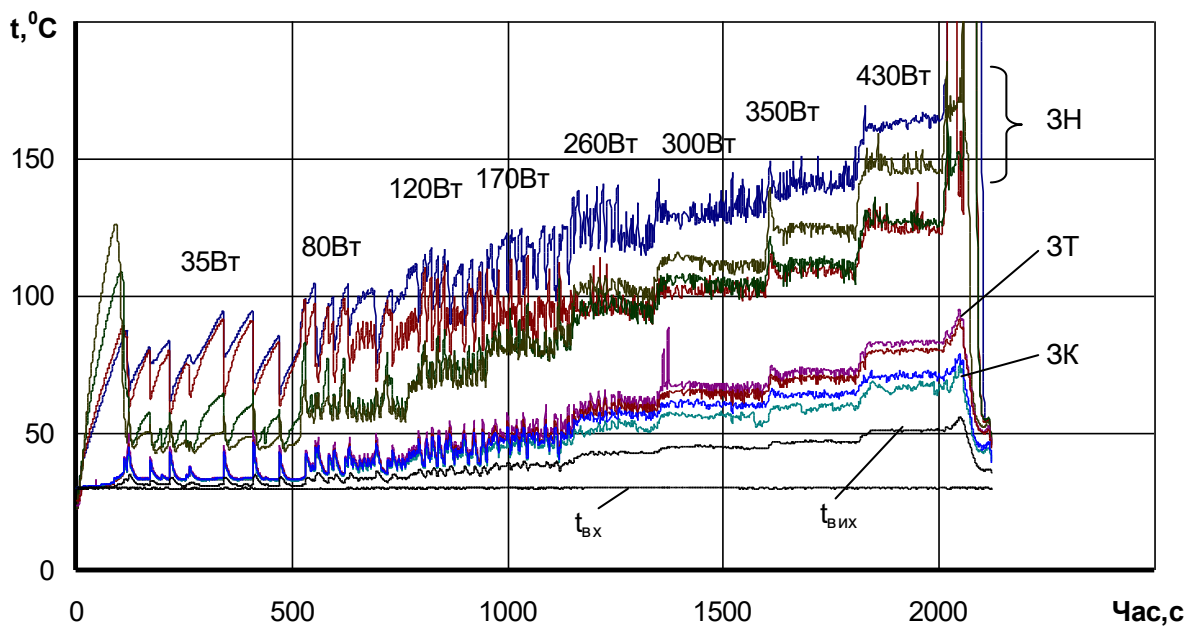


Рисунок 2 – Залежність температури стінки термосифона з $d_{вн} = 9 \cdot 10^{-3} \text{ м}$ від часу при зміні теплового потоку ($K_3=0,3$)

Інтенсивність тепловіддачі в зоні нагріву термосифона практично не залежить від зміни його кута нахилу в усьому діапазоні відведених теплових потоків (рис. 3). Однак при збільшенні довжини зони нагріву, що відповідає зменшенню K_3 , коефіцієнти тепловіддачі відповідно підвищуються. Так для кута нахилу 60° і густини теплового потоку $\sim 1 \cdot 10^5 \text{ Вт/м}^2$ спостерігалось зростання коефіцієнта тепловіддачі при $K_3 = 0,3$ приблизно у 1,5 рази в порівнянні із $K_3 = 1,2$.

Це можна пояснити тим, що при зменшенні коефіцієнта заповнення збільшується довжина зони нагріву, по якій стікає плівка конденсату, а інтенсивність тепловіддачі в тонких плівках набагато вища ніж у великому об'ємі.

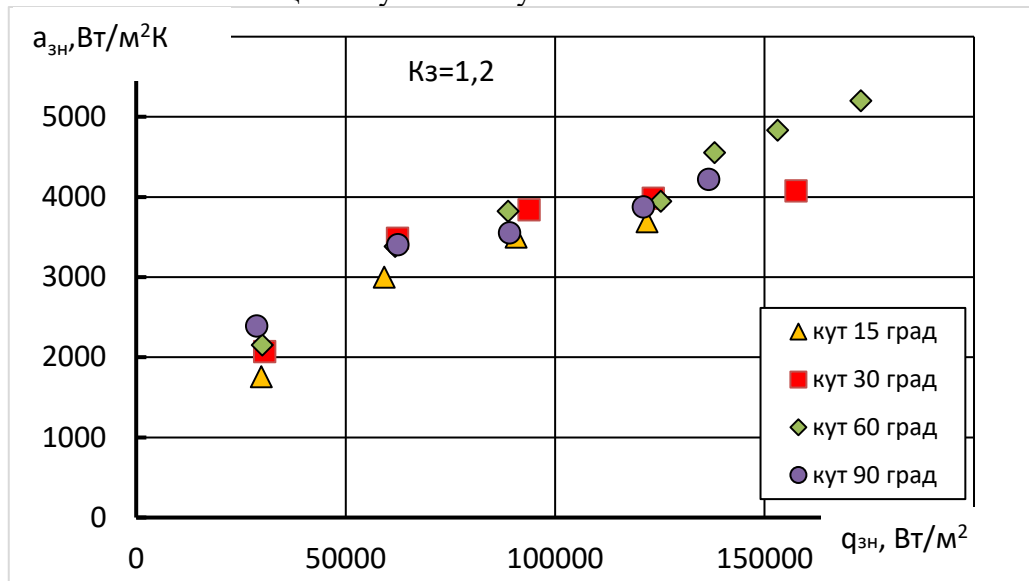


Рисунок 3 – Залежність коефіцієнта тепловіддачі в зоні нагріву від густини теплового потоку при різних кутах нахилу

Якщо розглядати вплив коефіцієнта заповнення на термічний опір, то з рис. 4 можна зробити висновок, що зі зменшенням коефіцієнта заповнення термічний опір знижується, а отже теплопередаюча здатність термосифона зростає. Стрілками показано режим некерованого зростання температури в зоні нагріву, що характерно для переходу від бульбашкового до плівкового режиму кипіння.

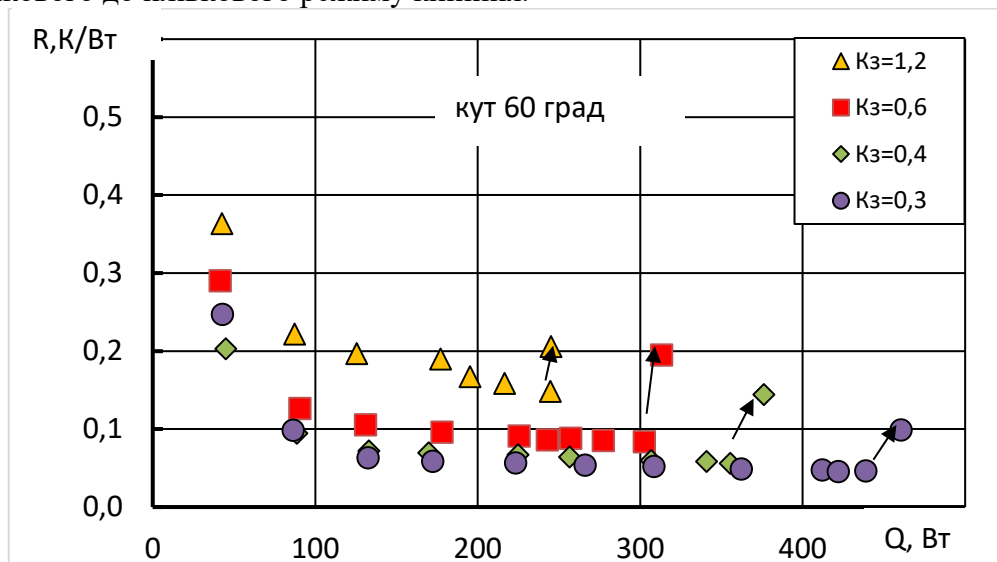


Рисунок 4 – Залежність термічного опору від теплового потоку при різних коефіцієнтах заповнення

Але, оскільки мінімальному значенню термічного опору відповідає максимальне значення теплового потоку, то зі зменшенням K_z при однаковій кількості теплоносія максимальний тепловий потік збільшується. На рис. 5. показані результати дослідження залежності максимального теплового потоку від коефіцієнта заповнення при різних кутах нахилу. Як видно з графіка, при зменшенні коефіцієнта заповнення значення максимального теплового потоку зростає. Також існує діапазон кутів нахилу при яких

відбувається максимальні значення Q_{max} .

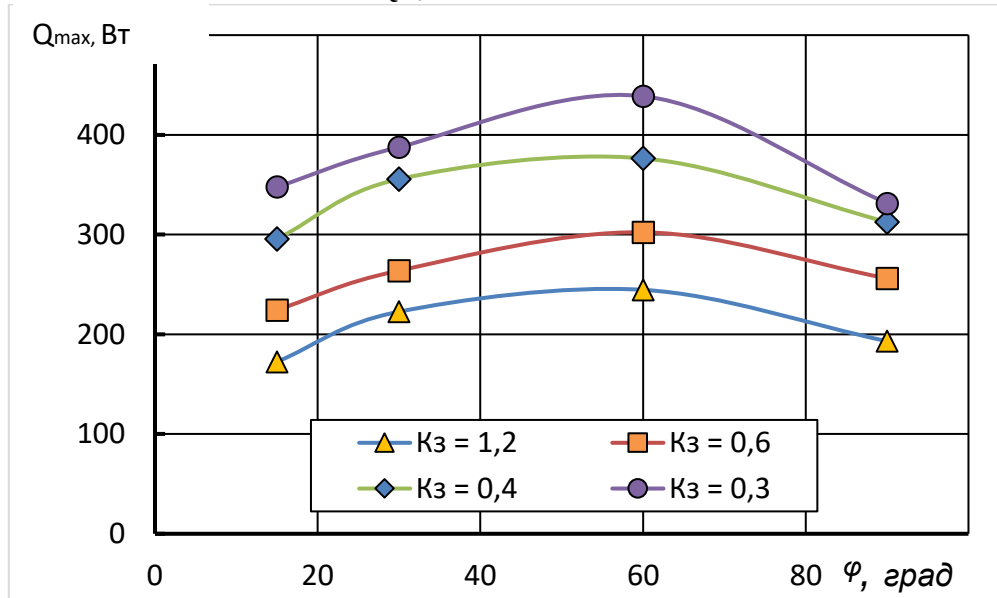


Рисунок 5 – Залежність максимальних теплових потоків від кута нахилу при різних коефіцієнтах заповнення K_z термосифона

Висновки. Таким чином дослідження показало, що існує суттєва залежність впливу на теплопередавальну здатність термосифонів як коефіцієнта заповнення, так і кута нахилу. Також повноцінна передача теплової енергії в термосифоні починається тільки з моменту виникнення перших центрів пароутворення.

Перелік посилань:

1. Kravets V., Konshin V., Hurov D., Vorobiov M., Shevel Ie. Determining the influence of geometric factors and the type of heat carrier on the thermal resistance of miniature two-phase thermosyphons / Eastern-European Journal of Enterprise Technologies, 2022 №4/8(118), pp. 51–59. DOI: 10.15587/1729-4061.2022.263180.

2. Kravets V. Yu. Heat transfer processes in miniature evaporation-condensation cooling systems. – Kyiv: Interservice, 2023. – 204 p. <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/67111>.

¹ Аспірант 1 курсу Сцельник Д. Р.

¹ Проф., д.т.н. Хайрнасов С. М.

<https://scholar.google.com/citations?user=FAj2nm0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОНЦЕПЦІЯ ПОБУДОВИ МОДЕЛІ КАПІЛЯРНОГО ТРАНСПОРТУ РІДИНИ ТА ЇЇ ВИПАРОВУВАННЯ З КАПІЛЯРНОЇ СТРУКТУРИ

Постановка проблеми. Локальні теплові потоки сучасної електроніки можуть перевищувати 300 Вт/см². Традиційні однофазні системи виявляються недостатньо ефективними, що зумовлює перехід до двофазного випарного охолодження в пористих структурах. Перспективними є системи з пасивним капілярним підведенням рідини. Побудова предиктивних чисельних моделей таких систем залишається складним завданням через відсутність єдиної методології, яка поєднує капілярний транспорт, двофазний теплообмін і фазові переходи [1, 2].

Аналіз останніх досліджень. Для опису процесів фільтрації рідини та тепломасообміну в капілярно-пористих середовищах використовують два основні підходи: моделювання на мікрорівні з явним відтворенням геометрії пор, і макроскопічне моделювання на основі об'ємного усереднення, де пористе середовище розглядається як ефективний континуум з усередненими властивостями. Дослідники Wang та Beckermann [3] розробили двофазну модель суміші для опису течії системи рідина-пара та теплообміну в капілярно-пористих середовищах на макроскопічному рівні, використовуючи метод об'ємного усереднення й трактуючи пористий каркас як ефективне середовище з пористістю та проникністю. Dhavaleswarapu з колегами [4] проаналізували системи з тонкоплівковим випаровуванням, де рідина підводиться до зони випаровування пасивно через капілярні сили в мікро- та наноструктурних каналах, що підтвердило високу ефективність пасивного капілярного підведення теплоносія до випарної зони.

Для опису капілярного тиску в пористих середовищах широко застосовується нелінійна модель Van Genuchten-Mualem, яка забезпечує гладку залежність капілярного тиску від насиченості та високу чисельну стабільність при розрахунках процесів фільтрації рідини та тепломасообміну [5]. У свою чергу, для опису кінетики фазового переходу рідина-пара в макроскопічних моделях часто використовується релаксаційна модель Lee, яка стала стандартом для багатьох промислових пакетів обчислювальної гідродинаміки [6]. Попри наявність цих окремих підходів, питання їхнього об'єднання в єдину стійку та узгоджену методологію макроскопічного моделювання пасивного капілярного транспорту при випарному охолодженні залишається відкритим.

Мета та завдання дослідження. Метою роботи є виявлення закономірностей комплексного впливу пасивного капілярного транспорту теплоносія та двофазного теплообміну на ефективність теплообмінного обладнання, а також розробка методології комплексного макроскопічного моделювання зазначених процесів для подальшого застосування при проєктуванні локальних елементів систем охолодження потужних електронних компонентів.

Основна частина. Для опису пасивного капілярного транспорту доцільно відмовитися від явного моделювання окремих пор на користь макроскопічної моделі суцільного середовища, де пористе середовище характеризується пористістю ϵ , ефективною проникністю K та іншими ефективними параметрами. Рушійною силою пасивного підняття рідини в такій моделі є градієнт капілярного тиску P_c , який виникає на межі розділу рідина-пара в порах. У класичному підході на основі функції Леверетта капілярний тиск зв'язують із насиченістю рідиною S через безрозмірну функцію $J(S)$. Узагальнена форма такого зв'язку записується як:

$$P_c(S) = \sigma \cos \theta \sqrt{\frac{\varepsilon}{K}} J(S), \quad (1)$$

де σ – коефіцієнт поверхневого натягу, Н/м; θ – кут змочування, рад; ε – пористість; K – абсолютна проникність, м²; $J(S)$ – безрозмірна функція Леверетта. У сучасних роботах для побудови залежності $P_c(S)$ часто застосовують модифіковану модель Van Genuchten–Mualem [5, 7].

Капілярний тиск вводиться до макроскопічного рівняння імпульсу як додатковий джерельний член, який діє проти гравітаційних сил та в'язкісного опору. В загальному вигляді об'ємно-усереднене рівняння імпульсу для рідинної фази записується як:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\gamma \alpha_q \rho_q v_q) + \nabla \cdot (\gamma \alpha_q \rho_q v_q v_q) = -\gamma \alpha_q \nabla p + S_{source}, \quad (2)$$

де γ – коефіцієнт пористості; α_q – об'ємна частка фази q ; ρ_q – густина фази q , кг/м³; v_q – швидкість фази q , м/с; p – тиск, Па; S_{source} – враховує складові опору та капілярні сили, Н/м³ [3].

S_{source} для пористого середовища зазвичай представляють у вигляді суми в'язкого опору Дарсі, інерційного опору Форхгайма та капілярної складової:

$$S_{source} = -\frac{\mu}{K} v_q - C_2 \rho_q |v_q| v_q + S_{pc}, \quad (3)$$

де μ – динамічна в'язкість рідини, Па·с; C_2 – емпіричний коефіцієнт інерційного опору Форхгайма, м⁻¹; $S_{pc} = \nabla p_c$ – член, що враховує дію градієнта капілярного тиску в об'ємі пористого середовища, Н/м³ [8].

Для опису фазового переходу рідини в пару застосовують релаксаційну модель Lee, у якій об'ємний джерельний член маси $\dot{m}_{lv}$ пропорційний температурному перегріву відносно температури насичення:

$$\dot{m}_{lv} = \text{reff} \alpha_l \rho_l \frac{T_l - T_{sat}}{T_{sat}}, \quad (4)$$

де α_l – об'ємна частка рідини; ρ_l – густина рідини, кг/м³; T_l – локальна температура, К; T_{sat} – температура насичення, К; reff – ефективний коефіцієнт релаксації, с⁻¹ [6, 9].

При інтенсивному випаровуванні всередині пористого середовища температура твердої фази може суттєво відрізнятись від температури рідини. Це обґрунтовує доцільність використання моделі локальної термічної нерівноваги, у межах якої розв'язуються два окремі рівняння енергії – для твердої та рідинної фаз:

$$(1 - \varepsilon) \rho_s c_{p,s} \frac{\partial T_s}{\partial t} = \nabla \cdot (k_{eff,s} \nabla T_s) - h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f), \quad (5)$$

$$\varepsilon \rho_f c_{p,f} \frac{\partial T_f}{\partial t} + \nabla \cdot (\varepsilon \rho_f c_{p,f} v_f T_f) = \nabla \cdot (k_{eff,f} \nabla T_f) + h_{sf} a_{sf} (T_s - T_f) - \dot{m}_{lv} h_{lv}, \quad (6)$$

де індекси s та f відповідають твердій та рідинній фазам; h_{sf} – коефіцієнт теплообміну, мВт/(м²·К); a_{sf} – питома поверхня контакту між рідкою та твердою фазами, м⁻¹; h_{lv} – питома теплота пароутворення, Дж/кг; ρ – густина, кг/м³; c_p – теплоємність, Дж/(кг·К); T – температура, К; k_{eff} – ефективна теплопровідність, Вт/(м·К) [10].

Висновки. Проведений огляд літератури та аналіз існуючих математичних моделей дозволив обґрунтувати перехід від моделювання на мікрорівні до макроскопічного підходу з використанням об'ємного усереднення для опису пасивного капілярного транспорту при випарному охолодженні. Виявлено, що стандартні можливості комерційних пакетів

обчислювальної гідродинаміки не забезпечують автоматичний облік рушійної сили капілярного підняття, що потребує розробки користувацьких функцій для додавання члена $Sp_c = \nabla P_c$ у рівняння імпульсу за формулою (3).

Встановлено, що релаксаційна модель Lee може слугувати основою для моделювання об'ємного випаровування в пористому середовищі за умови її адаптації до геометрії капілярної структури та коректного вибору коефіцієнта релаксації re_{eff} . Окремо підкреслено важливість застосування підходу локальної термічної нерівноваги для відтворення реалістичного розподілу температур між твердою та рідинною фазами.

Наукова новизна. Наукова новизна даного етапу роботи полягає у теоретичному узагальненні й об'єднанні окремих відомих моделей – двофазної суміші для пористих середовищ [4], пасивного капілярного підведення рідини [4], нелінійної моделі капілярного тиску Van Genuchten-Mualem [5] та релаксаційної моделі Lee [6] – у єдину концепцію макроскопічного моделювання пасивного капілярного транспорту при випарному охолодженні. При цьому акцент зроблено на необхідності використання LTNE-підходу й включення градієнта капілярного тиску безпосередньо в рівняння імпульсу через спеціалізований програмний код.

Практичне значення результатів. Отримані теоретичні висновки і сформований математичний апарат служать основою для подальшої розробки інженерної методології розрахунку та проєктування теплообмінників із випарним охолодженням та пасивною подачею рідини в капілярні структури. Інтеграція зазначених моделей у сучасне програмне забезпечення, таке як Ansys Fluent, за допомогою UDF, дозволить проводити чисельне моделювання, оптимізувати геометричні параметри капілярних структур та системи подачі рідини, а також критичний тепловий потік, при якому відбувається пересихання капілярних структур.

Перелік посилань:

1. Hu L., Narayanaswamy R., Chen X., Chen G. Near-junction thermal management: Thermal conduction in gallium nitride composite substrates. *Annual Review of Heat Transfer*. 2015. Vol. 18. P. 7–46.
2. Mudawar I. Recent advances in high-flux, two-phase thermal management. *Journal of Thermal Science and Engineering Applications*. 2013. Vol. 5, No. 2. 021012.
3. Wang C. Y., Beckermann C. A two-phase mixture model of liquid-gas flow and heat transfer in capillary porous media–I. Formulation. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 1993. Vol. 36, No. 11. P. 2747–2758.
4. Dhavaleswarapu H. K., Garimella S. V., Murthy J. Y. Microscale temperature measurements near the triple line of an evaporating thin liquid film. *Journal of Heat Transfer*. 2009. Vol. 131, No. 6. 061501.
5. van Genuchten M. T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*. 1980. Vol. 44, No. 5. P. 892–898.
6. Lee W. H. A pressure iteration scheme for two-phase flow modeling. In: Veziroglu T.N. (ed.) *Multiphase Transport: Fundamentals, Reactor Safety, Applications*. Washington: Hemisphere Publishing, 1980. P. 407–431.
7. Leverett M. C. Capillary behavior in porous solids. *Transactions of the AIME*. 1941. Vol. 142, No. 1. P. 152–169.
8. Whitaker S. The Forchheimer equation: A theoretical development. *Transport in Porous Media*. 1996. Vol. 25, No. 1. P. 27–61.
9. Sun D. L., Xu J. L., Wang L. Development of a vapor–liquid phase change model for volume-of-fluid method in FLUENT. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2012. Vol. 39, No. 8. P. 1101–1106.
10. Alazmi B., Vafai K. Analysis of fluid flow and heat transfer interfacial conditions between a porous medium and a fluid layer. *International Journal of Heat and Mass Transfer*. 2001. Vol. 44, No. 9. P. 1735–1749.

Робота виконана в рамках проєкту Національного фонду досліджень України №2025.07/0231.

СЕКЦІЯ № 4

**Сучасні технології в
тепловій та
альтернативній
енергетиці**

¹ Магістрант 1 курсу Баланда О. Д.

¹ Ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОВЕДЕННЯ РЕКОНСТРУКЦІ КОТЛА HAGOMATIC 5/12 НА СПАЛЮВАННЯ БІОГАЗУ

Постановка проблеми та її актуальність. На сьогоднішній день зменшення споживання традиційних видів палива – нагальна тенденція енергетичного сектору України [1]. Відтак, збільшення масштабів використання відновлюваних джерел енергії та запровадження енергоощадних технологій становить нагальне завдання [2]. Застосування відновлюваних джерел енергії, передусім біомаси, є актуальним для України, адже дає змогу знизити її залежність від імпортованих енергоносіїв та посилити енергетичну безпеку [3]. Технологія конвертації біогазу в біометан сприятиме значному збільшенню обсягів видобутку газу, а також скороченню імпорту природного газу [4].

Аналіз останніх досліджень. На сучасному етапі технологічного прогресу з'являються нові способи використання біогазу, крім спалювання для отримання тепла. Серед них: генератори для виробництва електричної енергії та когенератори, які продукують і тепло, і електрику. У важкий час для України, перспективним напрямком є очищення біогазу до біометану, що відповідає встановленим стандартам. Після очищення біометан стає аналогом природного газу, а в деяких випадках навіть перевершує його. Далі біометан можна подавати в газорозподільні мережі [5].

Формулювання мети. Тепловий розрахунок котла Hagomatic 5/12 проводиться з метою перевірки можливості його переведення на біогаз.

Основна частина. Біогаз – це суміш з 65 % метану, 30 % вуглекислого газу, 1 % сірководню, а також домішок азоту, кисню, водню і чадного газу. В 1 м³ біогазу міститься енергія, еквівалентна 0,6 м³ природного газу.

Найважливішою енергетичною властивістю біогазу, подібно до будь-якого виду палива, є теплота згоряння або нижча теплотворна здатність Q_n , що в залежності від кількості метану коливається в діапазоні 18–25 МДж/м³. Розрахункове значення цього показника для біогазу складає [6]:

$$Q_n = 108[H_2] + 126,3[CO] + 358,2[CH_4] + 235[H_2S].$$

Отже, згідно з розрахунками, середнє значення Q_n для сирого біогазу, що містить 60 % метану, дорівнює близько 22 (табл. 1), у порівнянні з 33–36 МДж/м³ для природного газу. Температура горіння біогазу, як правило, варіюється в межах 2050–2200 °С, залежно від його компонентного складу та вмісту ключових складових [6].

Таблиця 1 – Усереднені характеристики складу біогазового палива

Компонент, %	Стічні води та тверді побутові відходи (трава, листя)	Органічні побутові відходи
Метан	45–60	55–70
Двоокис вуглецю	25–50	25–45
Водень	0–3	0–1
Азот	2–10	0–1
Кисень	0–3	0–0,5
Сірководень	0–1	0,2–1,5
Вищі гідрокарбонати	<0,5	<0,5
Силоксани	<0,2	0
Оксид вуглецю	<0,5	0

Коефіцієнт надлишку повітря за кожною поверхнею нагріву після топкового простору визначається шляхом додаванням до α_T відповідних значень присмоктів повітря $\Delta\alpha$:

$$\alpha_i = \alpha_T + \sum_1^i \Delta\alpha_i = 1,1 + (0) = 1,1.$$

де i – номер поверхні нагріву після топкового простору по ходу продуктів згорання;
 α_T – коефіцієнт надлишку повітря на виході з топкового простору.

Теоретичний об'єм сухого повітря необхідного для повного згорання палива (коефіцієнт надлишку повітря $\alpha=1$):

$$\begin{aligned} V^0 &= 0,0476 \left(0,5 \cdot CO + 0,5 \cdot H_2 + 1,5H_2S + \sum \left(m + \frac{n}{4}\right) \cdot C_mH_n - O_2 = \right. \\ &= 0,0476 \left(0,5 \cdot 0,32 + 0,5 \cdot 0 + 1,5 \cdot 0 + \left(\left(1 + \frac{4}{4}\right) \cdot 90,29 + \left(2 + \frac{6}{4}\right) \cdot 2,8 + \left(3 + \frac{8}{4}\right) \cdot 1,1 + \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \left(4 + \frac{10}{4}\right) \cdot 0,75 + \left(5 + \frac{12}{4}\right) \cdot 0,54 \right) - 0 \right) = 9,725 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Теоретичні (мінімальні) об'єми продуктів згорання, які одержані при повному згорянні палива з теоретично необхідним ($\alpha = 1$):

– теоретичний об'єм азоту:

$$V_{N_2}^0 = 0,79 \cdot V^0 + \frac{N^p}{100} = 0,79 \cdot 9,725 + \frac{4,2}{100} = 7,75 \text{ м}^3/\text{кг};$$

– об'єм трьохатомних газів:

$$\begin{aligned} V_{RO_2} &= 0,01(CO_2 + CO + H_2S + \sum mC_mH_n = 0,01(0 + 0,32 + 0 + ((90,29) + \\ &\quad + 2 \cdot 2,8 + 3 \cdot 1,1 + 4 \cdot 0,75 + 5 \cdot 0,54)) = 1,0521 \text{ м}^3/\text{кг}; \end{aligned}$$

– теоретичний об'єм водяної пари:

$$\begin{aligned} V_{H_2O}^0 &= 0,01 \left(H_2S + H_2 + \sum \frac{n}{2} C_mH_n + 0,0124d \right) + 0,0161 \cdot V^0 = \\ &= 0,01 \left(0 + 0 + \left(\frac{4}{2} \cdot 90,29\right) + \left(\frac{6}{2} \cdot 2,8\right) + \left(\frac{8}{2} \cdot 1,1\right) + \left(\frac{10}{2} \cdot 0,75\right) + \left(\frac{12}{2} \cdot 0,54\right) \right) + \\ &\quad + 0,0161 \cdot 9,725 = 2,2125 \text{ м}^3/\text{кг}. \end{aligned}$$

Середній коефіцієнт надлишку повітря в газоході:

$$\alpha_{cp1} = \frac{\alpha' + \alpha''}{2} = \frac{1,1 + 1,3}{2} = 1,2,$$

де α' – коефіцієнт надлишку повітря перед газоходом; α'' – коефіцієнт надлишку повітря після газоходу.

Надлишок повітря для кожного газоходу:

$$V_{надл1}^n = V^0(\alpha_{cp1} - 1) = 9,725 \cdot (1,2 - 1) = 1,945 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Визначаємо дійсний об'єм водяної пари і продуктів згорання по ділянках газового тракту (враховуючи надлишок повітря для кожного газоходу):

$$V_{H_2O} = V_{H_2O}^0 + (\alpha_{cp1} - 1) = 2,242 + (1,2 - 1) = 2,42 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

$$V_r = V_{RO_2} + V_{N_2}^0 + V_{надл1}^n + V_{H_2O} = 1,0521 + 7,7597 + 1,945 + 2,412 = 13,168 \text{ м}^3/\text{кг}.$$

Для поверхонь нагріву, в яких наявний радіаційний теплообмін (екрани топкового простору, пароперегрівачі) розраховуємо також об'ємні частки водяних парів, трьохатомних газів а також їх сумарну частку:

$$r_{H_2O} = \frac{V_{H_2O}}{V_r} = \frac{2,442}{13,168} = 0,18545,$$

$$r_{RO_2} = \frac{V_{RO_2}}{V_r} = \frac{1,0521}{13,168} = 0,0798,$$

$$r_n = r_{H_2O} + r_{RO_2} = 0,18545 + 0,0798 = 0,26525.$$

Ентальпія теоретичного об'єму повітря для всього вибраного діапазону температур (100-2200 °С):

$$I^0 = V^0 \cdot (c\vartheta),$$

де $(c\vartheta)_n$ – ентальпія 1 м³ повітря; V^0 – теоретичний об'єм повітря, необхідний для горіння.

Ентальпія теоретичного об'єму продуктів згорання ($\alpha = 1$) для усього вибраного діапазону температур:

$$I_r^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O}.$$

$$100 \text{ °С} = I_r^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O} = 741,27 \text{ кДж/кг}.$$

$$200 \text{ °С} = I_r^0 = V_{RO_2} \cdot (c\vartheta)_{CO_2} + V_{N_2}^0 \cdot (c\vartheta)_{N_2} + V_{H_2O}^0 \cdot (c\vartheta)_{H_2O} = 3069,4911 \text{ кДж/кг}.$$

Розрахунки проводимо для всього діапазону температур (100 °C – 2200 °C).

Таким чином, ентальпія продуктів згоряння:

$$I = I_r^0 + (\alpha - 1) \cdot I_n^0 + I_{зл.}$$
$$900\text{ }^{\circ}\text{C} = I = I_r^0 + (\alpha - 1) \cdot I_n^0 + I_{зл.} = 16652,9\text{ кДж/кг.}$$
$$1000\text{ }^{\circ}\text{C} = I = I_r^0 + (\alpha - 1) \cdot I_n^0 + I_{зл.} = 19761,43\text{ кДж/кг.}$$

Тепловий баланс складають з метою обчислення ККД котлоагрегату і необхідної витрати палива.

Наявна теплота на 1 кг палива:

$$Q_P^P = Q_H^P + i_{пл} = 37000 + 22891 = 59891\text{ кДж/кг.}$$

Втрата теплоти з відхідними газами визначається як різниця ентальпій продуктів згоряння на виході з котельного агрегату і холодного повітря:

$$q_2 = \frac{Q_2}{Q_P^P} \cdot 100 = 100 \cdot \frac{(I_{від} - \alpha_{від} \cdot I_{х.п.}^0) \cdot (100 - q_4)}{Q_P^P} = 100 \cdot \frac{(4021 - 1,2 \cdot 39,8 \cdot 9,725)}{59891} = 0,059\%.$$

Сумарна втрата тепла в котельному агрегаті:

$$\sum q = q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6 = 0,059 + 0,5 + 0 + 1,8 + 0 = 2,3\%.$$

Коефіцієнт корисної дії котельного агрегату (брутто):

$$\eta_{ка} = 100 - \sum q = 100 - 2,3 = 97,7\%.$$

Кількість тепла, що корисно використана в котлоагрегаті:

$$Q_{ка} = D \cdot (I'' - I_{жв}) = 1,389 \cdot (719 - 127) = 822\text{ кВт},$$

де D – витрата пари, кг/с; I'' – ентальпія насиченої пари, кДж/кг; $I_{жв}$ – ентальпія живильної води.

Отже, необхідна витрата біогазу при номінальній паропроодуктивності котла для заміни природного газу становитиме:

$$B = \frac{Q_{ка}}{Q_P^P \cdot \eta_{ка}} = \frac{822}{0,0166 \cdot 97,7} = 506,8 \frac{\text{м}^3}{\text{год}}.$$

Звідки стає очевидним, що пальникова система не потребує заміни.

Висновки. Детально проведено тепловий розрахунок котельного агрегату Haomat 5/12 з метою перевірки можливості його переведення на біогаз. Виконаний розрахунок підтвердив зазначену можливість, оскільки температурний режим поверхонь нагріву, теплові втрати та температура димових газів знаходяться практично на тому ж рівні, що й при роботі на природному газі.

Під час розрахунку визначено, що необхідна витрата біогазу при номінальній паропроодуктивності котла для заміни природного газу становить 506,8 м³/год. Отримані дані дозволяють зробити висновок, що пальникова система котла не потребує заміни чи реконструкції.

Перелік посилань:

1. Гелетука Г., Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні, практичний посіб. Київ, 2015, 71 с.
2. Голуб Г. А., Цивенкова Н. М., Чуба В. В., Кухарець С. М., Ярош Я. Д., і Терещук М. Б., «Дослідження ефективності роботи твердопаливного котла на рослинній біомасі,» Технологічний аудит та резерви виробництва, № 5/1(49), с. 22–28, 2019.
3. Ali S., Yan Q., Irfan M., and Fahad S. (2023). Relating biogas technology and environmental impact assessment: a roadmap towards clean energy for environmental sustainability. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30: 72832-72853. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27553-6>.
4. Artemenko Y., Zhuvahina I., Shcherbinin D., Yermolenko O., and Ishchuk O. (2025). Geographical and economic aspects of renewable energy development in Ukraine amid military threats. *Afric. J. Appl. Res.*, 11(1): 115-133. DOI: <https://doi.org/10.26437/ajar.v11i1.829>.
5. Vlasenko O., Nedbailo O., Kovalchuk I., & Balanda O. (2026). Comprehensive calculation analysis of the use of biogas as fuel for the "Invest" steam boiler. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(1), 8–19. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260501.02>.

¹ Магістрант 1 курсу Баланда О. Д.¹ Ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АНАЛІЗ ЕФЕКТИВНОСТІ ПЕРЕВЕДЕННЯ ПАРОВОГО КОТЛА NAGOMATIC 5/12 НА СПАЛЮВАННЯ БІОПАЛИВА

Постановка проблеми та її актуальність. Для ефективного впровадження біогазових технологій на конкретному промисловому об'єкті слід урахувати низку важливих факторів. Зокрема, необхідно забезпечити стабільне джерело біогазу, що відповідає допустимим параметрам, а також гарантувати його безперебійну поставку. Важливе значення мають фізико-хімічні характеристики біогазу, його початкова вартість, а також відповідність місцевим технічним і екологічним нормативам – насамперед щодо викидів вуглекислого газу (CO₂) та діоксиду сірки (SO₂) [1–3].

Аналіз останніх досліджень. Окремої уваги потребує аналіз обсягів постачання і споживання біогазу в розрізі добового, тижневого та місячного навантаження. Доцільно також провести комплексне техніко-економічне та екологічне порівняння традиційних джерел енергії та альтернативного варіанту на базі біогазу, з урахуванням специфіки об'єкта.

Важливим напрямом є розгляд комбінованого використання біогазу разом із природним газом. Такий підхід дозволяє уникнути складних процесів очищення біогазу або звести до мінімуму необхідні технічні доопрацювання енергетичного обладнання. Це сприяє підвищенню енергоефективності та скороченню витрат на традиційне паливо [1, 4].

Формулювання мети. Перевірка доцільності заміни частини природного газу, що споживається паровим котлом для забезпечення потреб виробництва АТ «Галичфарм» на спалювання біогазу з максимально можливою продуктивністю біогазової установки, запропонованої в даній роботі для повного/часткового покриття навантаження.

Основна частина. Існуючий газовий котел Nagomatic 5/12 має номінальну витрату природного газу $Q_{\text{газу}}=380 \text{ м}^3/\text{год}$, при цьому номінальна паропроductивність $D=5 \text{ т/год}$. Тож для забезпечення можливості роботи котла на біогазі був проведений тепловий розрахунок. Згідно отриманих результатів для заміни природного газу та збереження номінальної паропроductивності потрібно спалювати $506,8 \text{ м}^3/\text{год}$ біогазу. Вихідні дані для розрахунку наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Характеристики метантенку ТП 902-2-227

Номер типового проекту	Корисний об'єм, м ³	Діаметр, м	Висота, м		
			Верхнього конуса	Циліндричної частини	Нижнього конуса
ТП 902-2-227	1000	12,5	1,9	6,5	2,15

Річний вихід біогазу розраховується за формулами з врахуванням вмісту в гнойовій біомасі органічної речовини:

$$V_{\text{РІК.БІОГ}} = P_{\text{а.с.р.}} \cdot K \cdot \rho,$$

$$V_{\text{РІК.БІОГ}} = 1960,1 \cdot 1000 \cdot 0,3 \cdot 0,4 = 1\,314\,206 \text{ м}^3,$$

де $V_{\text{РІК.БІОГ}}$ – річний вихід біогазу, м³;

$P_{\text{а.с.р.}}$ – добова або річна кількість сухої речовини, кг;

ρ – вихід біогазу з 1 кг органічної речовини (приймаємо 0,4 м³);

K – коефіцієнт зброджування органічної речовини (0,3).

Річний вихід біогазу розрахований згідно технології процесу ко-ферментації стічних вод та твердих побутових відходів (трава, листя) разом з органічними побутовими відходами згідно параметрів запропонованої біогазової установки на базі АТ «Галичфарм» $V_{\text{РІК.БІОГ}} = 1\,314\,206 \text{ м}^3$.

Річна витрата природного газу для покриття виробничих потреб:

$$Q_{\text{РІК.ГАЗ}} = Q_{\text{ГАЗ}} \cdot 24 \cdot (t_{\text{річн}} - t_3) = 380 \cdot 24 \cdot (365 - 30) = 3\,055\,200 \text{ м}^3,$$

де $Q_{\text{ГАЗ}}$ – номінальна годинна витрата газу, м³/год; $t_{\text{річн}}$ – кількість днів в році;

t_3 – кількість днів простою котла в ремонті для заміни деталей.

Річна необхідна витрата біогазу для покриття виробничих потреб на біогазі:

$$Q_{\text{РІК.БІОГАЗ}} = Q_{\text{БІОГАЗ}} \cdot 24 \cdot (t_{\text{річн}} - t_3) = 506,8 \cdot 24 \cdot (365 - 30) = 4\,074\,672 \text{ м}^3.$$

Частка палива яку зможе замінити біогаз протягом року при спалюванні в котлі Nagomatic 5/12 для покриття виробничих потреб:

$$X_{\text{РІК.БІОГАЗ}} = 100\% \cdot (V_{\text{РІК.БІОГ}}/Q_{\text{РІК.БІОГАЗ}}) = 100\% \cdot (1\,314\,206/4\,074\,672) = 32,25\%.$$

Отже, стає очевидним, що буде застосовуватись почергове, або сумісне спалювання природного газу та біогазу.

Для розрахунку економії від впровадження заходу приймаємо орієнтовну вартість біогазу розраховану згідно технології процесу ко-ферментації стічних вод та твердих побутових відходів (трава, листя) разом з органічними побутовими відходами згідно параметрів запропонованої біогазової установки на базі АТ «Галичфарм» та діючий тариф на природний газ який закуповує підприємство. Тарифи наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Тарифи на енергоносії

Паливо	Одиниці виміру	Ціна за одиницю, грн
Природний газ	м ³	42
Біогаз	м ³	7

Економія (грн/рік) складає різницю між вартістю заміщеного газу та вартістю біогазу, тому окремо розраховуємо два варіанти роботи котла: виключно на природному газі та сумісному, або почерговому спалюванні з біогазом.

Річна вартість роботи котла Nagomatic 5/12 при спалюванні природного газу згідно наведеного тарифу:

$$Ц_{\text{РІК.ГАЗ}} = Q_{\text{РІК.ГАЗ}} \cdot T_{\text{ГАЗ}} = 3\,055\,200 \cdot 42 = 128\,318\,400 \text{ грн.}$$

де $T_{\text{ГАЗ}}$ – тариф на газ за 1 м³.

Річна вартість роботи котла Nagomatic 5/12 при сумісному/почерговому спалюванні природного газу та біогазу згідно наведеного тарифу:

$$\begin{aligned} Ц_{\text{РІК.БІОГАЗ}} &= Q_{\text{РІК.ГАЗ}} \cdot T_{\text{ГАЗ}} \cdot (100 - X_{\text{РІК.БІОГАЗ}})/100 + Q_{\text{РІК.БІОГАЗ}} \cdot T_{\text{БІОГАЗ}} \cdot X_{\text{РІК.БІОГАЗ}}/100 = \\ &= 3\,055\,200 \cdot 42 \cdot 0,6775 + 4\,074\,672 \cdot 7 \cdot 0,3225 = 100\,208\,960 \text{ грн,} \end{aligned}$$

де $T_{\text{БІОГАЗ}}$ – тариф на біогаз за 1 м^3 .

Економія складає: $E = \text{ЦРІК.ГАЗ} - \text{ЦРІК.БІОГАЗ} = 128\,318\,400 - 100\,208\,960 = 28\,109\,440 \text{ грн.}$

Проект із встановлення комплектації біогазової установки для підприємства АТ «Галичфарм» включає в себе капіталовкладення наведені в табл. 3.

Таблиця 3 – Капіталовкладення на впровадження заходу по виробництву біогазу

Позиція	Вартість, грн
Складське господарство	2000000
Приймальний резервуар (мішалка)	4500000
Сепаратор	500000
Метантенк	5000000
Газгольдер	7000000
Резервуар для зберігання компосту	2500000
Десульфуризатор	4000000
Складське господарство	2000000
Монтажні роботи	6000000
Загалом	33500000

Простий термін окупності даного заходу визначається із відношення зекономлених коштів до капіталовкладень і становить:

$$T_{\text{ОКУПНОСТІ}} = \frac{B}{E} = \frac{33\,500\,000}{28\,109\,440} = 1,19 \text{ років,}$$

де B – загальна вартість капіталовкладень на впровадження заходу по виробництву біогазу АТ «Галичфарм».

На основі проведених економічних розрахунків можна зробити висновок, що проведення реконструкції згідно технології процесу ко-ферментації стічних вод та твердих побутових відходів (трава, листя) разом з органічними побутовими відходами згідно параметрів запропонованої біогазової установки на базі підприємства АТ «Галичфарм» буде доцільним, оскільки термін окупності складає 1,19 років.

Висновки. Проведення реконструкції згідно технології процесу ко-ферментації стічних вод та твердих побутових відходів (трава, листя) разом з органічними побутовими відходами згідно параметрів запропонованої біогазової установки на базі АТ «Галичфарм» буде доцільним. Економія складає 28 109 440 грн, а термін окупності – 1,19 років.

Перелік посилань:

1. Vlasenko O., Nedbailo O., Kovalchuk I., & Balanda O. (2026). Comprehensive calculation analysis of the use of biogas as fuel for the "Invest" steam boiler. *International Science Journal of Engineering & Agriculture*, 5(1), 8–19. <https://doi.org/10.46299/j.isjea.20260501.02>
2. Гелету́ха Г., Підготовка та впровадження проектів заміщення природного газу біомасою при виробництві теплової енергії в Україні, практичний посіб. Київ, 2015, 71 с.
3. S., and Zahedi, R. (2024). Design, simulation and investigation of the tri-generation process of fresh water, power and biogas using solar thermal energy and sewage sludge. *Process Saf. Environ. Prot.*, 208: 242-257. DOI <https://doi.org/10.1016/j.cherd.2024.07.009>.
4. Ali S., Yan Q., Irfan M., and Fahad S. (2023). Relating biogas technology and environmental impact assessment: a roadmap towards clean energy for environmental sustainability. *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 30: 72832-72853. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-023-27553-6>

¹ Магістр, 1 курсу Олименко І. О.

Магістр, 1 курсу Орехова М. О.

¹ Доц., к.т.н. Пешко В. А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МАЛОВИТРАТНІ ПІДХОДИ ДО ВІДНОВЛЕННЯ ПРАЦЕЗДАТНОСТІ ПАРОВИХ ТУРБІН

Постановка проблеми та її актуальність. Більшість парових турбін теплових електростанцій України експлуатуються понад проєктний (парковий) ресурс, який для агрегатів потужністю 150–300 МВт зазвичай становить 100–170 тис. годин. За даними досліджень довговічності енергетичного обладнання [1–4], подальша експлуатація таких машин визначається не календарним віком, а реальним станом металу та історією навантажень.

У сучасних умовах дефіциту інвестицій та підвищеної маневреності роботи енергоблоків особливого значення набуває перехід від регламентної заміни елементів до концепції управління індивідуальним ресурсом. Такий підхід ґрунтується на аналізі напружено-деформованого стану (НДС), оцінці накопичення пошкоджень і використанні принципів механіки руйнування [2, 5].

Формулювання мети. Провести огляд літературних джерел для обґрунтування необхідності переходу до управління індивідуальним ресурсом парових турбін теплових електростанцій України та запропонувати маловитратні методи продовження їхнього строку служби в умовах маневреної експлуатації.

Основна частина. Парковий ресурс визначається нормативною документацією або заводом-виробником і базується на усереднених умовах експлуатації типової серії турбін. Він враховує найгірший сценарій роботи та закладає значний запас консервативності [1].

Натомість індивідуальний ресурс встановлюється для конкретного агрегату з урахуванням: фактичної кількості пусків і зупинок; температурної історії; результатів неруйнівного контролю; структурного стану металу; розрахункового накопичення втоми та повзучості.

Досвід обстежень енергоблоків 150–300 МВт показує, що фактичний індивідуальний ресурс часто перевищує парковий у 1,5–2 рази [3, 4]. Це пояснюється тим, що значна частина турбін працювала у базовому режимі з мінімальною кількістю пусків, а отже – з меншим темпом втомного пошкодження.

Таким чином, оцінка індивідуального ресурсу дозволяє уникнути передчасної заміни дороговартісних елементів і перейти до економічно обґрунтованого продовження строку служби.

Сучасна стратегія експлуатації базується на концепції живучості, відповідно до якої наявність дефекту не є автоматичною підставою для списання елемента. Визначальним фактором є швидкість розвитку тріщини та залишковий запас міцності, що оцінюється методами механіки руйнування [5].

Експериментальні дослідження показують, що:

1. Втомні пошкодження концентруються переважно у приповерхневому шарі товщиною сотні мікрон;

2. Пошкодження від повзучості у найбільш навантажених зонах рідко перевищують глибину 1–2 мм [2, 4].

Це відкриває можливість маловитратного відновлення шляхом механічного видалення пошкодженого шару (проточка, шліфування) у критичних зонах – галтелях,

осьових каналах, теплових канавках. Такий підхід дозволяє усунути зародкові тріщини та знизити концентрацію напружень без заміни ротора.

Ефективність локального видалення пошкодженого металу підтверджена практикою продовження ресурсу турбін серії К-200-130 та аналогічних агрегатів [3].

Найбільш інтенсивне накопичення пошкоджень у роторах і корпусах турбін пов'язане з дією термічних напружень, що виникають під час нерівномірного нагрівання або охолодження масивних деталей [1, 2].

Під час пуску гаряча пара контактує з холодним або частково прогрітим ротором. Поверхневі шари металу швидко розширюються, тоді як внутрішні залишаються холодними. Виникає значний температурний градієнт, що призводить до появи розтягувальних напружень у приповерхневій зоні.

При пусках з гарячого стану можливий зворотний ефект: подача відносно холодної пари на прогрітий метал спричиняє стискуючі напруження на поверхні та розтягувальні у глибині. Такі теплові удари є особливо небезпечними, оскільки прискорюють зародження мікротріщин [2].

Термічні напруження розподіляються нерівномірно. Максимальні значення фіксуються у зонах геометричних концентраторів: галтелі дисків; осьові канали; термокомпенсаційні канавки; перехідні радіуси.

У цих місцях еквівалентні напруження можуть перевищувати середні значення у 2–3 рази, що створює умови для втомного руйнування навіть при номінальних режимах роботи [3].

Накопичення пошкоджень визначається сумарною дією: малоциклової втоми (пуски-зупинки); повзучості (тривала робота при 480–540 °С); релаксаційних процесів у зонах тривалих напружень.

Особливо небезпечним є поєднання високих температур і частих маневрених режимів, що характерно для сучасної роботи енергоблоків в умовах нестабільного навантаження енергосистеми [4].

Зниження температури свіжої пари на 20–25 °С суттєво зменшує швидкість повзучості металу, що може підвищити довговічність на десятки відсотків [2]. Незначне зменшення ККД у цьому випадку компенсується приростом ресурсу.

Оптимізація зусиль затяжки шпильок фланцевих з'єднань дозволяє знизити локальні напруження у корпусах та зменшити ризик утворення тріщин.

Під час ремонтів можливе:

1. Усунення термокомпенсаційних канавок шляхом проточки до гладкого профілю;
2. Збільшення радіусів галтелей;
3. Видалення приповерхневого пошкодженого шару.

Такі заходи дозволяють зменшити концентрацію напружень на 20–30 % і збільшити допустиму кількість пусків [3].

Одним із найефективніших маловитратних методів є зміна схеми подачі пари на ущільнення під час пусків. Використання пари з температурою, близькою до температури металу (наприклад, від сусіднього працюючого блоку), дозволяє зменшити термічні напруження більш ніж на 50 % [4]. Для прикладу на рис. 1 представлено динаміка зміни еквівалентних напружень та температури металу в роторі високого тиску турбіни потужністю 325 МВт при пуску з холодного стану металу для двох варіантів подачі пари [6]. Аналіз показує, що в базовій конструкції найбільш критичний тепловий удар виникає в зоні передніх ущільнень через 183 хвилини внаслідок конденсації гарячої пари. Водночас запропонована модифікована конструкція забезпечує більш рівномірне нагрівання цієї зони, що дозволяє значно знизити загальний рівень термічних напружень під час пуску (максимум фіксується на 116-й хвилині).

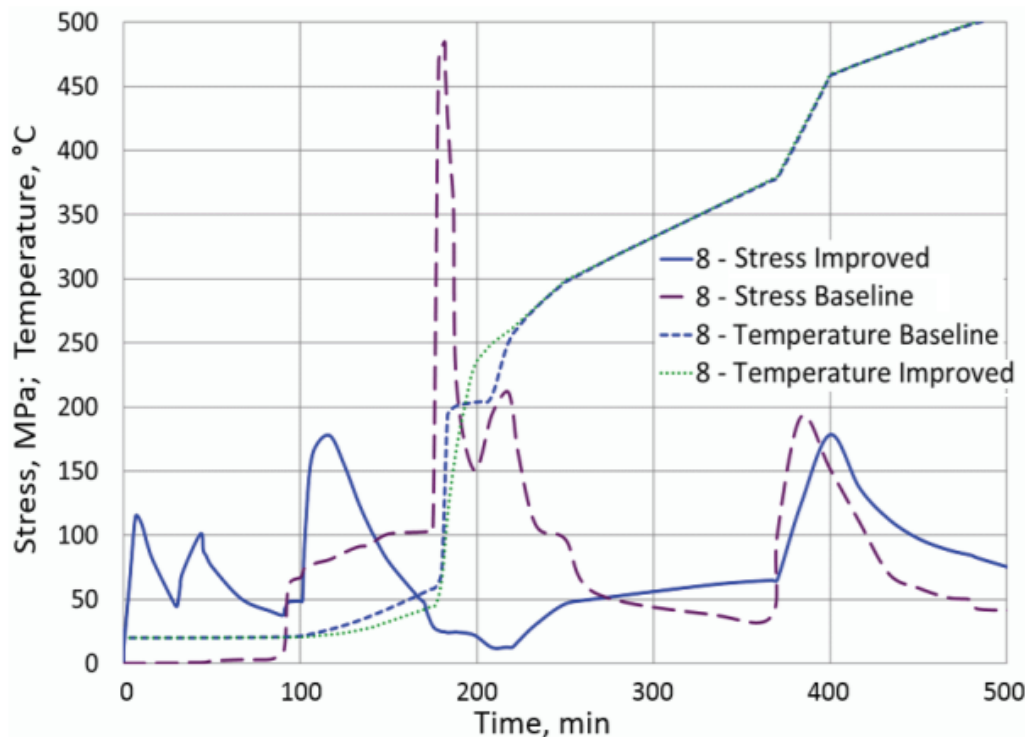


Рисунок 1 – Динаміка зміни еквівалентних напружень та температури металу в досліджуваній області ротора високого тиску турбіни потужністю 325 МВт при пуску з холодного стану металу [6]

Висновки. Експлуатація парових турбін в Україні в сучасних умовах вимагає переходу від нормативного підходу до управління індивідуальним ресурсом обладнання. Основним фактором прискореного зношування є термічні напруження, що особливо загострилися через маневрений режим роботи енергоблоків після 2022 року.

Аналіз показує, що значна частина пошкоджень має локальний характер, що дозволяє застосовувати маловитратні методи відновлення – видалення пошкоджених шарів металу, оптимізацію температурних режимів та вдосконалення теплових схем. Реалізація таких заходів забезпечує продовження ресурсу турбін, підвищення надійності роботи та економічну доцільність експлуатації в умовах обмежених інвестицій.

Перелік посилань:

1. Енергетична стратегія України до 2050 року. – Київ: Міністерство енергетики України, 2023. <https://www.mev.gov.ua/reforma/enerhetychna-stratehiya-0>
2. Звіт про стан теплової генерації України у 2024–2025 рр. – Київ: НЕК «Укренерго», 2025. <https://www.ukrenergo.ua/uk/analitika/>
3. Барило І. В., Коваленко О. М., Тарасенко С. П. Досвід продовження ресурсу турбін К-200-130 на ТЕС України // Енергетика та електрифікація. – 2018. – № 6. – С. 12–18. <https://energetyka-elektryfikacia.pl.ua/>
4. Кравченко О. В., Литвиненко П. М., Серeda В. А. Аналіз пошкоджуваності роторів 150–300 МВт при маневрених режимах експлуатації // Проблеми машинобудування. – 2020. – Т. 23, № 4. – С. 45–53. <https://www.promislovesti.org.ua/journal-pmi/>
5. Anderson T. L. Fracture Mechanics: Fundamentals and Applications. – 4th ed. – Boca Raton: CRC Press, 2017. – 760 p. <https://www.crcpress.com/Fracture-Mechanics-Fundamentals-and-Applications/Anderson/p/book/9781138070694>
6. Bakhmutska Ju., Goloshchapov V., Kochurov R. Rotor Heating Conditions Influence on the Thermostructural State and Lifetime of the 325 MW Steam Turbine During Start-Ups // Bulletin of NTU "KhPI", 2017, № 39 (1261). – P. 89-94. <https://doi.org/10.20998/2078-9130.2017.39.115774>

¹ Аспірант 1 курсу Сліжевський К. Д.

¹ Проф., д.т.н. Недбайло О. М.

<https://scholar.google.com/citations?user=qTHpcy0AAAAJ&hl=ru>

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.

<https://scholar.google.com/citations?user=m7CSuP0AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДИНАМІЧНА МОДЕЛЬ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ СОНЯЧНОГО ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ІЗ СЕЗОННИМ ҐРУНТОВИМ АКУМУЛЮВАННЯМ ТЕПЛОТИ

Постановка проблеми та її актуальність. Системи сонячного теплопостачання із сезонним акумулюванням теплоти (Seasonal Thermal Energy Storage, STES) розглядаються як один із перспективних напрямів декарбонізації теплового сектору, причому за результатами дослідження М. Gao та ін. досягнуто сонячної частки 42 % при ефективності накопичувача 0,89 [2, с. 33–41], що підтверджує доцільність інтеграції великих сезонних акумуляторів у структуру теплопостачання.

Для кліматичних умов України технологічно доцільним є сезонний ґрунтовий акумулятор теплоти (Borehole Thermal Energy Storage, BTES), ефективність якого визначається просторово-часовим розподілом температур у ґрунтовому масиві, а не лише інтегральним енергетичним балансом.

За даними Мартазінової В., Кихтенка Ю., Шпиг В. річна сума сонячної радіації в Україні становить 4170 МДж/м² [7, с. 54–60], тоді як технічний потенціал сонячної енергії оцінюється на рівні 1400–1500 кВт год/м²·рік [9, с. 2], що створює передумови для сезонного акумулювання теплоти з метою компенсації річної нерівномірності генерації.

Отже, **актуальність** дослідження обумовлена необхідністю адаптації моделей SDH-систем до реальних кліматичних умов України, які характеризуються вираженою сезонною мінливістю температури повітря (від –2,1 °С у січні до +22,1 °С у липні) та річною сумою сонячної радіації близько 4170 МДж/м² (2001–2020 рр.) [7, с. 54; 8], що зумовлює істотну нерівномірність генерації та споживання теплоти й потребує використання динамічних моделей для коректної оцінки ефективності сезонного акумулювання.

Аналіз останніх досліджень. У роботах Huang В. та ін. [1, с. 6–9] і Gao М. та ін. [2, с. 3–5] застосовано інтегральні 0D-моделі, які базуються на енергетичному балансі та дозволяють визначити загальну теплопродуктивність системи, проте не враховують просторовий розподіл температур у ґрунті.

В свою чергу, Zhao Р. та ін. [3, с. 412–418] використали тривимірне моделювання теплопереносу, що забезпечує високу точність, однак супроводжується значними обчислювальними витратами при річному розрахунку.

Натомість, дослідження Basok В., Pavlenko А., Nedbailo О. та ін. [6, с. 274–281] доводять адекватність двомірного осесиметричного підходу для опису теплопереносу в ґрунтовому масиві за радіального характеру теплового розтікання, що забезпечує компроміс між фізичною коректністю та обчислювальною ефективністю.

Метою роботи є розроблення динамічної моделі енергоефективності системи сонячного теплопостачання із сезонним ґрунтовим акумулюванням теплоти на основі двомірного нестационарного рівняння теплопровідності з використанням кліматичних даних України та чисельною реалізацією методом скінченних різниць для річного циклу.

Основна частина. У моделі використано кліматичні дані України за період 2001–2020 рр. [7, с. 58–60] та середньомісячні температури повітря Центральної

геофізичної обсерваторії ім. Б. Срезневського [8], що дозволяє сформувати часову залежність граничного теплового потоку від сонячного поля та задати теплообмін на поверхні ґрунту.

Розрахункову область прийнято осесиметричною з радіусом 15 м та глибиною 30 м, що відповідає типовим параметрам ґрунтових сезонних акумуляторів, а теплофізичні параметри ґрунту – сталими ($\lambda = 1.8$ Вт/(м К), $\rho = 1800$ кг/м³, $c = 840$ Дж/(кг К)) [4; 6].

Теплоперенос у ґрунтовому масиві описується двовірним осесиметричним нестационарним рівнянням теплопровідності

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \alpha \left(\frac{\partial^2 T}{\partial r^2} + \frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r} + \frac{\partial^2 T}{\partial z^2} \right), \quad (1)$$

де α – коефіцієнт температуропровідності ґрунту (м²/с), що розв’язується чисельно методом скінченних різниць з часовим кроком, тим самим забезпечуючи стійкість розрахунку протягом річного циклу.

$T(r, z, t)$ – температура ґрунту у точці з радіусом r , глибиною z в момент часу t ;

$\frac{\partial T}{\partial t}$ – швидкість зміни температури в часі (°С/с або К/с);

$\frac{\partial^2 T}{\partial r^2}$ – радіальна дифузія тепла, тобто як температура змінюється по радіусу від центру акумулятора;

$\frac{1}{r} \frac{\partial T}{\partial r}$ – осесиметричний член, який враховує, що площа циліндричного шару зростає з радіусом, без якого модель була б просто прямокутною 2D;

$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}$ – вертикальна дифузія тепла, тобто як температура змінюється по глибині ґрунту.

Гранична умова на верхній межі формувалася за залежністю $qt = \eta G(t)$, де $G(t)$ – сумарна сонячна радіація визначена з табличних кліматичних даних [7], а коефіцієнт перетворення сонячної енергії на теплову приймався рівним $\eta = 0,62$. на нижній та радіальній межах задавалася умова теплової ізоляції. На нижній та радіальній межах встановлювалася умова теплової ізоляції, тобто відсутність теплового потоку через ці межі ($\frac{\partial T}{\partial n} = 0$), що моделює ізольоване дно та стінки ґрунтового акумулятора.

Для кількісної оцінки річної теплопродуктивності системи накопичена теплова енергія ґрунтового акумулятора визначається інтегруванням по об’єму:

$$Qt = \int_V \rho c (T - T_0) dV, \quad (2)$$

що дозволяє врахувати просторовий розподіл температур і оцінити накопичену теплоту протягом року на основі чисельно розрахованого температурного поля без застосування додаткових емпіричних коефіцієнтів (див. рис. 1).

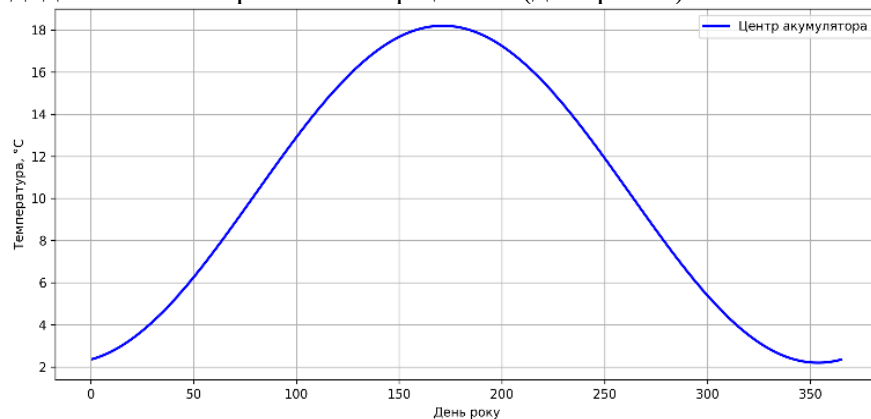


Рисунок 1 – Річна динаміка температури в центрі ґрунтового акумулятора ($r = 0$, $z = 15$ м), отримана методом скінченних різниць при $\Delta t = 0,5$ доби з добовою дискретизацією сонячної радіації

Як видно з рисунка, максимальна температура в центрі акумулятора досягається наприкінці теплого періоду року, що відповідає фазовому зсуву теплової хвилі в ґрунті та підтверджує адекватність чисельної двовірної моделі сезонному процесу акумулювання.

Таким чином, чисельне моделювання показало, що при площі сонячного поля 200 м² річне надходження теплоти відповідає кліматичному потенціалу України [9, с. 2], а річна теплопродуктивність системи становить 143,6 МВт·год при ККД 0,62.

Висновки. Встановлено, що двовірна осесиметрична нестационарна модель фізично коректно відтворює сезонне акумулювання теплоти в ґрунтовому масиві, демонструє оптимальний баланс між точністю просторово-часового розподілу температур і обчислювальною ефективністю, перевищує інформативність інтегральних 0D-моделей та значно скорочує витрати порівняно з тривимірним підходом, що підтверджується чисельними результатами, які показали можливість акумулювання до 78 % річного надходження теплоти при середньому прирості температури 12–16 °С для системи площею 200 м² та дозволили оцінити річну теплопродуктивність, підтверджуючи практичну доцільність застосування сезонного ґрунтового акумулювання теплоти для планування ефективних сонячних теплових систем.

Перелік посилань:

1. Huang Bo, He Mingfei, Song Bo. (2025). Design of Solar District Heating System With Seasonal Thermal Energy Storage in Northern China and Its Economic Analysis. *Journal Thermal Science and Engineering Applications* 17(12): 121001 (13 pages). <https://doi.org/10.1115/1.4069284>.
2. Gao Meng, Furbo Simon, Xiang Yutong, Fan Jianhua, Wang Dengjia, Tian Zhiyong. (2024). Solar district heating system with large heat storage: Energy, exergy, economic and environmental (4E) analysis. *Energy Conversion and Management* 314, 1-24. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2024.118709>.
3. Zhao Pengxiang, Li Zhen Wang Nan, Zhou Xichao, Cong Lin, Yu Qiang. (2021). Study on the Dynamic Performance of Solar Space Heating System with Seasonal Thermal Energy Storage. *IEEE 4th International Electrical and Energy Conference (CIEEC)* (Wuhan, China, 28-30 May 2021). <https://doi.org/10.1109/CIEEC50170.2021.9510974>.
4. Boris Basok, Anatoliy Pavlenko, Ihor Bozhko, Maryna Novitska, Aleksandr Nedbailo, Hanna Koshlak, Myroslav Tkachenko (2022). Analysis of the Energy Efficiency of the Earth-To-Air Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 24. 202–213. <https://doi.org/10.54740/ros.2022.015>.
5. Nedbailo Oleksandr, Basok Boris, Vlasenko Olha, Marteniuk Volodymyr, Khybina Maryna, Belyaeva Tetyana. (2025). Heat Regime of the Building Envelopes Using a Thermal Barrier. *Civil Engineering and Architecture* 13(3A), 2249-2256. <https://doi.org/10.13189/cea.2025.131306>.
6. Basok B., Pavlenko A., Nedbailo O., Bozhko I., Moroz M. (2023). A Two-dimensional Numerical Model of Heat Exchange in the Soil Massif During the Operation of a Shallow Horizontal Soil Heat Exchanger. *Rocznik Ochrona Środowiska*, 25, 274-281. <https://doi.org/10.54740/ros.2023.029>.
7. Мартазінова В., Кихтенко Ю., та Шпиг В. (2025). Оцінка щомісячної кількості прямої та сумарної сонячної радіації в Україні під час глобального потепління на початку ХХІ століття. *Геофізичний журнал*, 47 (3), 54-68. <https://doi.org/10.24028/gj.v47i3.321745>.
8. Центральна геофізична обсерваторія імені Бориса Срезневського. *Середня місячна температура повітря по Україні*. <https://cgo-sreznevskyi.kyiv.ua/uk/diialnist/klimatolohichna/klimatychni-danni-po-ukraini>.
9. Redko Ihor, Redko Oleksandr I., Redko Andriy, Bakumenko Nina, Ujma Adam, Zadiranov Vadym. (2025). Estimation of the energy potential of solar radiation and comparison with normative data for Ukraine. *Meteorology Hydrology and Water Management* 13(1/2025), 1-14. <https://doi.org/10.26491/mhwm/208954>.

¹ Аспірант 2 курсу Джежулей В. О.

¹ Доц., к.т.н. Сірий О. А.

<https://scholar.google.com/citations?user=FmKF8DsAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИЗНАЧЕННЯ КІНЕТИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ТЕРМІЧНОЇ КОНВЕРСІЇ ПАЛИВНИХ СУМІШЕЙ ПІСНОГО ВУГІЛЛЯ З РОСЛИННОЮ БІОМАСОЮ

Постановка проблеми. Нерегулярне постачання антрациту та пісного вугілля з Донецького вугільного басейну, значна частина якого перебуває на тимчасово окупованих територіях, змушує шукати альтернативні рішення для забезпечення паливного балансу теплоелектростанцій. Одним з можливих рішень є часткова заміна вугілля місцевою твердою біомасою – соломною зернових культур та лузгою соняшнику, запаси яких в Україні оцінюються у 30 млн т у.п./рік [1]. Ключовою особливістю таких сумішей є те, що їхні характеристики можуть мати нелінійний характер комбінації властивостей окремих компонентів – під час спільного нагрівання можуть виникати синергетичні або антагоністичні ефекти взаємодії [2]. Цілеспрямовані термогравіметричні дослідження ТГА дадуть можливість, кількісно описати кінетику кожної стадії термічної конверсії для прогнозування поведінки сумішей.

Аналіз останніх досліджень. Встановлено, що при правильно підбраному складі суміші виникає синергетичний ефект, який покращує ефективність вигорання, тоді як незбалансовані суміші можуть спричинити небажані температурні профілі в камері згоряння, що вказує на наявність міжкомпонентної взаємодії через газову фазу та контактний вплив частинок [3–4]. Водночас більшість наявних досліджень термогравіметричного аналізу (ТГА) стосується деревної біомаси або промислових відходів у поєднанні з енергетичним вугіллям; кінетичні параметри стадій термічної конверсії для сумішей пісного вугілля з сільськогосподарськими залишками – соломною зернових та лузгою соняшнику – у відкритих джерелах фактично відсутні. Не встановлено також, як характер і масштаб синергетичних ефектів залежать від конкретного виду біомасового компонента, що унеможливорює обґрунтований вибір паливної суміші для проектування режимів спалювання.

Формулювання мети. Визначення кінетичних параметрів стадій термічної конверсії пшеничної соломи, лузги соняшнику, пісного вугілля та їхніх двокомпонентних сумішей (50/50 за масою) методом аналізу результатів ТГА із застосуванням апроксимації Старінка, та виконання порівняльної оцінки синергетичних ефектів паливних сумішей.

Основна частина. Для дослідження було обрано п'ять зразків: пелетована солома пшениці, пелетована лузга соняшнику, пісне вугілля, а також суміші кожного виду біомаси з вугіллям у співвідношенні 50/50 за масою. ТГА проведено на установці Q-50. У тиглі компоненти розміщувалися пошарово: вугілля знизу, біомаса зверху – для моделювання переважно газофазного механізму взаємодії [4]. Межі стадій визначалися за характерними точками кривих диференціальної термогравіметрії (ДТГ).

Для розрахунку кінетики горіння застосовано метод апроксимації Старінка [5]:

$$\ln \left[\frac{-\ln(1-\alpha)\beta}{T^{1.92} \cdot e^{-0.312}} \right] = \ln \left(A \left(\frac{R}{E} \right)^{0.92} \right) - 1.0008 \frac{E}{R T} \quad (1)$$

де α – ступінь конверсії; T – температура, К; A – передекспоненційний множник, 1/с; E – енергія активації, Дж/моль; R – універсальна газова стала; β – швидкість нагріву, К/с.

Графік побудований за залежністю (1) дає можливість достатньо близько апроксимувати серії даних прямими, що дозволяє визначити кінетичні константи: енергію активації E , вільний член, передекспоненційний множник A . Метод не потребує ітерацій та стійкий до шуму в ДТГ-кривих.

Таблиця 1 – Кінетичні параметри стадій термічної конверсії

Стадія / зразок	A , 1/с	E , Дж/моль	Темп. інтервал, °С
Зневоднення			
Вугілля	5667,595255	36595,93109	33-158
Солома	3487,83305	35557,45404	29-121
Лушпиння	2685,087942	35690,3791	34-139
Вугілля/Лушпиння	4973,384099	36728,85615	33-135
Вугілля/Солома	8684,407269	36230,38717	31-120
Вихід летких речовин			
Вугілля	1424294,724	136439,2682	451-761
Солома	10833,03114	68655,79444	122-372
Лушпиння	8890,632986	67135,46404	140-377
Вугілля/Лушпиння (фракція лушпиння)	7081,347538	66371,14494	136-373
Вугілля/Лушпиння (фракція вугілля)	125952,9485	120338,72	520-710
Вугілля/Солома (фракція соломи)	7743,852807	67567,4705	121-376
Вугілля/Солома (фракція вугілля)	149974,3654	122257,8256	507-760
Вигорання коксу			
Вугілля	-	-	762-791
Солома	6111180,505	120596,2624	373-520
Лушпиння	101745424,9	139255,6179	378-550
Вугілля/Лушпиння (фракція лушпиння)	220395,7189	105567,4225	374-519
Вугілля/Лушпиння (фракція вугілля)	-	-	711-791
Вугілля/Солома (фракція соломи)	2662732,216	117904,5299	377-506
Вугілля/Солома (фракція вугілля)	-	-	761-791

Для виявлення ефектів міжкомпонентної взаємодії кінетичні параметри кожної паливної суміші зіставлялися з відповідними параметрами індивідуальних компонентів. Оскільки в сумішах стадії деволатилізації та вигорання коксу проявляються роздільно для кожного компонента, порівняння проводилося парно: параметри біомасового та вугільного субпроцесів у суміші – із параметрами тих самих матеріалів при роздільному нагріванні.

На стадії сушки відхилення енергії активації обох сумішей від адитивних значень є мінімальними: для системи вугілля/солома – 36 230 Дж/моль проти адитивного 36 077 Дж/моль, для системи вугілля/лушпиння – 36 729 Дж/моль проти 36 143 Дж/моль. Отримані відхилення знаходяться в межах похибки методу, що свідчить про відсутність значущої міжкомпонентної взаємодії на цій стадії.

На стадії виходу летких речовин спостерігається якісно різна поведінка для біомасового та вугільного субпроцесів. Для біомасових компонентів обох сумішей фіксується слабкий позитивний синергетичний ефект: енергія активації соломи у складі суміші знижується з 68 656 до 67 567 Дж/моль, лузги соняшнику – з 67 135 до 66 371 Дж/моль. Значно виразніше ефект спостерігається для вугільного компонента: його енергія активації знижується з 136 439 Дж/моль при роздільному нагріванні до 122 258 Дж/моль у системі вугілля/солома та до 120 339 Дж/моль у системі вугілля/лушпиння. Цей виражений позитивний синергетичний ефект зумовлений впливом летких продуктів піролізу біомаси на реакційну здатність вугільного матеріалу, що активує та прискорює виділення його власних летких.

На стадії вигорання коксо-зольного залишку вугільний компонент у складі обох сумішей не утворює виокремленої стадії, що свідчить про суттєву інтенсифікацію його окиснення ще на попередній стадії під впливом біомасового компонента. Для біомасових компонентів ефекти різняться за величиною: коксо-зольний залишок соломи у суміші характеризується незначним зниженням енергії активації – з 120 596 до 117 905 Дж/моль, тоді як для лузги соняшнику зафіксовано виражений позитивний синергетичний ефект — зниження з 139 256 до 105 567 Дж/моль. Різниця між двома системами може бути пов'язана з вищим вмістом мінеральних компонентів у золі лузги соняшнику, які каталізують окиснення залишкового вуглецю.

Висновки. Встановлено, що характер міжкомпонентної взаємодії у сумішах біомаси з вугіллям залежить як від стадії термічної конверсії, так і від виду біомасового компонента. Зафіксовано позитивний синергетичний ефект на стадіях виходу летких та вигорання коксового залишку паливних сумішей. Отримані кінетичні параметри можуть бути використані для верифікації CFD-моделей факельних котлів та слугувати основою для подальшого розширення досліджень на інші види сільськогосподарської біомаси.

Перелік посилань:

1. Железна Т., Драгнев С., Баштовий А. Можливості заготівлі агробіомаси та виробництва біопалив з неї комунальними підприємствами в Україні. Теплофізика та теплоенергетика. 2019. Т. 41, № 2.
2. Tillman D., Duong D., Harding N. Solid Fuel Blending. Butterworth-Heinemann, 2012. 285 p.
3. Wang X., Ren D. Analysis of ash deposition mechanisms during biomass-coal cofiring. Fuel. 2012. Vol. 96. P. 1–7.
4. Бондзик Д., Дунаєвська Н. Дослідження взаємодії вугілля і біомаси при спільній термічній конверсії за різних способів підготовки проб для ТГА. ІТЕТ НАН України, 2022.
5. Starink M. J. The determination of activation energy from linear heating rate experiments. Thermochimica Acta. 2003. Vol. 404. P. 163–176.

¹ Аспірант 2 курсу Сепік А. В.

¹ Доц., к.т.н. Пешко В. А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРАХУНОК ГРАНИЧНИХ УМОВ ТЕПЛООБМІНУ ПРОТОЧНОЇ ЧАСТИНИ ЦИЛІНДРА СЕРЕДНЬОГО ТИСКУ ТУРБІНИ К-200-130

Постановка проблеми та її актуальність. Парова турбіна типу К-200-130 широко використовується на теплових електростанціях України та нині працює переважно в маневрових режимах. Такі режими спричиняють значні тепломеханічні навантаження на елементи турбіни, зокрема на ротор середнього тиску, який є одним із найбільш навантажених вузлів і часто визначає залишковий ресурс установки. Для оцінки довговічності ротора необхідно визначити його тепловий стан, що потребує достовірного задання граничних умов теплообміну між паровим потоком у проточній частині та металом ротора.

Аналіз останніх досліджень. Проблемам моделювання проточних частин турбін та визначення теплового стану їх елементів присвячено багато досліджень. У монографії О. Усатого [1] наведено методику всережимної оптимізації проточних частин турбін, що дозволяє визначати розподіл термодинамічних параметрів робочого тіла та використовувати їх для оцінки теплових навантажень елементів турбіни.

У роботі О. Авдєєвої та ін. [2] досліджено конструкції ступенів парових турбін із застосуванням чисельного моделювання, що дозволяє уточнювати параметри потоку пари та підвищувати ефективність роботи турбін.

Застосування методів планування експерименту для створення макромоделей елементів проточної частини розглянуто у роботі О. Усатого та ін. [3]. Запропонований підхід дозволяє підвищити точність розрахунків характеристик потоку пари.

У роботах, присвячених довговічності турбін, значну увагу приділено дослідженню термічних напружень і малоциклової втоми матеріалів роторів [4–5]. Для побудови моделей напружено-деформованого стану необхідно визначати достовірні граничні умови теплообміну, що формуються параметрами потоку пари в проточній частині турбіни.

Таким чином, визначення граничних умов теплообміну на поверхні ротора середнього тиску є важливою задачею для оцінки теплового стану та залишкового ресурсу турбін.

Формулювання мети. Метою дослідження є визначення граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні ротора середнього тиску турбіни К-200-130 та оцінка його теплового стану на основі розрахункових коефіцієнтів тепловіддачі.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі задачі: виконати аналіз термодинамічних і кінематичних параметрів пари в проточній частині циліндра середнього тиску; провести зонування поверхні ротора за умовами теплообміну; визначити коефіцієнти тепловіддачі для різних ділянок поверхні ротора; сформулювати систему граничних умов для подальшого розв'язання задачі теплопровідності.

Основна частина. Ротор середнього тиску турбіни К-200-130 являє собою суцільнокований вал із дисками ступенів, на яких розміщені робочі лопатки проточної частини. Об'єктом дослідження є проточна частина циліндра середнього тиску турбіни К-200-130, яка складається з одинадцяти ступенів тиску (з 13 по 23), між якими розташовані діафрагми з сопловими апаратами та системи ущільнень. Геометрія ротора формує декілька характерних зон теплообміну, зокрема міжлопаткові поверхні дисків, торцеві поверхні

ступенів, галтелі переходу між валом і дисками та ділянки діафрагмових ущільнень. У цих областях умови обтікання паровим потоком істотно відрізняються, що зумовлює різну інтенсивність теплообміну між паром та металом ротора.

У межах цієї частини турбіни розташовано чотири нерегульовані відбори пари, три з яких знаходяться безпосередньо в проточній частині, а один – у вихлопному патрубку.

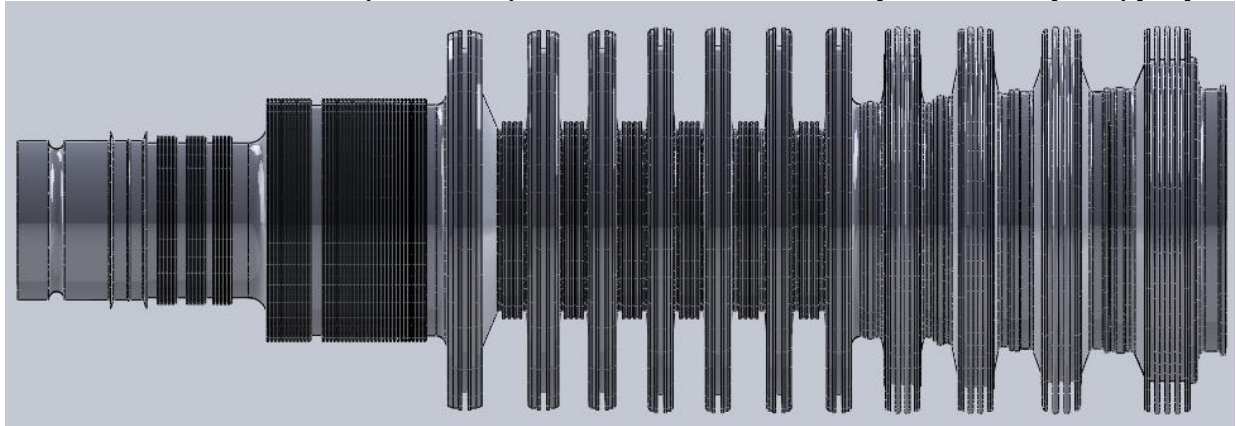


Рисунок 1 – Модель проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130

Для визначення та аналізу умов теплообміну зовнішню поверхню ротора було поділено на 65 характерних областей.

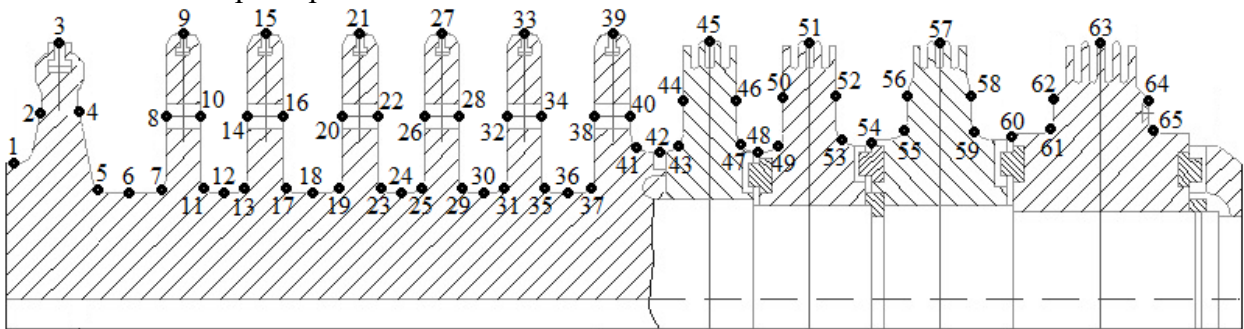


Рисунок 2 – Характерні області дослідження граничних умов теплообміну на зовнішній поверхні ротора середнього тиску турбіни К-200-130

Таке зонування дозволяє врахувати особливості обтікання різних ділянок ротора паровим потоком. Виділені області були об'єднані у п'ять основних груп:

- міжлопаткові поверхні дисків ротора (області 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57, 63 рис. 2);
- торцеві поверхні дисків ступенів (2, 4, 8, 10, 14, 16, 20, 22, 26, 28, 32, 34, 38, 40, 44, 46, 50, 52, 56, 58, 62, 64);
- ділянки діафрагмових ущільнень (6, 12, 18, 24, 30, 36, 42, 48, 54, 60);
- ліві галтелі дисків (1, 7, 13, 19, 25, 31, 37, 43, 49, 55, 61);
- праві галтелі дисків (5, 11, 17, 23, 29, 35, 41, 47, 53, 59, 65).

Для визначення коефіцієнтів тепловіддачі використовувалися експериментальні рівняння подібності, що базуються на використанні безрозмірних критеріїв теплопереносу – чисел Нуссельта, Рейнольдса та Прандтля. У розрахунках враховувалися швидкісні характеристики потоку пари, геометричні параметри ступенів, а також вплив обертання ротора.

Зокрема, для міжлопаткових поверхонь дисків ротора (області 3, 9, 15, 21, 27, 33, 39, 45, 51, 57, 63 на рис. 1) використано наступне рівняння подібності:

$$Nu = 0,0145 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43} \cdot \beta^{1,54} \cdot K_{Tu} \cdot K_{Ob} \cdot \left(\frac{h}{b}\right)^{-0,7} \cdot \left(\frac{t}{b}\right)^{-0,2} \quad (1)$$

де Nu , Re , Pr – числа подібності Нуссельта, Рейнольдса та Прандтля

Результати проведених розрахунків коефіцієнтів тепловіддачі для поверхонь ротора середнього тиску турбіни К-200-130 представлено на рис. 3.

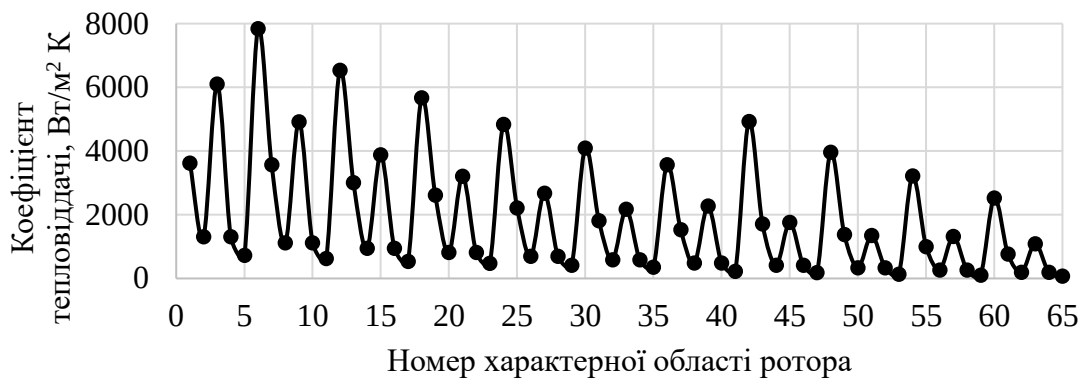


Рисунок 3 – Розрахункові коефіцієнти тепловіддачі на зовнішніх поверхнях ротора середнього тиску турбіни К-200-130

Аналіз отриманих результатів показав, що коефіцієнти тепловіддачі змінюються вздовж осі ротора і мають тенденцію до зниження від входу до вихлопу. Це пояснюється зменшенням тиску і густини пари у процесі її розширення в проточній частині турбіни.

Разом з тим у зоні останніх ступенів спостерігається локальне зростання коефіцієнтів тепловіддачі. Такий ефект пов'язаний зі зміною геометрії проточної частини та підвищеною турбулентністю потоку.

Отримані граничні умови можуть бути використані для розв'язання нестационарної задачі теплопровідності та визначення температурного поля ротора. Результати такого розрахунку є основою для подальшого аналізу термонапруженого стану ротора та оцінки його довговічності.

Висновки. У результаті дослідження визначено граничні умови теплообміну на зовнішній поверхні ротора середнього тиску турбіни К-200-130.

Поверхню ротора поділено на 65 характерних областей, що дозволило врахувати особливості теплообміну в різних зонах проточної частини. Для кожної області визначено коефіцієнти тепловіддачі на основі рівнянь подібності.

Встановлено, що коефіцієнти тепловіддачі зменшуються вздовж осі ротора від входу до вихлопу через зниження тиску та густини пари, однак у зоні останніх ступенів спостерігається локальне зростання інтенсивності теплообміну.

Отримані результати можуть бути використані як вихідні дані для розв'язання нестационарної задачі теплопровідності та подальшого аналізу термонапруженого стану ротора з метою визначення небезпечних зон і подовження ресурсу турбіни.

Перелік посилань:

1. Усатий О. П. Всережимна багатопараметрична багатокритеріальна оптимізація проточної частини турбін в інтегрованому інформаційному просторі: дис. д-ра техн. наук: 05.05.16. Турбомашини та турбоустановки. Усатий Олександр Павлович; М-во освіти і науки України, Нац. техн. ун-т України «Харківський політехнічний інститут». Харків, 2013. 364 с.
2. Avdeeva O., Usatyy O., Vodka O. Development of the typical design of the high-pressure stage of a steam turbine. *Advances in Design, Simulation and Manufacturing III*. Cham: Springer, 2020. P. 289–298. *Lecture Notes in Mechanical Engineering*.
3. Usatyy O., Avdeeva O., Maksuta D., Tuan P. Experience in applying DOE methods to create formal macromodels of characteristics of elements of the flowing part of steam turbines. *AIP Conference Proceedings*. 2020. Vol. 2047. Article 020025.
4. Peshko V. A., Bovsunovskiy A. P. Patterns of Growth of an Internal Annular Crack Under the Influence of Thermal Stresses During Turbine Startup. *Strength of Materials*. 2024. № 6(55). P. 1143-1156.
5. Azeez A., Eriksson R., Leidermark D., Calmunger M. Low cycle fatigue life modelling using finite element strain range partitioning for a steam turbine rotor steel. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*. 2020. Vol. 107. Article 102510.

¹ Аспірант 2 курсу Ткаченко М. В.

¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ЛАБОРАТОРНОЇ УСТАНОВКИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах трансформації енергетичного сектору України та необхідності зменшення споживання природного газу актуальним є впровадження альтернативних систем теплозабезпечення. Значна частка паливних ресурсів витрачається на комунальний сектор, який характеризується високою зношеністю обладнання та низькою енергоефективністю. Перспективним рішенням є використання теплових насосів, що забезпечують опалення й охолодження приміщень та мають високий коефіцієнт перетворення енергії. В умовах дефіциту генеруючих потужностей особливого значення набуває раціональне використання електроенергії під час їх експлуатації.

Для підвищення ефективності застосування теплових насосів необхідно досліджувати їхні показники в різних режимах роботи – за змінних температурних умов, часткового навантаження та в реверсивному режимі. Аналіз коефіцієнтів ефективності (COP, EER, SPF) дозволяє оптимізувати режими функціонування системи та зменшити експлуатаційні витрати.

Аналіз останніх досліджень. Тепловий насос є сучасним теплогенеруючим обладнанням, яке відзначається високою енергоефективністю, екологічністю, простотою автоматизації та зручністю експлуатації. Завдяки можливості використання різних джерел низькопотенційної теплоти він є гнучким технічним рішенням із високим рівнем експлуатаційної надійності [1].

Сукупність цих переваг зумовила активне поширення теплонасосних технологій у багатьох країнах світу. Станом на сьогодні у світі встановлено й експлуатується сотні мільйонів теплових насосів, що підтверджує їхню популярність, довговічність, а також енергетичну й економічну доцільність застосування [2].

Формулювання мети. В умовах військової агресії та спричиненого нею дефіциту енергоресурсів особливої актуальності набуває вибір найбільш енергоефективних рішень для систем опалення й кондиціонування будівель.

Метою цієї роботи є дослідження ефективності роботи теплового насосу типу «повітря-вода» в різних режимах роботи за допомогою лабораторної установки.

Основна частина. Принцип дії теплового насоса ґрунтується на перенесенні теплоти від середовища з нижчою температурою до середовища з вищою температурою за рахунок реалізації зворотного термодинамічного циклу [3]. Для забезпечення цього процесу використовується електрична енергія, яка приводить у дію компресор та забезпечує циркуляцію холодоагенту в контурі системи. Завдяки такому принципу роботи теплові насоси здатні ефективно забезпечувати опалення, охолодження, вентиляцію приміщень, а також приготування гарячої води, поєднуючи кілька функцій в одному енергозберігаючому рішенні.

Повітряні теплові насоси (ASHP) є особливо доцільними для використання в міських умовах і щільній забудові, де монтаж ґрунтових або водяних контурів є технічно складним або економічно недоцільним [4]. Водночас їхня продуктивність суттєво залежить від температури та вологості зовнішнього повітря. За умов низьких температур ефективність знижується через збільшення різниці температур між джерелом і споживачем теплоти, а

підвищена вологість може призводити до обмерзання випарника та необхідності періодичного розморожування, що також впливає на загальний коефіцієнт перетворення енергії [5]. Для дослідження параметрів роботи теплового насосу в різних режимах роботи створено лабораторну установку. Її конструкцію схематично показано на рис. 1.

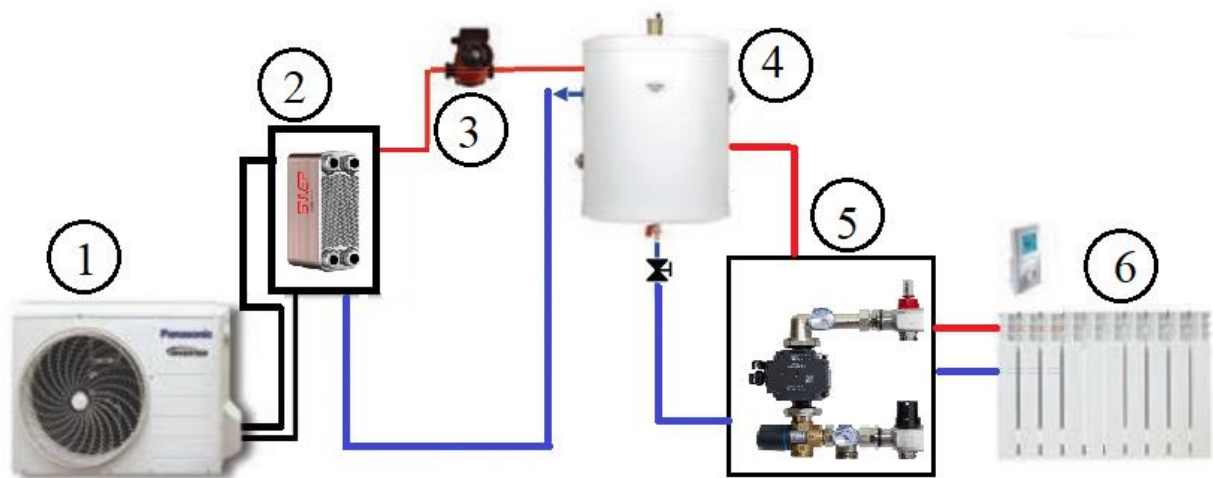


Рисунок 1 – Принципова схема лабораторної установки для дослідження параметрів роботи теплового насосу повітря-вода:

- 1 – зовнішній блок з компресором інверторного типу; 2 – теплообмінник пластинчатий фреон-вода; 3 – циркуляційний насос; 4 – буферна ємність; 5 – змішувач; 6 – споживач

Дана лабораторна установка побудована на базі зовнішнього блоку сучасного інверторного кондиціонера. Основною перевагою даної конфігурації є модульність, що забезпечує можливість заміни окремих елементів системи та проведення вимірювань при різних експлуатаційних параметрах окремих складових. Це дозволяє гнучко змінювати режим роботи системи, моделювати різні умови експлуатації та досліджувати вплив конкретних компонентів на ефективність роботи теплового насоса.

Дана установка дозволяє провести дослід із вимірюванням наступних параметрів:

- споживча потужність установки (кВт);
- теплова потужність установки (кВт);
- температура прямого/зворотного теплоносія (°C);
- температура в приміщенні (°C);
- температура зовнішнього середовища (°C).

Вимірювання температури реалізовано за допомогою цифрових термометрів із виносним датчиком на основі термопари, з точністю вимірювання 0,1 °C. Термометри обрано одного типу та виробника для мінімізації похибки вимірювання, оскільки показники температури в системі є одними з найважливіших. За регулювання температури подачі теплоносія до споживача відповідає змішувач, який складається з датчика температури та регульованого трьохходового клапану, який дозволяє підмішувати зворотній теплоносій в систему. Регулювання споживача (опалювального пристрою) відбувається за допомогою термостату, щоб підтримувати точну температуру в приміщенні з точністю 1,0 °C. Установка забезпечує зручний доступ до всіх елементів системи, що значно полегшує виконання необхідних експериментальних вимірювань та обслуговування обладнання. Принципова схема дозволяє наочно відстежувати послідовність циркуляції теплоносія, взаємодію фреону та води у теплообміннику, роботу циркуляційного насоса, накопичення тепла у буферній ємності та регулювання подачі тепла через змішувач до споживача.

Основним показником ефективності роботи теплового насосу в режимі опалення є коефіцієнт перетворення (COP) (1):

$$\text{COP} = Q_h / W \quad (1)$$

де Q_h – теплова потужність, передана воді (кВт);

W – споживана електрична потужність компресора та допоміжних елементів (кВт).

Теплова потужність визначається через параметри води (2):

$$Q_h = G - C_w(t_{\text{вих}} - t_{\text{вх}}) . \quad (2)$$

де G – масова витрата води (кг/с);

C_w – теплоємність води ($\approx 4,19$ кДж/кг·К);

$t_{\text{вих}}$ – температура води на виході з конденсатора (°C);

$t_{\text{вх}}$ – температура води на вході (°C).

Дана методика, що заключається у вимірюванні теплової потужності Q_h дозволяє отримати повну характеристику роботи теплового насоса повітря-вода в лабораторних умовах, що є основою для подальшого визначення коефіцієнту перетворення (COP) при різних режимах роботи. Для визначення COP паралельно проходить вимірювання споживчої потужності установки. В ході експеримента будуть змінюватись параметри подачі теплоносія при різних значеннях температури навколишнього середовища та температури всередині приміщення. За зміну температури подачі теплоносія відповідає змішувачий вузол. Також за допомогою регулювання циркуляційного насосу будуть проведені заміри при різних масових витратах теплоносія. Оскільки, заводське виконання зовнішнього блоку передбачає заправку фреоном R410A, система може бути перезапавлена більш сучасним типом фреону R32 для проведення аналогічних дослідів та порівняння отриманих результатів.

Модульна структура установки також робить її корисним навчальним інструментом для студентів та фахівців, які вивчають принципи роботи теплових насосів та систем опалення.

Висновки. Враховуючи високу актуальність використання теплових насосів типу повітря-вода в системах опалення, дуже важливим є зниження їх енергоспоживання. Для визначення найбільш оптимальних режимів роботи (максимального показника COP) та характеристик складових системи необхідно проводити досліді в реальних умовах, для отримання максимально достовірних результатів.

Перелік посилань:

1. "Review of the Market of Thermal Pumps." Electronic Magazine of Power Service Company "Cities and Buildings", no. 7, July 2013.
2. Alberini A., Gans W., Towe C. Free riding, upsizing, and energy efficiency incentives in Maryland homes. *Energy J*, vol. 3 (1), 2016. <http://dx.doi.org/10.5547/01956574.37.1.aalb>.
3. Dossat R., Horan T. Principles of Refrigeration. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2002.
4. Kelly N., Cockroft J. Analysis of retrofit air source heat pump performance: Results from detailed simulations and comparison to field trial data. *Energy Build*, vol. 43 (1), 2011. <http://dx.doi.org/10.1016/j.enbuild.2010.09.018>.
5. Zhang Y., Zhang G., Zhang A., et al. Frosting phenomenon and frost-free technology of outdoor air heat exchanger for an air-source heat pump system in China: An analysis and review. *Energies*, vol. 11 (10), 2018. <http://dx.doi.org/10.3390/en11102642>.

¹ Аспірант 3 курсу Шахбазов І. О.

¹ Доц., к.т.н. Сірий О. А.

<https://scholar.google.com/citations?user=FmKF8DsAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГНОЗУВАННЯ СКЛАДУ ПРОДУКТІВ ПІРОЛІЗУ У ВНУТРІШНІЙ КАМЕРІ МОДИФІКОВАНОГО ГАЗИФІКАТОРА

Постановка проблеми та її актуальність. В останні роки зріс інтерес до відновлюваних джерел енергії через екологічні проблеми глобального потепління та забруднення навколишнього середовища, а також через зростання світового попиту на енергію. Серед відновлюваних джерел енергії біомаса є одним з найбільш поширених та добре використовуваних енергоресурсів [1]. Рослинний матеріал, що утворюється в результаті реакції між вуглекислим газом і водою під дією сонячного світла шляхом фотосинтезу, виробляє вуглеводи – «будівельні блоки» біомаси [2].

Одержання енергії з біомаси може здійснюватись різними способами, включаючи вирощування сільськогосподарських культур, спалювання твердих відходів і звалищного газу та виробництво біо-олій. Перетворення біомаси в енергію було зосереджено головним чином на термохімічних процесах, які можна поділити на карбонізацію, зрідження, піроліз та газифікацію. Серед термохімічних процесів, піролізу приділяється набагато більше уваги, ніж іншим, оскільки його умови можна оптимізувати для виробництва піролізних масел з високою щільністю енергії, а також для отримання біовугілля та газу [3].

Аналіз останніх досліджень. Установки для термічного перетворення біомаси на паливо набувають сьогодні все більшого значення, особливо коли вони встановлені поблизу місць утворення відходів і в районах без централізованого енергопостачання. Усувається проблема транспортування сировини, а також пов'язане з цим додаткове споживання палива та викиди забруднюючих речовин [4].

Перетворення сировини з відходів на енергію термічними технологіями може бути виконано повільним, швидким, або проміжним піролізом [5, 6, 7]. Наприклад, Yang et al. [8] повідомляли, що проміжний піроліз може бути альтернативою швидкому та повільному піролізу. У ньому швидкість нагрівання сировини середня, що призводить до утворення приблизно однакової кількості твердого вуглецю і біо-олії.

Продукт піролізу біомаси можна розділити на три групи: конденсований органічний продукт (у рідкому стані), вугілля (тверда речовина) та неконденсовані гази (CO, CO₂, H₂, CH₄) [9]. Загалом, склад синтез-газу залежить від характеристик сировини, режиму роботи та конструктивних параметрів газифікатора. Було проведено багато досліджень, як експериментальних так і числових [10, 11], аспектів піролізу біомаси, але точний механізм реакції та кінетика реакції піролізу залишаються невизначеними.

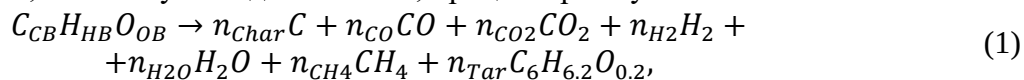
Формулювання мети. За мету даної роботи поставлено визначення прогнозованого складу продуктів піролізу у внутрішній камері газифікатора шляхом математичного моделювання процесу піролізу органічного палива.

Основна частина. У газифікаторі з низхідним потоком біомаса рухається разом з газом і проходить через зони сушіння, піролізу, окислення та відновлення. Піроліз передуює газифікації або спалюванню твердого палива. Коли лігноцелюлозний матеріал піддається впливу гарячого середовища, він піддається термічній деструкції та перетворюється на леткі гази, вугілля та зольні залишки.

Для моделювання піролізу та газифікації деревини загалом необхідно виразити складну суміш летких речовин, що утворюються в результаті піролізу деревини, а згодом і

розщеплення цих летких речовин, через кілька простих газоподібних складових. Ці газоподібні складові, з одного боку, повинні задовольняти атомний баланс різних елементів, присутніх у вихідній породі, а з іншого боку, вони також повинні відповідати енергетичному балансу, враховуючи теплові ефекти реакцій.

Використовуючи стехіометричний підхід і розглядаючи леткі речовини у вигляді CO, CO₂, H₂, H₂O, легких вуглеводнів і смоли, процес піролізу можна записати так:



де $C_{CB}H_{HB}O_{OB}$ – хімічна формула біомаси;

n – число молів речовини.

Вихід летких із біомаси – це комплексне явище, що включає велику кількість хімічних реакцій. Але рівень складності моделі залежить від конкретного випадку. У реакторах з нерухомим шаром палива (паливо не підіймається і не коливається як в киплячому шарі, а поступово опускається в міру піролізу) вихід летких розглядають як одностадійну глобальну реакцію першого порядку.

Використовується багатофазна CFD-модель на основі гетерогенної моделі Ейлера, що складається з двох окремих Ейлеревих сумішей: одна вважається твердою та дисперсною фазою, інша – газоподібною. Біомаса розглядається як тверда фаза, що складається з лігноцелюлозного матеріалу, фіксованого вуглецю, золи та вологи. До газоподібної фази відносяться леткі речовини і повітря.

Реакція піролізу біомаси є гетерогенною, і додатково задається реакція видалення вологи, яка передусь термічній деструкції. Леткі речовини, що виділяються під час первинного розкладання деревини, нестабільні та розпадаються на ряд газоподібних сполук і смол.

З використанням нестационарної постановки отримано розподіл концентрацій компонентів газової фази в осьовому перерізі реактора (Рис. 1) у певні моменти часу. На рис. 1 зображено осьовий переріз камери піролізу заданих розмірів (мм) з точками вимірювання і розподіл масових концентрацій неконденсованих газів.

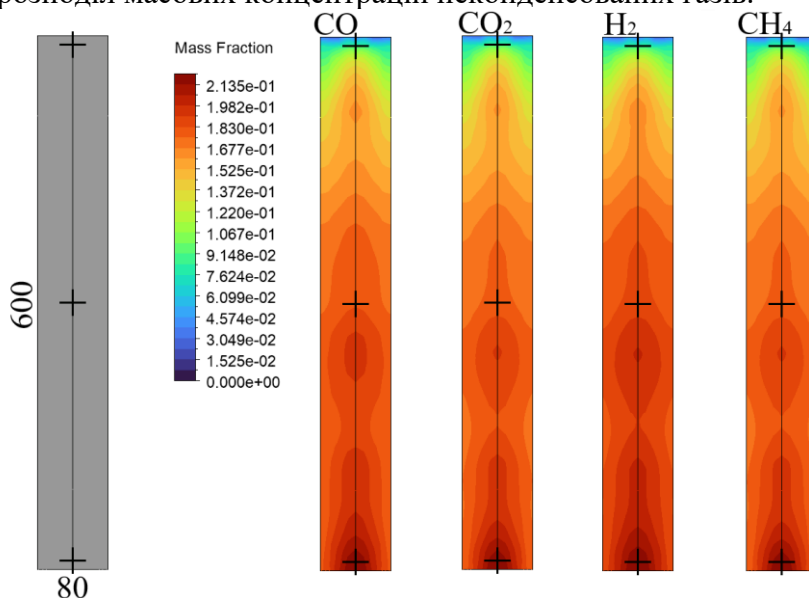


Рисунок 1 – Поля масових концентрацій неконденсованих газів

В табл. 1 наведено миттєве значення концентрацій продуктів піролізу осереднене по границі виходу з розрахункової області, Tar – смола, Char – твердий вуглець. Для порівняння з літературними даними повний склад перераховано на склад неконд. газів.

Висновки. У результаті математичного моделювання процесу піролізу деревної біомаси у внутрішній камері модифікованого газифікатора нижнього ходу отримано розрахунковий склад продуктів піролізу та їх розподіл у розрахунковій області.

Таблиця 1 – Прогнозований склад продуктів піролізу

Компонент	Масова концентрація (модель)		Дані з літератури [10]	Дані з літератури [11]
	Всіх компонент	Неконд. газів		
CO	0,174	0,559	0,183	0,514
CO ₂	0,105	0,338	0,115	0,416
H ₂	0,006	0,0188	0,005	0,003
CH ₄	0,042	0,0798	0,047	0,067
H ₂ O	0,302	-	0,25	-
Tar	0,02	-	0,2	-
Char	0,35	-	0,2	-

Математична модель, що використовується у даному дослідженні, враховує процеси сушіння біомаси та виходу летких речовин для однієї порції сировини. Порівнюючи результати моделі з літературними даними, відхилення масових концентрацій становить від 0,001 до 0,18 у випадку повного складу, від 0,013 до 0,078 у випадку неконденсованих газів. Розбіжність може бути викликана застосуванням стехіометричного підходу, або похибками експериментів, але в середньому результати моделі задовільно узгоджуються.

Перелік посилань:

1. Hilal Demirbas A., Sahin-Demirbas A., Demirbas A. Liquid Fuels from Agricultural Residues via Conventional Pyrolysis. *Energy Sources*. 2004. Vol. 26, no. 9. P. 821–827. DOI: <https://doi.org/10.1080/00908310490451637>.
2. Aysu T., Küçük M. M. Biomass pyrolysis in a fixed-bed reactor: Effects of pyrolysis parameters on product yields and characterization of products. *Energy*. 2014. Vol. 64. P. 1002–1025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2013.11.053>.
3. Demiral İ., Şensöz S. Fixed-Bed Pyrolysis of Hazelnut (*Corylus Avellana* L.) Bagasse: Influence of Pyrolysis Parameters on Product Yields. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*. 2006. Vol. 28, no. 12. P. 1149–1158. DOI: <https://doi.org/10.1080/009083190966126>.
4. Jerzak W., Reinmöller M., Magdziarz A. Estimation of the heat required for intermediate pyrolysis of biomass. *Clean Technologies and Environmental Policy*. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10098-022-02391-1>.
5. Bridgwater A. V. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass and Bioenergy*. 2012. Vol. 38. P. 68–94. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2011.01.048>.
6. Experimental comparison of two bench scale units for fast and intermediate pyrolysis / Funke A. et al. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*. 2017. Vol. 124. P. 504–514. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2016.12.033>.
7. Slow Pyrolysis Performance and Energy Balance of Corn Stover in Continuous Pyrolysis-Based Poly-Generation Systems / H. Cong et al. *Energy & Fuels*. 2018. Vol. 32, no. 3. P. 3743–3750. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.energyfuels.7b03175>.
8. Prospective contributions of biomass pyrolysis to China's 2050 carbon reduction and renewable energy goals / Q. Yang et al. *Nature Communications*. 2021. Vol. 12, no. 1. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41467-021-21868-z>.
9. Ranganathan P., Gu S. Computational fluid dynamics modelling of biomass fast pyrolysis in fluidised bed reactors, focusing different kinetic schemes. *Bioresource Technology*. 2016. Vol. 213. P. 333–341. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2016.02.042>.
10. Sharma A. K, Ravi M. R, Kohli S. Modelling product composition in slow pyrolysis of wood. *SESI J* 2006. Vol. 16(1). P. 1–11.
11. A CFD study of biomass pyrolysis in a downer reactor equipped with a novel gas–solid separator-II thermochemical performance and products / X. Yu et al. *Fuel Processing Technology*. 2015. Vol. 133. P. 51–63. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuproc.2015.01.002>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Кньовець Д. М.

¹ Доц., к.т.н. Баранюк О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=JQnIBoEAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ ВПРОВАДЖЕННЯ СТРУМЕНЕВО-НІШЕВОЇ ТЕХНОЛОГІЇ В ЕНЕРГЕТИЧНІ КОТЛИ ГМ-50

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасний стан вітчизняної енергетики характеризується високим рівнем зносу основного обладнання ТЕС та промислових котелень, зокрема парових котлів типу ГМ-50, термін експлуатації яких часто перевищує розрахунковий. Традиційні пальникові пристрої цих агрегатів не забезпечують необхідної гнучкості регулювання, мають обмежені можливості щодо зниження викидів оксидів азоту (NO_x) та не завжди гарантують стабільність горіння при зміні режимів навантаження. В умовах зростання вартості енергоресурсів та посилення екологічних норм виникає гостра потреба у впровадженні інноваційних технологій спалювання. Струменево-нішева технологія (СНТ) розглядається як ефективне рішення для модернізації таких котлів, оскільки вона дозволяє активізувати процеси сумішоутворення та стабілізувати факел. Проте впровадження СНТ потребує детального попереднього аналізу аеродинамічних та теплообмінних процесів у топочній камері. Використання методів обчислювальної гідродинаміки (CFD-моделювання) є критично важливим для прогнозування ефективності модернізації, запобігання перегріву екранних поверхонь та оптимізації екологічних показників, що і обумовлює актуальність даного дослідження.

Аналіз останніх досліджень. Питання підвищення ефективності спалювання палива активно досліджуються провідними науковими установами. У праці доведено, що СНТ забезпечує якісне горіння та дозволяє працювати з низькими коефіцієнтами надлишку повітря [1]. Дослідження підтверджують, що комбінація модернізації пальників із методами рециркуляції газів дозволяє знизити викиди NO_x на 60–70 %. Проте специфіка локального теплообміну в котлах ГМ-50 при переході на СНТ потребує додаткового вивчення для запобігання перегріву екранів.

Формулювання мети. Метою дослідження є проведення порівняльного аналізу процесів аеродинаміки та теплообміну в топці котла ГМ-50 при використанні штатних пальників та пальників СНТ. Такий підхід дозволяє кількісно оцінити підвищення теплової надійності поверхонь нагріву (екранних труб) та підтвердити екологічну ефективність модернізації котельного агрегату.

Основна частина. Для досягнення поставленої мети використано методи обчислювальної гідродинаміки (CFD) на базі програмного комплексу ANSYS Student [1]. Процес моделювання включав побудову детальної тривимірної геометричної моделі паливни котла ГМ-50 з урахуванням конструктивних особливостей пальників. Математична модель базується на розв'язанні системи стаціонарних рівнянь Нав'є-Стокса, усереднених за Рейнольдсом (RANS). Для замикання системи рівнянь використано Realizable k- ϵ модель турбулентності, яка забезпечує високу точність розрахунків для потоків із сильним викривленням ліній току та відривами [1].

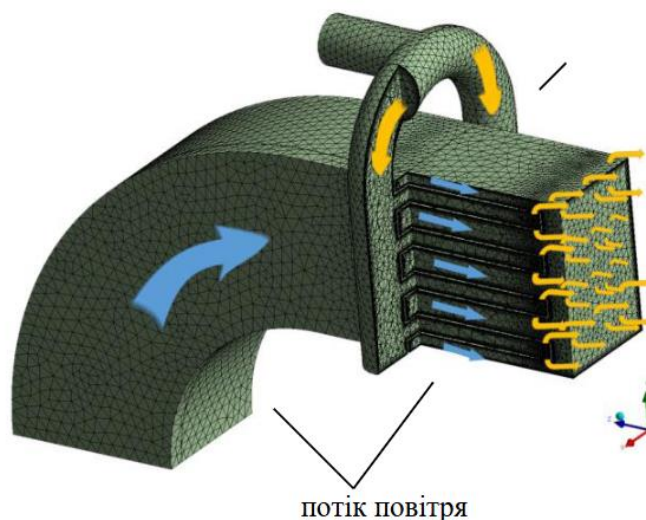


Рисунок 1 – CFD-модель пальника, що побудований з використанням струменево-нішевої технології

Моделювання хімічної взаємодії під час спалювання метану реалізовано через модель перенесення реагентів (Species Transport) у поєднанні з моделлю вихорової дисипації (Eddy-Dissipation). Такий підхід дозволяє врахувати вплив турбулентного змішування на швидкість хімічних реакцій. Радіаційний теплообмін розраховано за моделлю дискретних ординат (DO). Верифікація результатів моделювання проведена шляхом порівняння отриманих даних із реальними експлуатаційними показниками ПАТ «Київенерго», де похибка за ключовими параметрами (температура, витрата пари) не перевищила 3–10%, що підтверджує відповідність обраної методики.

Основними матеріалами дослідження є порівняльні характеристики штатних пальників та пальників СНТ. Струменево-нішева система базується на принципах створення стійкої вихорової структури та саморегулювання паливо-повітряної суміші. Головною перевагою технології є її повна мультипаливність: пальники здатні стабільно працювати на природному газі, біогазі, шахтному метані, коксовому газі або їх сумішах у будь-яких пропорціях. Це досягається завдяки унікальній аеродинаміці, де паливо подається в зони розрідження (ніші), що забезпечує миттєве запалювання та стійке горіння навіть низькокалорійних газів.

Аналіз результатів моделювання показав, що при використанні штатних пальників ГМГ-5 температура в ядрі факела сягає 1800 °С, що провокує інтенсивне утворення «термічних» оксидів азоту. Впровадження пальників СНТ забезпечує рівномірне заповнення паливні факелом та знижує максимальну температуру до 1400 °С [1]. Окрім екологічного ефекту, технологія СНТ забезпечує широкий діапазон регулювання потужності (від 10 % до 100 %) без ризику перебігу або відриву полум'я, що підвищує маневреність котла.

Висновки. Встановлено, що існуюча система спалювання котла ГМ-50 потребує модернізації через високий рівень емісії NOx. На основі чисельних розрахунків визначено, що перехід на струменево-нішеву технологію дозволяє знизити викиди оксидів азоту в середньому на 20% [1]. Аргументовано, що мультипаливність СНТ відкриває можливості для використання альтернативних видів палива без докорінної перебудови котла. Одержані результати класифіковано як перспективне рішення для підвищення енергоефективності та екологічності комунальної та промислової теплоенергетики.

Перелік посилань:

1. Баранюк О. В., Черноусенко О. Ю., Рачинський А. Ю. CFD-моделювання процесів теплообміну в паливні котла ГМ-50. *Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Енергетичні та теплотехнічні процеси й устаткування*. 2024. № 2(18). С. 37–45.

¹ Бакалаврант 4 курсу Ковальчук І. О.

¹ Ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИБІР І ХАРАКТЕРИСТИКА БІОГАЗОВОЇ УСТАНОВКИ

Постановка проблеми та її актуальність. Попри значний потенціал агропромислових відходів, велика кількість органічної сировини не утилізується належним чином, що призводить до втрати енергії та погіршення екологічного стану. У зв'язку з геополітичною нестабільністю та дефіцитом традиційних викопних ресурсів, пошук альтернативних джерел енергії стає стратегічним пріоритетом для забезпечення життєздатності промислових підприємств, зокрема молочної галузі, так як молочні заводи залежать від зовнішніх постачальників палива для пастеризації та стерилізації, що підвищує собівартість продукції.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження енергетичної та економічної ефективності БГУ, що використовують відходи молочної промисловості, показують високу життєздатність таких проектів.

Формулювання мети. Метою роботи є техніко-технологічне обґрунтування параметрів БГУ для забезпечення енергонезалежності промислових об'єктів, а також розрахунок теплотехнічної ефективності системи при переробці сільськогосподарської біомаси.

Основна частина. Оскільки світовий попит на відновлювану енергію продовжує зростати, виробництво біогазу стало перспективним рішенням для сталого виробництва енергії. Однак, доступність сировини з органічних відходів варіюється залежно від регіону. Тому райони з обмеженими ресурсами відходів зіткнулися з проблемами з точки зору виробництва біогазу. Слід також зазначити, що створення біогазової установки вимагає значних початкових інвестицій, а недостатня політична підтримка може перешкоджати розвитку виробництва біогазу. Нормативні акти щодо постачання сировини, поводження з відходами та цін на енергоносії можуть мати вирішальний вплив на життєздатність проекту [1].

Біогазові системи надають можливість економії коштів для ферм, молочних заводів та підприємств, перетворюючи відходи на прибуткове джерело енергії. Відходи можна використовувати для виробництва теплоти, електроенергії або палива для транспортних засобів, зменшуючи залежність від іноземної нафти, знижуючи викиди парникових газів, покращуючи якість навколишнього середовища та підтримуючи місцеву зайнятість. Крім того, біогазові системи зменшують потребу в нафтохімічних продуктах та добривах, що видобуваються, і пропонують можливість переробляти цінні поживні речовини назад у продовольчу систему, тим самим покращуючи перспективи сільськогосподарського сектору та енергетичну безпеку країни [2].

Проектування біогазової установки – це складний процес, який вимагає ретельного врахування кількох факторів. Аналіз сировини, яка буде використовуватися для виробництва біогазу, та конкретних вимог самої біогазової установки часто є частиною процесу проектування.

В роботі проводиться розрахунок основних параметрів біогазової установки. Обчислюються значення основних показників: добового Q_c та річного виходів субстрату $Q_{c\text{річн}}$, його вологість W_r , вміст сухих речовин $P_{a.c.p.}$, вихід біогазу $V_{r\text{річн}}$ та інших. Результати розрахунку наведено в табл. 1 [3].

Таблиця 1 – Основні параметри біогазової установки

№	Параметр	Розмірність	Значення
1	Q_c	т	31,79
2	Q_c річн	т	11603,35
3	W_{Γ}	%	96
4	W_c	%	91
5	$P_{a.p.c.}$	т	1044,3
6	O_p	т	835,44
7	$G_{доб}$	т	34,6
8	$Q_{доб}$	т	30,3
9	V_k	м ³	541,1
10	V_{Γ}	м ³	125316
11	$\varepsilon_{бг}$ річн	МДж	1055610,78
12	$Q_{бг}$	м ³	47982,3
13	η_n		0,38
14	$K_{бг}$		0,62
15	$V_{бг}$	м ³	77695,92
16	$K_{еф}$	%	79,5

На основі проведених технологічних розрахунків для реалізації проекту обрано два метантенки типу CSTR HR-500 (табл. 2) [4].

Таблиця 2 – Реактор безперервної дії з перемішуванням

Модель	Об'єм (л)	Потужність двигуна (кВт)	Швидкість обертання мішалки (об/хв)	Швидкість перемішування (об/хв)
HR-500	500	37	0-60	0-80

Реактор CSRT (рис. 1) працює безперервно зі стабільним потоком реагентів та продуктів. Реагенти безперервно подаються в змішувальний резервуар, а продукти безперервно відводяться, забезпечуючи безперервний процес реакції.

Визначальною рисою CSTR є ефективне перемішування реагентів. Це досягається завдяки використанню перемішувальних механізмів або робочих коліс, які забезпечують ретельне перемішування реагентів та рівномірний розподіл їх концентрацій у реакторі.

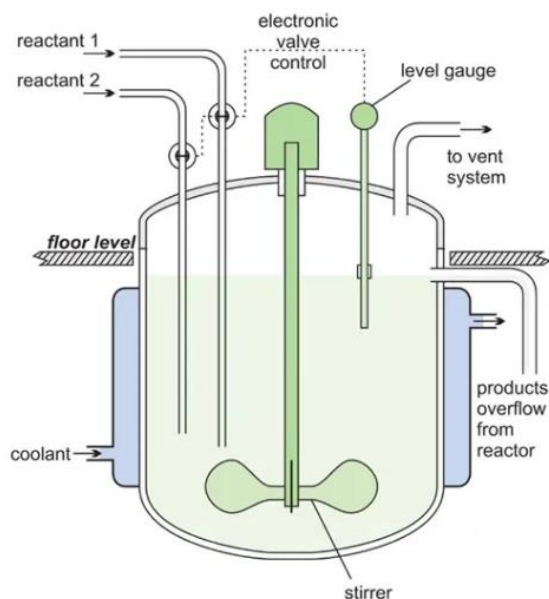


Рисунок 1 – Реактор безперервного перемішування

CSTR дозволяє контролювати умови реакції, такі як температура, тиск і концентрація реагентів, шляхом регулювання швидкості подачі реагентів і теплопередачі

до реактора або з нього. Такий контроль дозволяє оптимізувати швидкість реакції та селективність.

Найпоширенішою схемою є система опалення водогрійного котла, який працює на тепловій енергії, отриманій в результаті спалювання біогазу на КГУ. В якості нагрівачих елементів застосовують теплообмінники у вигляді змійовиків, секцій радіаторів або паралельно зварених труб, де теплоносієм є гаряча вода температурою біля 60 °С. Теплообмінники рекомендується розташовувати в зоні дії перемішуючого пристрою, що допомагає уникнути осадженню твердих частинок на його зовнішній поверхні [5].

Перемішування сировини в реакторі підвищує ефективність роботи БГУ, запобігає осадженню твердих частинок на дно реактора, перешкоджає утворенню кірки на поверхні. В безперервному режимі роботи необхідне безперервне перемішування. Перемішування може бути зведено до наступних способів: механічними мішалками, біогазом, який пропускається через товщину сировини, і перекачуванням сировини з верхньої зони в нижню. Робочими органами механічних мішалок є шнеки, лопаті і планки. Вони можуть приводитися в дію вручну, від електродвигунів або від повітряного двигуна [6].

Важливість розвитку біогазових технологій в Україні тісно пов'язана з діяльністю агропромислового комплексу, зокрема молочної галузі. Процеси переробки молока є надзвичайно енергоємними, оскільки потребують суворого температурного контролю на кожному етапі – від пастеризації до охолодження готової продукції.

Як зазначають в [7] тепла обробка молока є критично важливою операцією, що забезпечує безпеку продуктів для споживання. Зокрема, дослідження інтенсивності тепловіддачі в таких продуктах, як молоко та молочна сироватка, дозволяє оптимізувати роботу теплообмінних апаратів.

В свою чергу, молочна сироватка та інші відходи переробки можуть служити ефективним субстратом для зброджування в метантенках. Також варто зазначити, що теплота, яку виробляє БГУ, може бути використана для забезпечення вищезгаданих процесів пастеризації та підігріву сировини на заводі.

Висновки. Отже, впровадження БГУ дозволяє молочним підприємствам перетворювати відходи на прибуткове джерело енергії, знижуючи залежність від зовнішніх енергоносіїв. Інтеграція БГУ у технологічний цикл молочних заводів України є перспективним кроком до створення енергонезалежних та екологічно чистих виробництв.

Перелік посилань:

1. Pilarski K., Pilarska A. A., Kolasa-Więcek A., Suszanowicz D. An agricultural biogas plant as a thermodynamic system: A study of efficiency in the transformation from primary to secondary energy. *Energies* 2023, 16, 7398.
2. Kabalci E. *Hybrid Renewable Energy Systems and Microgrids*, Elsevier Inc.: Amsterdam, The Netherlands, 2020.
3. Таргоня В. Визначення обсягів вторинної сировини та розрахунок можливого виходу біогазу на тваринницьких фермах та комплексах / Таргоня В., Оверченко В., Щербак Б. – Київ: Видавничий центр НУБіП України, 2013.
4. Continuous Stirred-Tank Reactor, <https://share.google/EzsvO4Tr4wn5JPzgl>
5. Hamed M. El-Mashad. Effect of temperature and temperature fluctuation on thermophilic anaerobic digestion of cattle manure / Hamed M.El-Mashad. // *Bioresource Technology*. – 2004. – № 95. – С. 191–201.
6. Buta Singh. Impact of mixing intensity and duration on biogas production in an anaerobic digester: a review [Електронний ресурс] / Buta Singh, Zoltán Szamosi, Zoltán Siménfalvi // *Critical Reviews in Biotechnology*. – 2020. – Режим доступу до ресурсу: DOI:10.1080/07388551.2020.1731413.
7. Ткаченко С. Й., Власенко О. В. Використання методу регулярного теплового режиму для визначення коефіцієнта тепловіддачі в молочних продуктах, Вісник ВПІ, вип. 3, с. 11–18. <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2023-168-3-11-18>.

Бакалаврант 4 курсу Кривохижа М. А.

Доц к.т.н. Баранюк О. В.

<https://scholar.google.ru/citations?user=JQnIBoEAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНИЙ АНАЛІЗ ТА ЕКОЛОГО-ЕКОНОМІЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення енергоефективності індивідуального житлового фонду вимагає впровадження оптимізованих систем теплопостачання. Сучасна інженерна практика проектування систем водяного опалення переважно спирається на розрахунки статичних показників максимальних тепловтрат, що призводить до систематичного завищення встановленої потужності генераторів теплоти, циркуляційних насосів та теплопередавальних поверхонь. Зниження енергоємності локальних систем теплопостачання шляхом їх точного теплогидравлічного балансування є критичним завданням інженерної теплофізики.

Виділення невирішеного раніше завдання. В алгоритмах проектування спостерігається концептуальний розрив між ізольованим визначенням теплових навантажень будівлі та динамічним моделюванням гідравлічного режиму циркуляційного контуру. Відсутність інтегрованих математичних моделей, які поєднують нелінійний гідравлічний розрахунок із критеріями еколого-економічної оцінки (мінімізація капітальних витрат і викидів емісійних газів), зумовлює експлуатаційну неефективність локальних систем при змінних метеорологічних умовах.

Аналіз останніх досліджень. Фундаментальні підходи до визначення теплового навантаження будівель, а також вибору систем теплопостачання формалізовано в працях М.Ф. Боженка [1, 2]. Гідравлічна стабільність контурів водяного опалення та принципи їх кількісного регулювання досліджені Р. Ярушоветцом [3]. Нормативні параметри мікроклімату та вимоги до проектування систем жорстко регламентуються державним стандартом ДБН В.2.5-67:2013 [4]. Проте методики оптимізації гідравлічних параметрів теплоносія для умов індивідуального будівництва з урахуванням екологічних чинників залишаються недостатньо опрацьованими.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка комплексної математичної моделі теплогидравлічної оптимізації системи теплопостачання індивідуального житлового будинку, спрямованої на мінімізацію сумарних експлуатаційних витрат та зниження емісії парникових газів шляхом раціоналізації циркуляційних контурів.

Короткий опис використаних методів. Тепловий баланс приміщень індивідуального будинку розраховується як суперпозиція трансмісійних тепловтрат через огорожувальні конструкції та витрат теплоти на нагрівання інфільтраційного повітря. Сумарні теплові втрати приміщення визначаються за рівнянням:

$$Q_{\text{втр}} = \sum Q_{\text{обгр},i} + Q_{\text{інф}} \tag{1}$$

Трансмісійні тепловтрати i -го елемента зовнішньої огорожувальної конструкції є функцією його термічного опору та визначаються як:

$$Q_{\text{обгр},i} = \frac{1}{R_i} A_i \Delta t_i \left(1 + \sum \beta_i \right) n_i \tag{2}$$

де R_i – опір теплопередачі огорожувальної конструкції, (м²·К)/Вт;

A_i – площа поверхні елемента конструкції, м²;

Δt_i – розрахункова різниця температур внутрішнього та зовнішнього середовища, °С;

β_i – додаткові втрати у частках до основних;

n_i – коефіцієнт, що враховує положення зовнішньої поверхні щодо зовнішнього повітря.

Витрати теплоти на нагрівання інфільтраційного повітря, з урахуванням нормативного повітрообміну, розраховуються за залежністю:

$$Q_{\text{інф}} = 0,28L\rho_{\text{п}}c_{\text{п}}(t_{\text{вн}} - t_{\text{з}})\tag{3},$$

де L – витрата інфільтраційного повітря, м³/год;

$\rho_{\text{п}}$ – густина повітря при розрахунковій температурі, кг/м³;

$c_{\text{п}}$ – питома масова теплоємність повітря, кДж/(кг·К);

$t_{\text{вн}}, t_{\text{з}}$ – температури внутрішнього та зовнішнього повітря відповідно, °С.

Гідравлічний режим циркуляційного контуру системи водяного опалення описується сумарним рівнянням втрат тиску. Для еколого-економічної оптимізації мережі реалізується ітераційний підбір діаметрів трубопроводів на основі мінімізації приведених витрат:

$$\Delta P = \sum(R \cdot l + Z) \rightarrow \min\tag{4},$$

де R – питомі втрати тиску на тертя, Па/м;

l – довжина розрахункової ділянки трубопроводу, м;

Z – втрати тиску на місцеві опори, Па.

Для забезпечення акустичного комфорту згідно з [3, 5] швидкість руху теплоносія обмежується значенням 1,5 м/с. Цільова функція враховує капітальні вкладення у матеріали та дисконтовані експлуатаційні витрати на електричну енергію для подолання гідравлічного опору циркуляційним насосом. Зниження швидкості циркуляції теплоносія за рахунок оптимізації температурного графіка Δt зменшує масову витрату G . Враховуючи, що втрати тиску квадратично залежать від витрати, це призводить до експоненційного зниження навантаження на насосне обладнання.

Основні отримані результати і висновки. Розроблена математична модель теплогідравлічного розрахунку локальної системи опалення дозволяє мінімізувати матеріалоємність інженерних мереж індивідуального будинку. Аналіз результатів симуляції показує, що інтеграція точних розрахунків трансмісійних тепловтрат із гідравлічною оптимізацією циркуляційних кілець забезпечує зниження сумарного гідравлічного опору мережі на 12–15%. Це гарантує пропорційне зменшення споживання електричної енергії насосними групами, що безпосередньо корелює зі зниженням викидів еквівалента CO₂ об'єктами генерації. Перспективою подальших досліджень є адаптація розробленого алгоритму для бівалентних систем теплопостачання з інтеграцією низькопотенційних джерел теплової енергії (теплових насосів) та геліоколекторів.

Перелік посилань:

1. Боженко М. Ф. Системи опалення, вентиляції і кондиціювання повітря будівель: навчальний посібник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2019. – 380 с.
2. Боженко М. Ф. Теплопостачання: підручник / М.Ф. Боженко, В.М. Дешко, О.С. Любарець. – Київ: ІВЦ «Видавництво «Політехніка», 2004. – 308 с.
3. Ярушовець Р. Гідравліка – серце водяного опалення: навчальний посібник. Відень: Herz Armaturen Ges.m.b.H., 2022. – 316 с.
4. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. – [Чинний від 2014-01-01]. – К.: Мінрегіон України, 2013. – 141 с. (Державні будівельні норми України). Енергоефективність будівель та інженерних систем: навч. посібник / за ред. Любарця О.С. – К.: КНУБА, 2019. – 184 с.

ВДОСКОНАЛЕННЯ СИСТЕМИ УТИЛІЗАЦІЇ ТЕПЛОТИ ПІКОВОЇ ВОДОГРІЙНОЇ КОТЕЛЬНОЇ ТЕЦ ЗА РАХУНОК ORC-УСТАНОВКИ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах стрімкого зростання вартості енергоносіїв та жорстких вимог до екологічності енергогенеруючих об'єктів, утилізація низькопотенційної теплоти стає одним із пріоритетних напрямків модернізації ТЕЦ. Для великих міст України, де основу тепlopостачання складають потужні ТЕЦ, актуальним є питання підвищення ефективності роботи пікових котлів типу КВГМ-180. Температура димових газів за котлом досягає 160–180 °С, що створює значний потенціал для впровадження Organic Rankine Cycle (ORC) – технології, що дозволяє перетворювати скидку теплоту на електричну енергію без додаткового спалювання палива.

Аналіз останніх досліджень. Для розробки ефективної системи утилізації теплоти було проаналізовано сучасний стан світових розробок у галузі безвідхідної енергетики. У роботі [1] представлено ґрунтовний огляд органічних циклів Ренкіна, де детально розглянуто термодинамічну сумісність різних робочих тіл із джерелами теплоти низького потенціалу. Було встановлено, що вибір робочого тіла є ключовим для досягнення максимального ККД.

У дослідженні [2] наведено результати порівняльного аналізу ORC-установок із традиційними методами утилізації. Основними об'єктами дослідження є димові та вихлопні гази. Зазначається, що важливим в модельованій роботі з димовими газами є запобігання корозії. Аби цього досягти слід обмежити їх охолодження. Зазначено що оптимальною температурою до якої слід охолоджувати димові гази є 120–130 °С. Застосування нового методу аналізу в основі якого покладено точки зближення температур дозволяє враховувати зміну теплоти що підводиться до циклу. Якщо точніше, описує скільки теплоти передається від джерела до робочого тіла. Pinch point – це метод аналізу, в ході якого можна розрахувати градієнт і зробити оцінку за профілем джерела, виконати розрахунок потужності насоса і турбіни, а також енергію підведеної теплоти за тепловим балансом.

Питання проєктування робочих органів системи висвітлено у праці [3], де обґрунтовано використання радіальних турбін для малих потужностей як найбільш ефективного рішення. Вибір теплових двигунів за допомогою середньолінійного проєктування допомагає розробити турбіну за вхідними параметрами: такими як тиск, температура та інші властивості робочого тіла (визначення діаметрів ротора та висоти лопаток). Наступним етапом в проєктуванні є розрахунок вхідних та вихідних параметрів трикутників швидкостей робочого колеса, тобто визначаються кінематичні характеристики і сопловий апарат. Дані розрахунки допоможуть зробити оцінку за рівнянням Ейлера. Автор наступним етапом пропонує врахувати втрати. В статті вказуються профільні втрати, втрати через витоки (радіальні зазори), кінетична енергія, що не використалася та ще декілька втрат, котрі важливо врахувати в проєктуванні. І на заключення метою цього проєктування є досягнення автоматизації процесів для чого автор використовує методи GA та PSO: так званий генетичний аналіз (GA) та метод рою часток (PSO), створені для оптимізації даних. За допомогою генетичного аналізу створюються варіації розміру турбін і перебираються доти доки не буде досягнуто ідеальний варіант для досягнення максимального ККД. Метод рою часток враховує всі параметри і використовує їх для

досягнення найвищого ККД. Суть полягає в тому, що алгоритми змінюють дані до тих пір доки не буде досягнуто максимальний ККД.

Досвід впровадження подібних технологій у суміжних галузях промисловості описано в [4]. Проведено порівняльний аналіз робочих тіл та визначено найкраще для установок малої потужності. В роботі порівнюються 3 види флюїдів «сухі», ізоентропні та «вологі». Зазначено, що найбільш ризикованим стане вибір на користь «вологих» робочих тіл, так як для того, щоб не було конденсації під час розширення, необхідний значний перегрів на вході. Очевидно, що вибір припадає на «сухі» робочі тіла через те, що пара завжди знаходиться в перегрітому стані, через що можна виключити можливе ускладнення в вигляді корозії через повну відсутність конденсації вологи, наприклад n-пентан. В роботі відмічено горючість даного теплоносія в порівнянні з іншими, але, в той же час, він має нульовий рівень руйнування озону а також низький ПГП (потенціал глобального потепління). Через свою велику молекулярну масу облегшене з'єднання з генератором, має не найбільшу питому вартість і загалом його найбільший мінус це високий рівень небезпеки і необхідність герметизації.

Формулювання мети. Метою даної роботи є розрахунок потенціалу електричної потужності та обґрунтування вибору турбіни для утилізації теплоти димових газів котлів КВГМ-180. Основним прийомом є інтеграція ORC-модуля в хвостові поверхні нагріву котла з дотриманням температурних обмежень для запобігання корозії. В даному випадку температура димових газів має бути не нижче ніж 130 °С.

Основна частина. Система працює за замкненим циклом, де робочим тілом обрано n-пентан. Завдяки фізичним властивостям цього робочого тіла, процес розширення в турбіні завершується в зоні перегрітої пари, що усуває ризик ерозії лопаток.

Масову витрату димових газів G_r визначено через тепловий баланс котла. При номінальній потужності $Q_{\text{КВГМ}}=209$ МВт та ККД $\eta_{\text{ка}}=0,9$, теплова потужність за паливом за формулою (1) складає:

$$Q_{\text{пал}} = \frac{Q_{\text{КВГМ}}}{\eta_{\text{ка}}} = \frac{209}{0,9} = 232,2 \text{ МВт.} \quad (1)$$

Витрата палива при нижчій теплоті згоряння мазуту $Q_{\text{н}}^{\text{р}} = 40$ МДж/кг за формулою (2) становить:

$$B = \frac{Q_{\text{пал}}}{Q_{\text{н}}^{\text{р}}} = \frac{232,2}{40} = 5,8 \text{ кг/с.} \quad (2)$$

Електрична потужність турбіни розраховується за формулою (3):

$$N_{\text{ел}} = G_r \cdot C_p \cdot \Delta T \cdot \eta, \quad (3)$$

де коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,15$, G_r – загальна масова витрата газів.

Показові розрахунки потенціалу для різних режимів ($\eta = 0,16$):

при $G_r = 70$ кг/с та $T = 180$ °С: $N_{\text{ел}} = 70 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 0,16 = 616$ кВт;

при $G_r = 100$ кг/с та $T = 180$ °С: $N_{\text{ел}} = 100 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 0,16 = 880$ кВт;

при $G_r = 110$ кг/с та $T = 180$ °С: $N_{\text{ел}} = 110 \cdot 1,1 \cdot 50 \cdot 0,16 = 968$ кВт.

Для отриманої витрати димових газів 70, 100, 110 кг/с побудовано діаграму характеристик установки при різних значеннях температури димових газів (рис. 1).

У моделюванні обрано «сухі» робочі тіла (зокрема n-пентан), пара яких залишається перегрітою під час розширення, що виключає ризик ерозії лопаток турбіни. Геометрія турбіни розраховується за входними параметрами тиску та температури за допомогою рівняння Ейлера. Автоматизація проектування досягається завдяки алгоритмам GA та PSO, які оптимізують дані для досягнення максимального ККД.

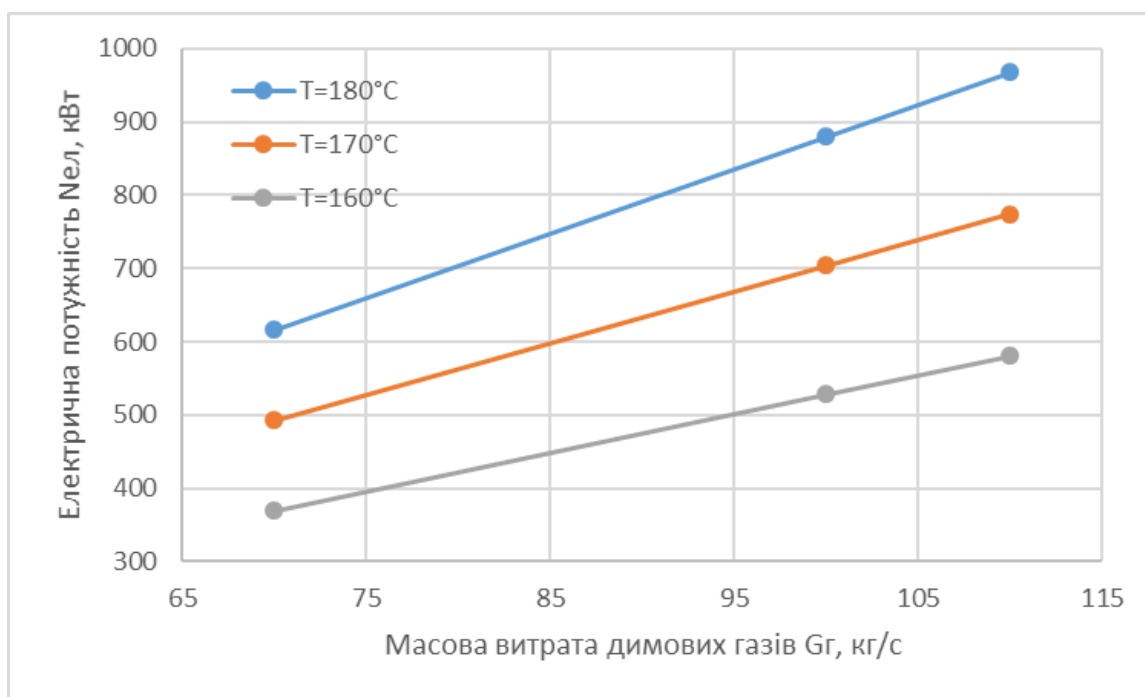


Рисунок 1 – Діаграма характеристик установки при різних температурах і масових витратах димових газів

Висновки. За результатами проведених досліджень для ТЕЦ малої потужності найбільш доцільною є радіально-доцентрова турбіна котра своїми характеристиками (компактність, міцність та дешевизна) забезпечує ККД на рівні 87,3–88,6 %. Розрахунок електричної потужності говорить про доцільність впровадження ORC-модулів для підвищення ефективності.

Перелік посилань:

1. J. C. Jiménez-García, A. Ruiz, A. Pacheco-Reyes, W. Rivera (2023). A Comprehensive Review of Organic Rankine Cycles. *Processes*, 11(7), 1982. [<https://doi.org/10.3390/pr11071982>]
2. A. Auld, A. Berson, S. Hogg (2013). Organic Rankine cycles in waste heat recovery: a comparative study. *International Journal of Low-Carbon Technologies*, Vol. 8, Suppl. 1, i9–i18. [<https://doi.org/10.1093/ijlct/ctt033>]
3. E. Wang, N. Peng (2023). A Review on the Preliminary Design of Axial and Radial Turbines for Small-Scale Organic Rankine Cycle. *Energies*, 16(8), 3423. [<https://doi.org/10.3390/en16083423>]
4. Z. Varga, I. Rabi, C. Farkas (2012). Waste Heat Recovery with Organic Rankine Cycle in the Petroleum Industry. *Chemical Engineering Transactions*, Vol. 29, 301–306. [<https://doi.org/10.3303/CET1229051>]

¹ Бакалаврант 4 курсу Мягкий Р. А.

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.

<https://scholar.google.com/citations?user=m7CSuP0AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ГАЗУ ТА МАЗУТУ ДЛЯ РОБОТИ ПІКОВИХ ВОДОГРІЙНИХ КОТЛІВ В АВАРІЙНИХ РЕЖИМАХ ТЕЦ

Постановка проблеми та її актуальність. Енергетичний сектор України зазнає постійних ворожих атак. Влучання дронів та ракет на об'єкти критичної інфраструктури призводять до масштабних руйнувань основних генеруючих потужностей електростанцій. Виведення їх з ладу створює прямий дефіцит в електромережі й повне припинення теплопостачання в зимовий період. Для забезпечення життєдіяльності населення та функціонування економіки є важливими теплоелектроцентралі (ТЕЦ). В умовах коли можлива ситуація виведення з експлуатації енергетичних котлів та турбін, але залишились працюючі пікові водогрійні котли, аналіз таких аварійних режимів експлуатації наявного обладнання є надзвичайно актуальною проблемою для сучасної української теплоенергетики.

Аналіз останніх досліджень. Питання ефективності ТЕЦ та використання резервних видів палива розглядалися в працях науковців КПІ ім. Ігоря Сікорського. Зокрема, досліджено роботу теплофікаційних турбін типу Т-110/120-130 та енергетичних котлів Е-500-140-ГМ, що складають основу ТЕЦ.

Формулювання мети. Метою роботи є аналіз техніко-економічних параметрів роботи пікового водогрійного котла при спалюванні природного газу та мазуту.

Основна частина. ТЕЦ – теплоелектроцентрально, електростанція, що використовує пару, котру отримують в парогенераторі для вироблення електроенергії та теплофікації споживачів. Частина пари для споживачів відбирається після того, як частина енергії пари буде використано для приведення у рух парової турбіни і параметри її зменшаться. Інша частина пари використовується в турбіні і поступає в конденсатор. Відібрана гаряча вода та пара поступає до споживачів системою трубопроводів [1].

Основне обладнання електростанції включає: котельні й турбінні агрегати з електричним генератором і конденсатором. Існує і допоміжне обладнання, яке служить для відпуску теплоти споживачам і використання пари турбіни для підігріву живильної води котлів і забезпечення власних потреб електростанції. До нього відноситься обладнання систем паливопостачання, деаераційно-живильної установки, конденсаційної установки, теплофікаційної установки (для ТЕЦ), систем технічного водопостачання, маслостачання, регенеративного підігріву живильної води, хімводопідготовки, розподілу і передачі електроенергії [2].

Для покриття максимального теплового навантаження в гарячій воді 950 МВт, ТЕЦ потужністю 330 МВт, матиме таке основне обладнання: три теплофікаційні турбіни Т-110/120-130, кожна з яких має номінальну потужність 110 МВт, в конденсаційному режимі 120 МВт, початковий тиск 12,75 МПа. Витрата свіжої пари в номінальному режимі на установку складає 485 т/год, на теплофікацію віддає 206 МВт [3]. Щоб забезпечити відповідною кількістю пари турбіни використовуються три котли типу Е-500-140-ГМ, паропроодуктивність 500 т/год. Також застосовують три пікові водогрійні котли КВГМ-100. Основні технічні характеристики наведені в таб.1. [4].

Таблиця 1 – Основні параметри пікового водогрійного котла КВГМ-100

№	Параметр	Розмірність	Значення
1	Паливо	-	Мазут М100, Газ
2	Номінальна продуктивність	МВт	116,3
3	Робочий тиск	МПа	2,5
4	Витрата води в основному режимі	т/год	1235
5	Витрата води в піковому режимі	т/год	2460
6	Нижча робоча теплота згоряння	МДж/м ³	36,1
7	Витрата палива	т/год (м ³ /год)	11,5
8	Тип, марка пальників	-	РГМГ-30
9	Кількість пальників	шт.	3
10	Площа поверхні нагріву	м ²	2710
11	Температура відхідних газів	°С	120
12	Температура води на вході в котел	°С	70
13	Температура води на виході з котла	°С	150
14	Розрахунковий ККД	%	93
15	Діапазон регулювання теплопродуктивності по відношенню до номінальної	%	30-100

Якщо основні котли та турбіни зупиненні, три пікових водогрійних котли зможуть максимально видати в тепломережу сумарно 348,9 МВт теплової енергії, яка використовуватиметься на опалення. Розрахунок витрат палива за методикою [5].

$$B = \frac{Q_{кор}}{Q_n^P \cdot \eta_K} \cdot 100, \frac{\text{м}^3}{\text{с}} \text{ або } \frac{\text{кг}}{\text{с}}, \quad (1)$$

де $Q_{кор}$ – теплове навантаження 348,9 МВт;

η_K – 93 %;

Q_n^P – нижча теплота згоряння природного газу становить 34,54 МВт [6];

Q_n^P – нижча теплота згоряння мазуту становить 40,53 МВт [7];

Витрата газу:

$$B = \frac{348,9}{34,54 \cdot 93} \cdot 100 = 10,862 \text{ м}^3/\text{с}. \quad (2)$$

Витрата за годину: $10,862 \cdot 3600 = 39103,2 \text{ м}^3/\text{год}$

Витрата мазуту:

$$B = \frac{348,9}{40,53 \cdot 93} \cdot 100 = 9,256 \text{ кг/с}. \quad (3)$$

Витрата за годину: $9,256 \cdot 3600 = 33321,6 \text{ кг/год}$.

Економічне порівняння за актуальними цінами 2026 року: вартість газу для теплоелектроцентралей, які виробляють електрику в теплофікаційному циклі, коштуватиме 21000 грн за 1000 кубометрів [8], вартість мазуту М-100 в середньому 23000 грн за тону [9]. Ціна при роботі на газу за 1 год: $39,103 \text{ тис. м}^3 \cdot 21000 = 821163 \text{ грн}$. Ціна при роботі на мазуті за 1 год: $33,321 \text{ т} \cdot 23000 = 766383 \text{ грн}$.

Висновки. За актуальними цінами 2026 року, вартість роботи на мазуті протягом однієї години становить 766383 грн, що на 54780 грн дешевше порівняно з використанням газу 821163 грн. Але попри нижчу вартість самого мазуту, його використання потребує врахування супутніх експлуатаційних витрат, таких як енергія на підігрів мазутосховищ, робота насосного обладнання та потенційні екологічні штрафи за викиди. Хоча спалювання мазуту демонструє пряму економічну вигоду за вартістю палива, використання природного

газу є доцільнішим з огляду на менші супутні експлуатаційні витрати та екологічні чинники.

Перелік посилань:

1. Різниця між ТЕС і ТЕЦ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dovidka.biz.ua/riznitsya-mizh-tes-i-tets>.
2. Типи теплових електростанцій та принцип їх роботи [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-5/part-1/50-entsiklopediya/rozvitok-teploenergetiki-ta-gidroenergetiki/chasina-1-teploenergetika/rozdil-1-osnovni-ponyattya-u-teploenergetitsi/125-1-2-tipi-teplovikh-elektrostantsij-ta-printsip-jikh-roboti>
3. Технологічна енергоємність комбінованих циклів парогазових станцій [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://energy.kpi.ua/article/view/272083/267706>
4. Котли водогрійні серії ПТВМ та КВГМ [Електронний ресурс]. – Режим доступу: https://energetik.ua/ua/catalog/vodogriyni_kotly/.
5. Розрахунок топки : метод. вказівки до розрахунково-графічної роботи з дисципліни «Парові котли» / уклад. Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут». – Київ : НТУУ «КПІ», 2014.
6. Маржинальна ціна [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://teplobud-pcf.com/>.
7. Мазут: загальна інформація [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://sunriselog.com.ua/uk/produksiya/mazut>.
8. Уряд підвищив ціну газу для виробників електрики [Електронний ресурс] // Укрінформ. – Режим доступу: <https://www.ukrinform.ua/rubric-economy/4047129-urad-pidvisiv-cinu-gazu-dla-virobnikiv-elektriki.html>.
9. Мазут: ціни [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://flagma.ua/uk/products/mazut/page-5/>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Приходько Н. С.

¹ Доц., к.т.н. Рачинський А. Ю.

<https://scholar.google.com/citations?hl=en&user=QSlPFOMAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКОЛОГІЧНИХ ТА ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ СПАЛЮВАННЯ ПЕЛЕТ У ПОБУТОВИХ КОТЛАХ

Вступ та актуальність дослідження. Система теплоенергетики України значною мірою залежить від природного газу, частка якого в опаленні житлових і комунальних об'єктів у деяких регіонах перевищує 90%. В умовах воєнного стану та нестабільності постачання традиційних енергоносіїв зростає потреба у впровадженні альтернативних джерел енергії, здатних підвищити енергетичну безпеку держави та зменшити негативний вплив на довкілля. Одним із перспективних рішень є використання біопаливних пелет, які виготовляються з відходів деревообробної та аграрної промисловості. Під час їх спалювання утворюється кількість CO_2 , близька до тієї, що поглинається рослинами під час росту, тому таке паливо вважають умовно вуглецево-нейтральним. Крім того, виробництво агропелет сприяє раціональній утилізації органічних відходів та зменшенню викидів парникових газів.

Мета та об'єкт дослідження. Метою даної роботи є проведення комплексної оцінки енергетичної ефективності та екологічних показників процесу спалювання шести типів паливних пелет, які представлені на ринку України, у побутовому водогрійному котлі типу «СЕТ-25» потужністю 25 кВт, обладнаному ретортним пальником. Об'єктом дослідження є процеси тепломасообміну та формування шкідливих викидів (NO_x і CO), що виникають під час спалювання біопалива. Предметом дослідження виступають емісійні характеристики котла при використанні різних видів пелет, зокрема виготовлених з твердих і хвойних порід деревини, рапсу, агробіомаси та донних мулових відкладень.

Методика дослідження та технічні параметри. Дослідження проведено з використанням CFD-моделювання у програмному середовищі ANSYS Student. Було створено тривимірну модель водогрійного котла, яку перевірено шляхом порівняння результатів розрахунку з паспортними характеристиками обладнання при спалюванні пелет із твердих порід деревини. Відхилення між розрахунковими та довідковими даними становило не більше 2%, що свідчить про достатню точність математичної моделі та можливість її використання для аналізу різних видів біопалива. У розрахунках прийнято коефіцієнт еквівалентності 0,76, що відповідає режиму роботи ретортного пальника з надлишковою подачею повітря. Вуглецеве число палива (Fuel Carbon Number) прийнято рівним 1. Для формування PDF-таблиць застосовано модель рівноважної хімії (Equilibrium Chemistry), яка дає змогу враховувати процеси дисоціації та точніше визначати температуру полум'я порівняно зі спрощеними підходами. У розрахунковій моделі враховано основні механізми утворення оксидів азоту: термічний механізм (механізм Зельдовича); механізм «швидких» NO ; утворення NO через проміжну сполуку N_2O . Для врахування нерівноважних процесів, зокрема надрівноважних концентрацій активних радикалів та субрівноважних температур, використано опцію Laminar Flameless, що є важливим для більш точного прогнозування емісії NO_x .

Результати дослідження. Проведений аналіз структури полум'я показав, що виділення летких компонентів палива та основне вигорання вуглецю відбуваються переважно в межах ретортного пальника. Для пелет із хвойних порід деревини, рапсу та донних мулових відкладень характерне інтенсивне перемішування палива з окислювачем, що свідчить про високу швидкість процесу горіння. За таких умов для підтримання

номінальної теплової потужності котла може виникати потреба у збільшенні витрати палива. Утворення оксиду вуглецю (CO) відбувається головним чином у зоні первинного горіння. Найбільші локальні значення концентрації CO становлять близько $0,05 \text{ мг/м}^3$ при використанні пелет із мішаної деревини різних порід, що пов'язано з інтенсивністю теплових процесів у зоні горіння та подальшим тепловим ефектом від догоряння цього компоненту. Разом із тим конструкція котла забезпечує майже повне окиснення CO в паливній та конвективній частинах, що значно зменшує його потрапляння у димові гази. Найбільш важливим екологічним показником є концентрація оксидів азоту (NO_x), рівень яких суттєво визначається хімічним складом використовуваного палива. Результати розрахунків показали, що найвищі значення (до 550 ppm) спостерігаються під час спалювання пелет із донних мулів, що пояснюється підвищеним вмістом азотовмісних компонентів у вихідній сировині. Найменші значення (близько 180 ppm) характерні для пелет з твердих порід деревини. Для пелет із хвойної деревини, рапсу та агропелет показники емісії NO_x знаходяться в діапазоні 220–320 ppm. Отримані результати вказують на доцільність оптимізації режимів горіння під час використання альтернативних біопалив з метою зменшення утворення NO_x та забезпечення відповідності екологічним вимогам.

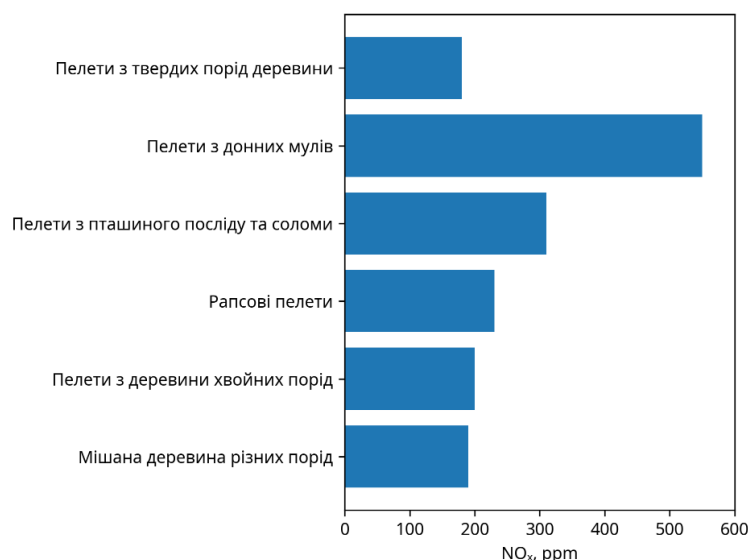


Рисунок 1 – Діаграма осереднених за площею димаря значень NO_x в [ppm] в залежності від типу спалюваних пелет

Висновки. Проведене дослідження підтвердило ефективність CFD-моделювання як інструменту попередньої оцінки екологічних та енергетичних характеристик побутових котлів. Котел типу «СЕТ-25» здатний забезпечувати стабільні теплотехнічні показники при спалюванні різних видів біопаливних пелет, однак рівень емісії NO_x істотно залежить від хімічного складу палива. Отримані результати мають практичне значення для проектування та модернізації систем теплопостачання та можуть бути використані при розробленні заходів щодо зниження викидів шкідливих речовин.

Перелік посилань:

1. Рачинський А. Ю., Баранюк О. В. CFD-моделювання прийнятності застосування поширених на ринку України пелет як палива для пелетного котла з пальником ретордного типу. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 3. С. 47–55.
2. Рачинський А. Ю., Баранюк О. В., Пікенін О. О., Бордіян А. І. Викиди забруднювальних речовин від спалювання поширених на ринку України пелет як палива для пелетного котла з пальником ретордного типу. Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2025. № 5. С. 41–50.

¹ Бакалаврант 4 курсу Степанченко А. А.

¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОЄКТУВАННЯ ОХОЛОДЖУВАЧА ДЛЯ ГАЗОГЕНЕРАТОРА МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

Постановка проблеми та її актуальність. Перед використанням генераторного газу для живлення двигунів внутрішнього згорання потрібно його охолодити. Попередні дослідження показали, що температура синтез-газу після газогенератора 500–550 °С зависока для стабільної роботи ДВЗ [1].

Аналіз останніх досліджень. Проблематика охолодження палива та повітря досить розповсюджена інженерна задача, адже будь який двигун ДВЗ потребує певної температури палива для досягнення високого ККД. Для випадку використання синтез-газу, що має високу температуру, ця проблема є досить суттєвою.

Так у роботі [2] авторами доведено актуальність очищення, охолодження та удосконалення технологій газифікації. Та розглянуто конкретні приклади застосування технології газифікації.

У статті [3] розглянуто технологію, яка одночасно дозволяє і охолодити газ і очистити його, що в свою чергу підвищує ефективність роботи всієї установки.

У науковій роботі [4] описано створення теплообмінника з алюмінію для невеликого газогенератора та доведено його ефективність.

Формулювання мети. Метою даної роботи є проєктування охолоджувача генераторного газу на основі природної конвекції та верифікація на основі CFD моделювання.

Основна частина. Розрахунок базується на стандартних закономірностях. Для розрахунку розмірів теплообмінника було використано основне рівняння теплопередачі:

$$F = \frac{Q}{K \cdot \Delta t_{\log}}, \quad (1)$$

де F – це розрахункова площа поверхні теплообміну, м²; Q – теплове навантаження, Вт; $\Delta t_{\log}$ – середньологарифмічний температурний напір між гарячим газом та холодним повітрям, °С; K – коефіцієнт теплопередачі, який враховує всі термічні опори, Вт/(м²·К). Середньологарифмічний температурний напір визначається за формулою:

$$\Delta t_{\log} = \frac{\Delta t_{\text{більша}} - \Delta t_{\text{менша}}}{\ln\left(\frac{\Delta t_{\text{більша}}}{\Delta t_{\text{менша}}}\right)}, \quad (2)$$

де $\Delta t_{\log}$ – середньологарифмічна різниця температур (°С);

$\Delta t_{\text{більша}}$ – більша різниця температур теплоносіїв на одному з кінців апарату, °С;

$\Delta t_{\text{менша}}$ – менша різниця температур теплоносіїв на іншому кінці апарату, °С.

Рівняння природної (теплової) тяги має вигляд:

$$\Delta P_{\text{тяги}} = H \cdot g \cdot (\rho_{\text{хол}} - \rho_{\text{гар}}), \quad (3)$$

де $\Delta P_{\text{тяги}}$ – тиск природної тяги (Па);

H – робоча висота димоходу (кожуха), в якому відбувається нагрівання повітря (м);

g – прискорення вільного падіння (м/с^2);
 $\rho_{\text{хол}}$ – густина холодного повітря на вході в кожух;
 $\rho_{\text{гар}}$ – густина нагрітого повітря на виході з кожуха (кг/м^3).

Для верифікації аналітичних розрахунків було проведено числове моделювання газодинамічних та теплових процесів (CFD) у програмному середовищі SolidWorks Flow Simulation. Створено 3D-модель вертикального багатоходового апарату (рис. 1). Моделювання враховувало розподіл температур від 773 К на вході до робочих значень на виході. Враховано в'язкість синтез-газу та зміну густини повітря в кожусі залежно від температури для моделювання гравітаційного потоку (ефект тяги).

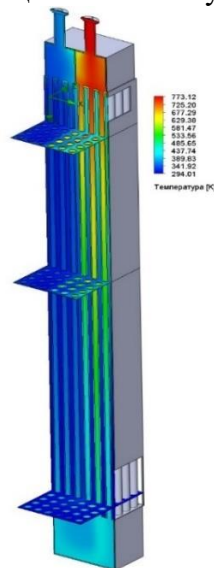


Рисунок 1 – Розподіл температури синтез-газу та повітря при стаціонарному режимі роботи теплообмінника

CFD-аналіз підтвердив формування стійкої природної конвекції. Порівняння результатів з емпіричними розрахунками показало невеликі розбіжності, які знаходяться в межах допуску для роботи ДВЗ.

Висновки. За результатами розрахунків спроектовано вискоелективний багатоходовий вертикальний теплообмінник, здатний стабільно розсіювати надлишкове тепло та охолоджувати синтез-газ до робочої температури. Головна перевага установки полягає в її абсолютній енергонезалежності: відкритий зовнішній кожух працює за принципом димоходу і створює потужну природну тягу, яка з достатнім запасом долає внутрішній аеродинамічний опір системи без використання електричних вентиляторів.

Перелік посилань:

1. Homdoun N., Dussadee N., Sasujita K., Kiatsiriroatb T. and Tippayawongb N. Performance Investigation of a Gasifier and Gas Engine System Operated on Municipal Solid Waste Briquettes. Journal of Renewable Energy Development. № 8 (2) 2019 p. 179-184. Doi: <https://doi.org/10.14710/ijred>.
2. Gas Cleaning from Gasification for Production of Biofuels and Biochemicals J. Hrbek, C. Pfeifer, P. Blanco-Sanchez, R. Baldwin, M. Swanson, J. Strege. Task 33. 2025. URL: https://www.ieabioenergy.com/wp-content/uploads/2025/04/Gas-cleaning-from-gasification-for-production-of-biofuels-and-biochemicals_final.pdf.pdf?utm_source.
3. Akhator, P. E. and 2Obanor, A.I. DEVELOPMENT OF A CONVECTIVE SYNGAS COOLER FOR SYNGAS CLEANING IN BIOMASS GASIFICATION PROCESS. , Journal of Engineering for Development Vol. 15(1). 2023 p. 13–25 URL: <https://www.researchgate.net/publication/375635972>.
4. M. M. Mahadzir and 1M.Hefni. The Design and Fabrication Heat Exchanger for Small Downdraft Gasifier in UiTM Pulau Pinang. Journal Of Industrial Engineering Research. № 4(3). 2018 p. 6-12. URL: <https://www.researchgate.net/publication/330776374>.

¹ Luschnig O., Bürger C.

² Sen. lect., cand.eng.sc. Vlasenko O. V.

<https://scholar.google.com/citations?user=-Ih8IfYAAAAJ&hl=uk>

¹ Bio-H2-Umwelt GmbH, Jena, Germany

² Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

THE IMPORTANCE OF USING BIOGAS TECHNOLOGIES IN UKRAINE

Statement of the problem and its relevance. In Ukraine, it is more urgent than ever to develop biogas technologies and organize their use in industry. This direction is potential for creating a new resource and energy saving program, without which the further development of the state is impossible in modern political, economic conditions and military situation. Expanding the scope of effective use of the potential of organic waste at all stages of product production is an important and necessary stage in the development of biogas technologies, which should sooner or later become advanced technologies in Ukrainian industry and reduce Ukraine's energy dependence on traditional fossil energy resources. The main factor in the effective use of biogas is its cost, which can vary widely, and the specific cost of purification methods, which, as a rule, add 20 - 100% to the initial price.

To address the issues of producing heat and electricity from biogas, the Department of Heat and Alternative Energy began cooperation with the company Bio-H2-Umwelt GmbH (Germany, Jena) within the framework of the EPW-4884 project "Ukraine Energy Autark" – a German-Ukrainian phased model with state support from the Federal Republic of Germany in order to improve the professional level, skills and abilities in obtaining renewable energy [1].

The experience of the Bio-H2-Umwelt GmbH company is effective in converting biomass into electrical and thermal energy by cogeneration plants, and the prospects for using it to generate electrical and thermal energy and to meet the biogas plants' own needs for heat and electrical energy. As well as using thermal energy for heating and hot water supply of the population [1].

Analysis of the latest research. The development of biogas technologies creates positive energy, environmental and social effects. The development of the biogas market in Ukraine will allow replacing 2.6...18 billion m³ of natural gas per year, which will contribute to strengthening the country's energy security, creating new jobs, economic development of regions, will allow covering peak loads in the power grid, utilizing crop production waste, as well as some food industry waste [2].

Biogas is a gas obtained by hydrogen or methane fermentation of biomass. Biogas plants are used to produce first-generation biofuels. Their advantage is the possibility of useful utilization of organic waste from livestock, crop production, household waste, wastewater, etc. with a positive energy, environmental, social and economic effect [3, 4]. Biogas technologies fit into the UN doctrine of sustainable development of society. According to this doctrine, waste and by-products of one production (livestock, crop production, etc.) are input for a biogas plant. And the waste from a biogas plant is used as high-quality fertilizers in agriculture [3]. Biogas technologies can become an obligatory element of livestock, agro-processing, and food enterprises.

Analysis of the prospects for the development of heat supply systems shows that the coverage of heat loads will be ensured by burning organic fuel [2].

In modern developed countries of the world, the main part of the extracted fuel and energy resources is spent on generating electricity and heat of low and medium potential [2].

Promising conventional energy technologies have increased energy efficiency, but have not improved the environmental situation – thermal, chemical and radioactive pollution of the environment with potentially catastrophic consequences. The negative trend in the development

of traditional energy is mainly due to the existence of two factors – the rapid depletion of natural resources and environmental pollution. According to the UN, coal reserves are expected to be exhausted between 2082–2500. In this regard, on the one hand, it is necessary to find opportunities for the rational use of traditional energy resources, and on the other hand, it is necessary to develop scientific and technical work on the use of non-traditional energy and renewable energy [3].

The aggravation of environmental problems, the depletion of non-renewable energy resources, and the increase in their prices have led to global interest in the development and use of the technology of bioconversion of organic waste for energy production.

According to scientific and technical forecasts for the future, biomass conversion is the most common energy resource among renewable energy sources.

Goal formulation. The goal of the work is to analyze the efficiency of converting biomass into electrical and thermal energy to meet the own needs of enterprises in heat and electrical energy. As well as the use of thermal energy for heating and hot water supply of the population of Ukrainian cities.

Main part. Biogas production is a promising area of renewable energy for Ukraine. It can be obtained at biogas plants located near water treatment plants, organic waste landfills and agricultural enterprises, and also transported for the needs of large and energy-intensive Ukrainian industrial enterprises, especially metallurgical ones. In addition, the production of this energy resource is rapidly growing in the EU countries and has good prerequisites and prospects in Ukraine, a country characterized by unreasonably high energy consumption compared to world indicators; critical dependence on unstable supplies from external markets; high and unstable natural gas prices, trends towards their increase for all categories of consumers [5-6].

Important information about the raw material can be obtained using the method: Depending on the type of laboratory analysis, the following can be determined: - Calculation of the theoretical biogas and methane potential directly from the analysis results - Evaluation of the fermentation process (e.g. residence time) and potential process problems (inorganic load, e.g. HTK).

Which substrate analyses are important are shown in table 1. And fig. 1 shows the technological platform for biogas production.

Table 1 – Substrate analyses

Analyse	Goal
TS/oTS definition	Water, dry matter and organic dry matter content, among others, to calculate the room load.
Weender Information Technology Analytics	Analysis of the content of phosphorus, fluorine, potassium in the solution for calculating the specific potential of methane
Chemical Oxygen Demand (COD) Biological Oxygen Demand (BOD / BOD5, etc.)	Analysis of equations for calculating specific / Methanogenic potential at 1 kg CSB = 0.35 m ³ CH ₄
Determination of the C:N:P:S ratio	Balance of macronutrients Optima: 600: 15: 5: 3 3000: 50: 3: 1 = 900: 15: 1.5: 0.9
Determination of the content of microelements	Balance of microelements in raw materials
Batch testing according to VDI 4630	Experimental determination of methane potential. But: it depends on the inoculum.

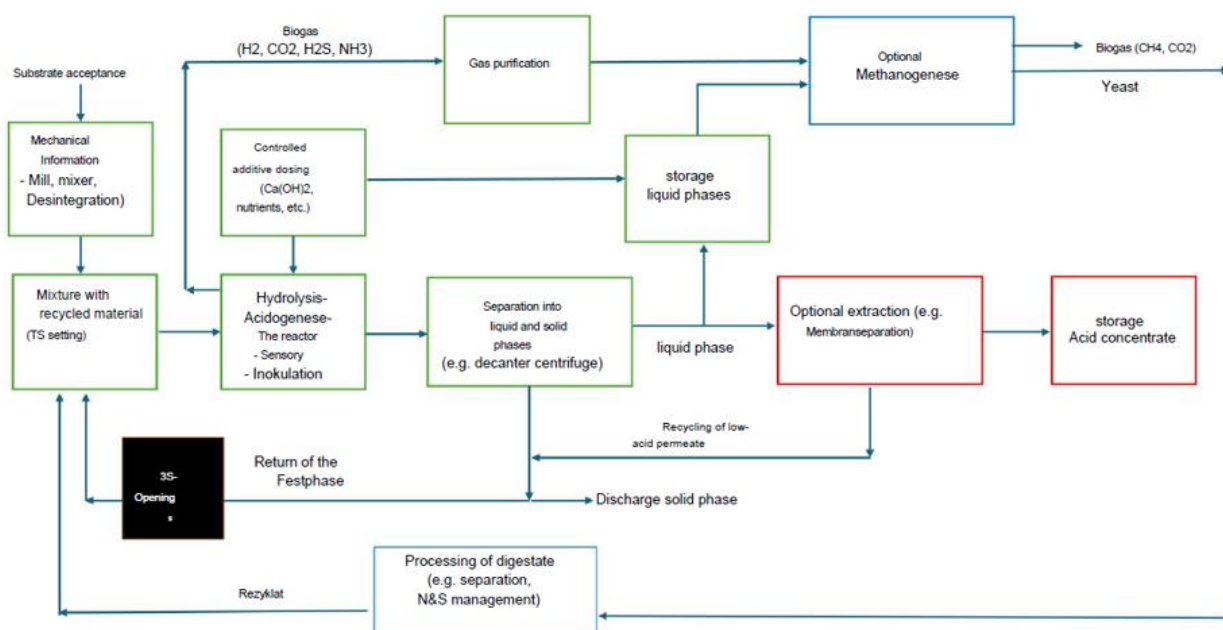


Figure 1 – Technological platform

The total potential for biogas production from agricultural waste, food industry, landfills, municipal wastewater and industrial enterprises in Ukraine is estimated at 3.2 billion m³ per year in methane equivalent [6]. In addition, 3.3 billion m³ can be obtained by growing various types of energy crops on relatively small areas. However, to date, there are no examples of biogas production for industry in Ukraine, although such technologies have been used for many years in developed countries of the world.

Conclusions.

The problem of the efficiency of biogas technology is relevant and needs to be solved by optimizing the energy and environmental characteristics of various processes during its direct combustion to create the necessary temperature regime or generate electricity for industrial needs. The choice of the optimal direction for specific conditions of the enterprise is ambiguous. First of all, it is necessary to strive to use the energy contained in biogas as efficiently as possible, taking into account the peculiarities of the equipment, operating modes and the quality of the gas mixture.

References:

1. Bio-H2-Umwelt GmbH. Access mode: <https://www.bio-h2.de/>.
2. Geletukha G., Kucheruk P., Matveev Yu. (2014). Prospects of Biomethane Production and Use in Ukraine, *UABio*, no. 11, 42 p., Access mode: <https://uabio.org/wp-content/uploads/2020/04/position-paper-uabio-11-en.pdf>.
3. BITECO (2013), *Biogas*, Access mode: <https://biteco-energy.com/ua/info/biogas/>
4. Energy Systems-Ludger SC (2022), *Biogas plants. Cogeneration plants, mini CHP plant TESSARI Energia (Italy) on biogas*, Access mode: <http://www.esludger.com.ua/uk/Kogeneratsiyni-ustanovki/kogeneratsijni-ustanovki-mini-tets-na-biogazi-biogazovi-ustanovki.html>.
5. Tkachenko S., Vlasenko O., Resident, N., Stepanov D., Stepanova N. Cooling and of the fluid in the cylindrical volume. *Acta Innovations*. 2021. No. 42. P. 15-26. Access mode: <https://doi.org/10.32933/ActaInnovations.42.2>.
6. Tkachenko S. Y. Biohazovi tekhnolohii. Rehuliarnyi teplovyyi rezhym : monohr. / S. Y. Tkachenko, O. V. Vlasenko. – Vinnytsia : VNTU, 2023. – 132 s. – ISBN-e 978-966-641-937-1. – ISBN 978-966-641-943-2. – URL: <https://press.vntu.edu.ua/index.php/vntu/catalog/book/782>.

¹ Доц., к.т.н. Баранюк О. В.

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=m7CSuP0AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЧИСЕЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК КОТЛА ГМ-50 В ДІАПАЗОНІ НАВАНТАЖЕНЬ 40-100 % ПРИ ПЕРЕХОДІ З ПРИРОДНОГО ГАЗУ НА БІОГАЗ

Постановка проблеми та її актуальність. Дане дослідження спрямоване на розв'язання важливої науково-технічної проблеми – підтвердження доцільності експлуатації парових котлів серії ГМ-50 (Е-50-3,9-440ГМ) при їх переході на альтернативні газові суміші. Необхідність роботи диктується вимогами Директиви 2010/75/ЄС та Наказу Мінприроди № 541 щодо декарбонізації енергетики, а також критичним рівнем зносу вітчизняного котельного парку. Мета полягає у визначенні кореляцій між видом палива, режимом навантаження та відповідними змінами теплофізичних, екологічних і міцнісних параметрів агрегату.

Наукова новизна зумовлена розкриттям ролі діоксиду вуглецю у процесах формування факела. Доведено, що використання біогазу мінімізує максимальні температури в просторі паливні на 100–150 °С, що суттєво гальмує генерацію термічних NO_x. Водночас зростання концентрації трьохатомних газів підсилює променистий теплообмін, що сприяє гомогенізації теплового навантаження на екранні поверхні.

Практичне значення результатів полягає у створенні моделі для оцінки напружено-деформованого стану та прогнозування довговічності барабанів котлів ГМ-50. Перехід на біогаз дозволяє реалізувати щадний тепловий режим, що є ключовим фактором для надійної роботи обладнання у маневрених графіках навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Актуальні світові тенденції у сфері моделювання спалювання біопалива (зокрема у дослідженнях 2024–2025 рр.) акцентують увагу на нестационарних режимах та застосуванні водневих добавок для стабілізації факела, проте специфіка маневреності котлів типу ГМ-50 висвітлена недостатньо. Сучасні праці [1, 2] вказують на те, що етап зниження навантаження (load-falling stage) у потужних котлоагрегатах супроводжується складними перехідними явищами, які вимагають глибокого CFD-аналізу для нівелювання термічних перекосів. Згідно з висновками [3], створення прецизійних моделей промислових установок на біомасі є фундаментом для впровадження інтелектуальних систем автоматичного керування у змінних режимах.

Експериментально доведено [4], що при розвантаженні жаротрубних котлів у діапазоні 50–100 % потужності ККД може дещо підвищуватися через зниження температури вихідних газів, проте це супроводжується ризиком хімічного недопалу, що потребує надточного регулювання співвідношення паливо-повітря. Крім того, перехід на біогаз дозволяє скоротити викиди парникових газів на 50–70 % порівняно з метаном, що є стратегічно важливим для реалізації концепції Net Zero до 2050 року. Зокрема, моделювання термонапруженого стану при таких змінах паливної бази дозволяє підтримувати високу надійність барабанів-сепараторів.

Формулювання мети. Мета роботи є встановлення закономірностей зміни теплотехнічних, екологічних та термомеханічних показників котла ГМ-50-1 при диверсифікації паливної бази та роботі на змінних навантаженнях.

Основна частина. Для імітації маневреності котлоагрегату ГМ-50 реалізовано комплексний підхід, в основі якого лежить чисельне розв'язання тривимірних диференціальних рівнянь збереження маси, енергії та імпульсу (осереднені за Рейнольдсом

рівняння Нав'є-Стокса – RANS). Моделювання роботи установки в діапазоні теплової потужності 40–100 % здійснювалося через розробку серії сценаріїв з пропорційним коригуванням масових витрат окиснювача та палива (природного газу і біогазу). Відповідно до матеріального балансу та режимних карт експлуатації котлів типу ГМ, у моделі забезпечувався стабільний коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 1,05$. Вхідні швидкості потоків адаптувалися до специфіки біогазу, об'ємна витрата якого є значно вищою внаслідок вмісту баластного CO_2 . Такий підхід дозволив відтворити реальні умови експлуатації та забезпечити стабільність процесу спалювання на знижених навантаженнях.

Моделювання процесів у паливній котла виконувалося в студентській версії програмного комплексу ANSYS Fluent, що є безкоштовною з 2015 року.

Для моделювання використовувався склад біогазу очисних споруд Бортницької станції аерації в м. Києві. Цей біогаз містить 67,76 % CH_4 ; 31 % CO_2 ; 0,44 % O_2 ; 0,57 % N_2 ; 0,13 % H_2 ; 0,04 % H_2S .

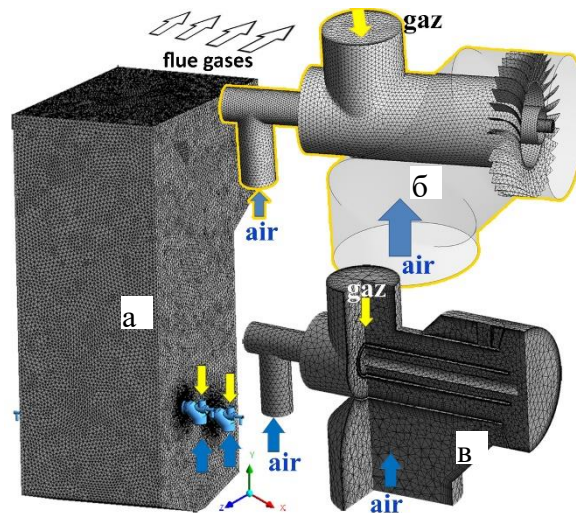


Рисунок 1 – Розрахункова область задачі:

а – зображення скінчено-елементної сітки котла; б – зовнішній вигляд сітки пальника ГМГ-5.5; в – поздовжній переріз пальника ГМГ-5.5, що використаний в моделі

Для дискретизації топочного простору котла ГМ-50 було використано гібридну скінченно-елементну сітку, що дозволило поєднати гексагональні елементи у стабільних зонах із тетраедричними в областях складної геометрії. Такий підхід забезпечив високу точність розрахунку градієнтів параметрів при раціональних витратах обчислювальних ресурсів. Особливу увагу приділено зонам хімічних реакцій: локальне згущення сітки (Sizing) та параметр Relevance Center у положенні «Fine» дозволили детально відтворити аеродинаміку поблизу пальників ГМГ-5.5 із врахуванням лопаткових завихрювачів. Для коректного опису пристінкового теплообміну на екранах застосовано механізм Inflation. Дослідження сіткової незалежності рішення (Grid Convergence Study) підтвердило, що обрана щільність розбиття забезпечує інваріантність інтегральної температури та концентрацій NO_x . Це гарантує високу достовірність результатів навіть у межах обмежень студентської версії ANSYS-Fluent.

Для забезпечення достовірності результатів у всьому діапазоні навантажень (40 – 100 %) проводилося багаторазове уточнення розрахунків температурного поля залежно від кроку між вузлами.

Встановлено, що крок 3 мм між вузлами тетраедричної сітки є оптимальним, оскільки подальше подрібнення не призводить до кількісної або якісної зміни розподілу теплових та температурних полів.

Загальна кількість вузлів моделі, що становить близько 200 тис., є достатньою для коректного відтворення гідродинамічних процесів у паливній котла при збереженні прийнятної швидкості обчислень.

При роботі на низькому навантаженні (40 %), коли швидкості потоків та інтенсивність турбулентного перемішування знижуються, обраний крок сітки 3 мм дозволяє точно зафіксувати зону запалювання та профіль локальних теплових потоків, що критично важливо для аналізу термомеханічної надійності барабана.

Рішення вважалось незалежним від сітки лише тоді, коли температурне поле в об'ємі паливної стабілізувалось, що підтверджено верифікаційними розрахунками з похибкою до 0,008% порівняно з аналітичними моделями.

Дослідження емісійних характеристик підтвердило суттєве зниження викидів оксидів азоту (на 45–60 %), що корелює з даними [5]. Проте отримані результати розширюють наявні уявлення: встановлено, що для вихрових пальників ГМГ-5.5 ефект деноксифікації є стабільним навіть при глибокому розвантаженні до 40 %. Це спростовує припущення про дестабілізацію горіння низькокалорійних газів при малих швидкостях, висунуті у роботі [3]. Застосування моделі EDC (Eddy Dissipation Concept) дозволило деталізувати радикальний склад у зоні горіння, забезпечивши вищу точність прогнозу емісії NO_x порівняно з підходами Fast Chemistry. Окрему наукову увагу привертає ефект «променистої компенсації»: попри зниження температури біогазового факела, висока концентрація триатомних газів (CO_2 , H_2O) підсилює радіаційний теплообмін. Даний факт підтверджує необхідність коригування нормативних методик розрахунку ККД, які часто недооцінюють внесок газового випромінювання.

Висновки. Виконане в роботі моделювання дозволило виявити пряму кореляцію між деконцентрацією температурного ядра факела та зниженням емісії NO_x , а також зниження пікових температур на 100–150 °С при спалюванні біогазу є визначальним фактором для стабільного пригнічення термічного механізму утворення азотних сполук.

CFD-моделювання підтверджує, що при переході на біогаз об'ємні концентрації NO_x скорочуються на 45–50 %. На номінальному навантаженні максимальні значення досягають 385 ppm, проте при маневреному розвантаженні до 60 % та 40 % пікові значення падають до 192,6 ppm, що забезпечує високу екологічність агрегату в умовах змінного графіку навантажень.

«Розмиття» температурного піку та рівномірний розподіл локальних теплових потоків (із піком до 246 472,0 Вт/м² при 100 % потужності) забезпечують «м'який» тепловий режим роботи екранних труб. Це дозволяє мінімізувати термомеханічні напруження в барабані-сепараторі та подовжити залишковий ресурс котла.

Перелік посилань:

1. Liu H., Zhang J., Wu S., & Li G. (2024). Numerical simulation of biogas and coal co-combustion in a 300 MW tangential furnace: Effects of co-firing ratio and burner tilt angle. *ACS Omega*, 9(12), 14215–14228. <https://doi.org/10.1021/acsomega.4c00885>.
2. Xin S., Yang W., & Miao Z. (2025). Advanced CFD analysis of flexible boiler operation: Transitioning from natural gas to low-calorific biogas in municipal heating systems. *Fuel*, 380, 132456. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2024.132456>.
3. Budde Mior L., dos Santos G., & Martins M. E. (2024). Numerical analysis of an industrial boiler operating with biogas: Impact of load variations on efficiency and emissions. *Applied Thermal Engineering*, 236(1), 121511. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.121511>.
4. Bakkaloglu S., & Hawkes A. (2024). Global methane emissions and mitigation strategies in the biogas sector: A comprehensive review of measurement and modeling techniques. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 189, 113942. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113942>.
5. Trubachev M. A., & Belousov V. V. (2024). Influence of thermophysical properties of biogas combustion products on thermal calculations of hot water boilers. *Bulletin of BSTU named after V.G. Shukhov*, 9(10), 63–71. <https://doi.org/10.34031/2071-7318-2024-9-10-63-71>.

¹ Мол. вчений Беднарська І. С.

¹ Доц., к.т.н. Риндюк Д. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=SAMbKroAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ НЕСТАЦІОНАРНОЇ ГАЗОДИНАМІКИ ТА РИЗИКІВ ВИСОКОЦИКЛОВОЇ ВТОМИ РЕГУЛЮВАЛЬНОГО КЛАПАНА ТУРБІНИ К-1000-60/3000

Постановка проблеми та її актуальність. Регулювальна арматура є важливим компонентом енергетичних систем, забезпечуючи точне управління потоками пара у широких діапазонах параметрів. Використання перфорованих решіток (сит) в конструкції клапанів спрямоване не тільки для захисту турбіни від потрапляння твердих абразивних часток від парогенератору або паропроводів (зварювальний грат, частинки окалини, елементи ущільнень), але й на розподіл перепаду тиску, зниження рівнів аеродинамічного шуму та стабілізацію потоку пари [1].

Проте складна топологія потоку в зоні перфорації стає джерелом інтенсивної генерації турбулентності та нестационарних пульсацій тиску. Ці процеси створюють динамічні навантаження на внутрішні елементи клапана, що за певних частотних характеристик може призвести до передчасного руйнування конструкції [2].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження вказують на те, що основною причиною вібрацій у клапанах є відрив шарів зсуву від крайок отворів та циклічний зрив вихорів [3]. Частота зриву вихорів корелює з числом Струхала, яке для більшості конструктивних елементів становить близько 0,2 [4].

Спектральний аналіз є загальноприйнятим стандартом для оцінки енергетичного розподілу таких пульсацій. Високоциклова втома виникає, коли кількість циклів навантаження перевищує $10^4 - 10^7$ [1]. У випадках високочастотних коливань (100–1000 Гц) критична кількість циклів може бути досягнута за досить короткий час експлуатації.

Формулювання мети. Метою даного дослідження є аналіз газодинамічних полів та спектральних характеристик статичного тиску в регулювальному клапані К-1000-60/3000 з ситом для ідентифікації зон максимальної завихреності та оцінки ризику виникнення високоциклової втоми матеріалу.

Основна частина. Результати чисельного моделювання (рис. 1) демонструють формування системи високошвидкісних струменів, що проходять крізь отвори сита. Максимальна швидкість потоку сягає 130 м/с. Це створює зони значних градієнтів швидкості безпосередньо за перешкодою, що є передумовою для інтенсивного вихороутворення. Розподіл статичного тиску (рис. 2) показує падіння параметрів від вхідного значення 6,38 МПа до вихідного рівня близько 5,7 МПа. Локальні зони зниженого тиску збігаються з ядрами вихорів, зафіксованими в полі завихреності.

Для оцінки динамічного впливу на конструкцію було проаналізовано статичний тиск у точці з максимальною завихреністю.

Згідно з даними амплітудного аналізу (рис. 3), зафіксовано значний пік амплітуди коливань тиску на рівні 400 кПа. Основна енергія збурення зосереджена в діапазоні частот до 250 Гц.

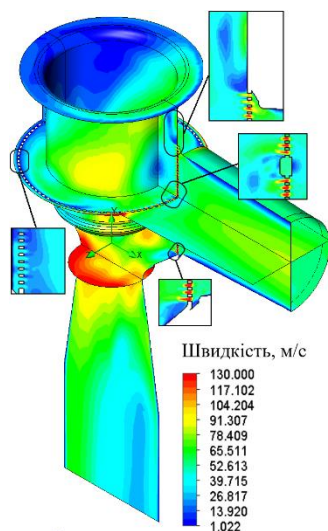


Рисунок 1 – Розподіл швидкостей теплоносія в клапані турбіни К-1000-60/3000

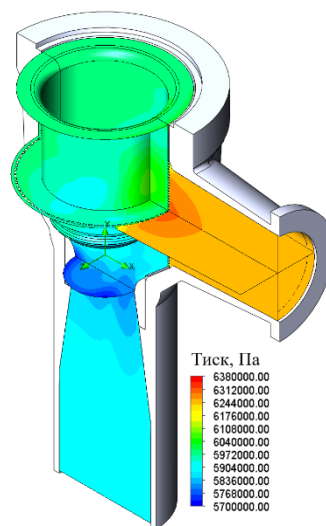


Рисунок 2 – Розподіл статичного тиску в клапані турбіни К-1000-60/3000

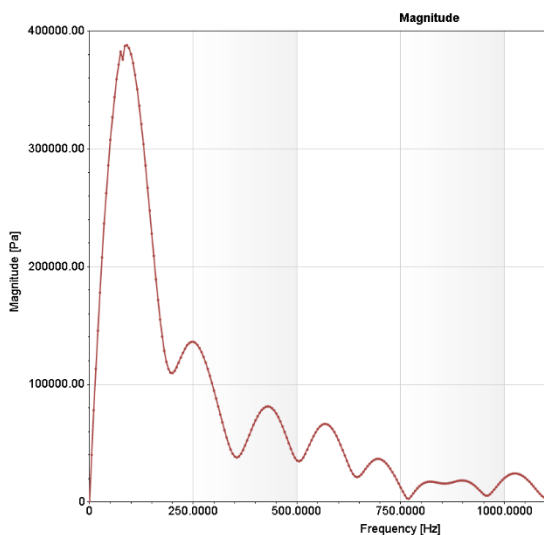


Рисунок 3 – Графік амплітуди статичного тиску в контрольній точці

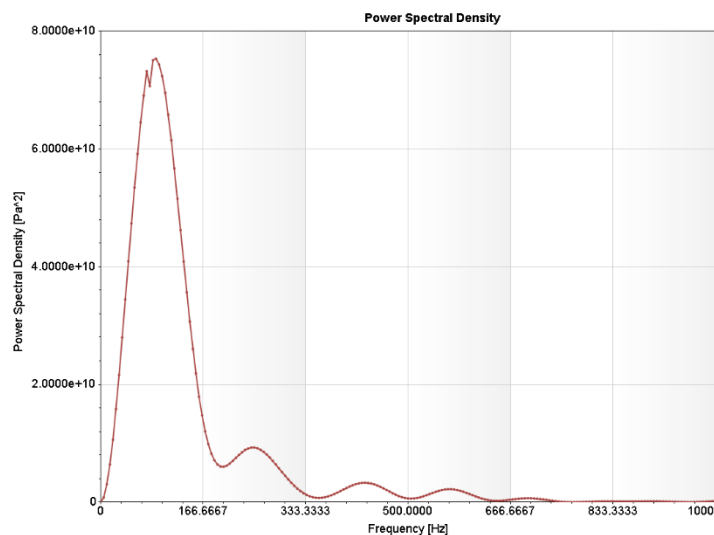


Рисунок 4 – Графік спектральної щільності потужності в контрольній точці

Графік спектральної щільності потужності (рис. 4) виявляє домінуючий енергетичний пік у районі 90 Гц зі значенням $8 \times 10^{10} \text{ Па}^2/\text{Гц}$. Це свідчить про наявність організованих великомасштабних вихрових структур, частота яких може входити в резонанс із власними частотами елементів клапана.

Пульсації тиску амплітудою 4 бари при частоті 90 Гц створюють умови для накопичення втомних пошкоджень. За такої частоти матеріал зазнає 360000 циклів навантаження на годину, що означає накопичення 10^7 циклів менш ніж за 30 годин роботи. Оскільки в зонах перфорації наявні значні концентратори напружень (гострі крайки отворів), локальні напруження можуть перевищувати границю витривалості сталі навіть за умови пружної деформації всього компонента. Це ініціює зародження мікротріщин, що згодом призводить до крихкого руйнування сита [4].

Висновки. У ході газодинамічного аналізу регулювального клапану турбіни К-1000-60/3000 встановлено, що потік через сито характеризується високою швидкістю (130 м/с) та інтенсивною завихреністю безпосередньо за ситом.

Спектральний аналіз виявив потужне джерело пульсацій статичного тиску з домінуючою частотою 90 Гц та піковою амплітудою 400 кПа.

Розрахункові дані підтверджують, що виявлені коливання тиску є основним фактором виникнення високоциклової втоми. Велика амплітуда коливань на фоні високої частоти спричиняє швидке накопичення втомних циклів у місцях концентрації напружень, що неминуче призведе до руйнування внутрішніх елементів клапана при тривалій експлуатації.

Перелік посилань:

1. Yang L., Li S., & Hou J. (2025). A Comprehensive Review of Flow-Induced Vibration and Fatigue Failure in the Moving Components of Control Valves. *Machines*, 13(9), 766. <https://doi.org/10.3390/machines13090766>.
2. Śmierciew K., Butrymowicz D., Karwacki J., & Gagan J. (2021). Numerical Prediction of Homogeneity of Gas Flow through Perforated Plates. *Processes*, 9(10), 1770. <https://doi.org/10.3390/pr9101770>.
3. Cicolin MM, Chellini S, Usherwood B, Ganapathisubramani B, Castro IP. Vortex shedding behind porous flat plates normal to the flow. *Journal of Fluid Mechanics*. 2024;985:A40. <https://doi.org/10.1017/jfm.2024.300>.
4. Millais M. (2017). *Building Structures: understanding the basics* (3rd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781315652139>.
5. Yuvaraj K., and Arunkumar G. (2025). Fatigue failure and structural integrity analysis of a 3-inch butterfly valve shaft using finite element modelling and microstructural evaluation. *Advances in Science and Technology Research Journal*, 19(5), pp.440–453. <https://doi.org/10.12913/22998624/202756>.
6. Риндюк Д. В., & Беднарська І. С. (2025). Вплив парового сита на напружено-деформований стан регулювального клапана. *Вчені записки*, 12025128. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/19>.
7. Беднарська І. С., & Риндюк Д. В. (2022). Визначення напружено-деформованого стану стопорно-регулюючого клапана АЕС з урахуванням газодинаміки робочого тіла. *Вчені записки*, 52022193. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2022.5/28>.

¹ Ст.викл. Меренгер П. П.¹ Проф., д.т.н. Борисенко А. В.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=8aKB0YMAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПУЛЬСАЦІЙ ВИТРАТИ ВУГІЛЬНОГО ПИЛУ, ЩО ЙДЕ НА ПАЛЬНИКИ КОТЛА

Постановка проблеми та її актуальність. Розробка і впровадження на діючих котлах засобів контролю витрати вугільного пилу при різних технологіях пилоподачі є завданням першорядної важливості. Ефективність спалювання вугільного пилу істотно залежить від рівномірності розподілу його по пальниках котла. Збурювання в системі пилоподачі викликають коливання надлишку повітря в пальниках, підвищення утворення оксидів азоту, інтенсифікують процеси шлакування та абразивно-корозійного зношування екранних поверхонь нагрівання, погіршують рідке шлаковидалення. Протягом ряду років на Трипільській ТЕС (ТпТЕС) співробітниками КПІ ім. Ігоря Сікорського проводилися дослідження з контролю витрати вугільного пилу на пальники котлів ТПП-210 А енергоблоків 300 МВт при традиційному пневмотранспорті (концентрація пилу $\mu = 0,5$ кг/кг при пилопроводі Ду-500 мм) і висококонцентрованої пилоподачі ($\mu = 70 - 200$ кг/кг, Ду-80 мм). Дослідження показали, що при традиційному пневмотранспорті в діапазоні навантажень енергоблоку $N_e = 240 - 300$ МВт нерівномірність розподілу палива по пальниках досягає 60 %, а контроль витрати палива, з метою усунення нерівномірності, можна здійснювати методом оптичної діагностики, гідродинамічним, тепловим і ємнісним методами та ін [1]. Методи є достатньою точними, надійними з нескладним приладовим оснащенням, незначними капіталовкладеннями і зручними у використанні в умовах експлуатації котлів ТЕС, кожен з них має свої переваги і недоліки.

Результати досліджень аеродинаміки пилопроводів ПВКТ і роботи пальників, проведених в тому числі КПІ ім. Ігоря Сікорського на котлі блоку К-300-240 ТпТЕС, виявили два яскраво виражених типи нерівномірності подачі пилу в часі: «високочастотні» пульсації при постійних значеннях факторів впливу ($\tau < 10$ с) і тривалі збурення витрати палива ($\tau > 40$ с), пов'язані з глибокими змінами режимних параметрів.

На нерівномірність подачі пилу першого і другого видів істотно впливають режими роботи бункера пилу (промбункера), аераційних пиложивильників та пилопроводів. Для усунення тривалих збурень потрібно мати надійне і безінерційне управління і можливість регулювати витрату вугільного пилу.

Однак «високочастотні» пульсації витрати палива, які негативно впливають на процес згоряння, не усуваються системою контролю подачі пилу. Тут необхідно підбирати режими і оптимізувати їх, а також вдосконалювати конструкцію елементів і схем.

Аналіз останніх досліджень. 1) Одним з поширених методів визначення витрати вугільного пилу є так званий *тепловий метод*. Тепловий метод дозволяє визначати витрату вугільного пилу в пилопроводі за ступенем охолодження первинного повітря, яке транспортує пил в пальник [8, 9]. Витрата палива $V_{пл}$ (кг/год) на пальник розраховується по залежності, що отримана з рівняння теплового балансу пилопроводу:

$$V_{пл} = 3600 \cdot Q_{пт} \cdot c_{п} \cdot (t_{гп} - t_{см}) - Q_{вт} \cdot c_{пл} \cdot (t_{см} - t_{пл}), \quad (1)$$

де $c_{п}$, $c_{пл}$ – теплоємність повітря і пилу, відповідно, кДж/кг; $t_{гп}$ – температура гарячого первинного повітря, °С; $t_{см}$ – температура пиловугільної аеросуміші, °С; $t_{пл}$ – температура вугільного пилу, °С; $Q_{вт}$ – втрати тепла в навколишнє середовище, кДж/год.

Таким чином, точність теплового методу визначається точністю вимірювання температур, витратою первинного повітря та втратою теплоти в навколишнє середовище.

2) В межах виконання кафедрою ТЕУ Т та АЕС (ТАЕ) держбюджетної науково-дослідної теми [2] був проведений аналіз *пульсацій світності факелів* у видимій та інфрачервоній частинах спектра за двома технологіями подачі пилу. Були виготовлені перетворювачі променистого потоку, які встановлювалися в оглядові віконця топки на трьох рівнях і «проглядали» її об'єм за напрямом руху факелу в топці. В якості первинних перетворювачів були використані германієві, кремнієві та арсенід-галієві фотодетектори.

Випромінювання молекул CO_2 і H_2O переважно розташоване в інфрачервоному діапазоні спектра: молекули H_2O випромінюють в області довжин хвиль $\lambda = 0,95; 1,12; 1,45; 1,87$ мкм, молекули CO_2 – $\lambda = 4,4$ мкм; смуги випромінювання при $\lambda = 2,5$ і $3,86$ мкм утворюються в результаті суперпозиції випромінювання обох молекул.

Встановлено, що в інфрачервоній області сигнал датчика в меншій мірі залежить від положення ядра факелу щодо поля зору пристрою, тому що продукти згоряння займають відносно великий об'єм топки. Вплив випромінювання від поверхонь топки більш сильний в інфрачервоній області, ніж у видимій та ультрафіолетовій областях.

3) Для виміру концентрації твердої фази у двохкомпонентному потоці **ємнісний метод** уперше був запропонований Г. Дотсоном [2]. Сутність методу полягає у вимірюванні діелектричної проникності матеріалу, що проходить між пластинами конденсатора. Відома велика кількість ємнісних витратомірів, що відрізняються формою електродів, схемами вимірювання ємності, способами установки первинних перетворювачів [2].

Формулювання мети. Отримані результати досліджень та аналіз пульсацій витрати аераційних пиложивильників дозволяють розглядати це як інструмент дослідження АПЖ та дають можливість вирішувати такі завдання:

1. Якісне дослідження впливу параметрів на різні характеристики АПЖ. Так як кроки варіювання для змінних пропорційно-однакові, то за допомогою поліномів можна оцінити частку, яку вносить кожний з параметрів.

2. Визначення можливості існування АПЖ з необхідними характеристиками в досліджуваному факторному просторі. За допомогою отриманих експериментальних даних можна перевірити реалізовані вимоги, пропоновані до пиложивильників в заданому діапазоні зміни параметрів. З'являється можливість порівняння різних АПЖ.

3. Рішення задачі оптимізації складних пристроїв за одним або кількома обраними показниками з різного роду обмеженнями. В результаті дослідження виявлені параметри, що оптимізують досліджувані показники. Показана можливість отримання на основі методів планування експериментів регулювати процес псевдозрідження в АПЖ, що може широко використовуватися при дослідженні та виборі раціональних параметрів нових типів аераційних пиложивильників.

Основна частина. В процесі експлуатаційних випробувань встановлено, що зниження пульсацій потоку аеросуміші («високоочастотні» коливання з частотою в межах $(20-40) \text{ хв}^{-1}$) можна забезпечити шляхом оптимізації тиску і витрати повітря для аерації пилу в камерах АПЖ і транспорту його до пальників, що забезпечується застосуванням АСР з індивідуальним регулюванням подачі аераційного повітря індивідуально на кожний аеропиложивильник, яка додатково враховує рівень пилу в промбункері (рис. 1 п. 15), продуктивність АПЖ (рис. 1 п. 5) та пов'язана з нею зміна концентрації пилу μ (рис. 1 п. 22). Додатково, при налагодженні АСР необхідно враховувати різні умови роботи кожної нитки пилоподачі: довжина пилопроводів 13–42 м; трасування пилопроводів; нерівні умови витоку пилу з промбункера; місця установки АПЖ в тічки бункера (фронтіві, тильові пальники).

Висновки. На «високочастотні» пульсації витрати пилу в АПЖ впливають такі фактори, як концентрація вугільного пилу в області «зрідження», яка залежить від витрати повітря на аерацію, відкриття регулюючого клапану АПЖ та рівень пилу в бункері. При змінах рівня пилу в бункері слід змінювати і тиск аеросуміші в корпусі АПЖ, що має забезпечуватися АСР. При цьому до мінімуму зводиться барботаж повітря в об'єм бункера і виключається придушення процесу аерації пилу в камері зрідження аероживильника.

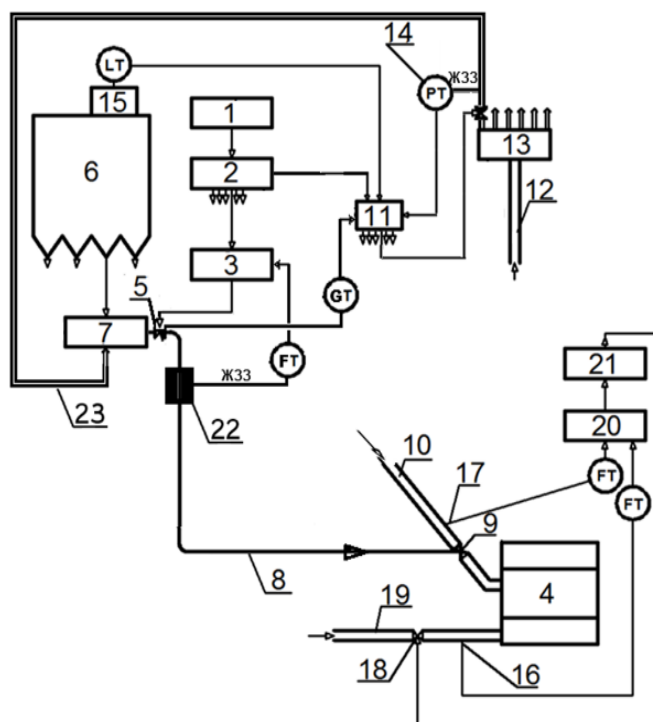


Рисунок 1 – Система автоматичного регулювання топкових процесів котлів з ПВКТ:

- 1 – загальнокотловий регулятор витрати палива; 2 – розмножувач сигналів;
 3 – індивідуальний регулятор витрати палива; 4 – пальник; 5 – регулюючий клапан;
 6 – промбункер; 7 – аераційний пиложивильник; 8 – пилопровід подачі палива високої концентрації; 9 – інжекторний змішувач; 10 – трубопровід первинного повітря;
 11 – регулятор витрати повітря на аерацію; 12 – регулюючий клапан витрати аеруючого повітря; 13 – загальний колектор стисненого повітря АПЖ; 14 – датчик тиску повітря на аерацію; 15 – датчик рівня пилу; 16 – датчик витрати вторинного повітря; 17 – датчик витрати первинного повітря; 18 – регулюючий шиберний клапан; 19 – трубопровід вторинного повітря; 20 – блок співвідношення швидкостей вторинного та первинного повітря; 21 – додатковий коригуючий регулятор вторинного повітря; 22 – ємнісний пиломір; 23 – повітря на аерацію

Для мінімізації «низькочастотних» коливань продуктивності аероживильника необхідно вимірювати витрати вугільного пилу на пальники котла з **мінімальною інерційністю**. Це може бути забезпечено при використанні, наприклад, ємнісних пиломірів, які встановлюються в течках аероживильників (рис. 1 п.22), або за сигналом температури аеросуміші [3]. Внаслідок взаємного впливу роботи аероживильників та бункера, при випробуваннях та налагодженні діючих систем регулювання подачі палива при ПВКТ слід розглядати комплекс – «бункер пилу – АПЖ». Налагоджувальні випробування з подальшими дослідженнями дозволили забезпечити пилоподачу з стабільним розподілом пилу по пальниках котла. Аероживильники продемонстрували працездатність в широкому діапазоні зміни навантаження енергоблоків і можуть бути рекомендовані для котлів ТЕС, що спалюють низькорекційне вугілля.

Перелік посилань:

1. Кєсова Л. О., Литовкін В. В., Крижанівський І. О. Шляхи зниження витрат енергетичного виробництва // «Енергетика: економіка, технології, екологія», 2004. – №2.
2. Держбюджетна НДР «Розробка методів та засобів діагностики процесу горіння пилувугільного палива та промислових відходів в котлах з системами висококонцентрованої подачі з метою забезпечення економічних та екологічних показників пальників та топків» (держреєстрація №0102U002).
3. Кєсова Л. О. та ін. Контроль витрати пилоподібного палива на пальники котлів ТЕС // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2012.

¹ Доц., к.т.н. Рачинський А. Ю.

¹ Проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=m7CSuP0AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЧИСЕЛЬНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ СПАЛЮВАННЯ ПАЛИВНИХ ГРАНУЛ (ПЕЛЕТ) В ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВКАХ

Постановка проблеми та її актуальність. На сучасному рівні розвитку енергетики деревні пелети стали ключовим відновлюваним джерелом енергії в Європі. Стрімке зростання обсягів їх споживання зумовлене екологічною чистотою та вуглецевою нейтральністю: при спалюванні палива в атмосферу викидається стільки ж CO_2 , скільки утворилося б під час природного розкладання деревини. Завдяки стабільно високій якості, зручності транспортування та можливості автоматизації управління, пелети є єдиною реальною альтернативою природному газу в побутовому та муніципальному секторах.

Підвищення ефективності спалювання біопалива потребує детального вивчення складних теплофізичних процесів у топковій камері. Ключовою науковою проблемою є моделювання взаємодії безперервної газової фази з дискретною фазою частинок вуглецю, з яких при проходженні через газ виділяються горючі леткі речовини. Необхідно обґрунтувати вибір математичного апарату (модель перенесення реагентів або модель горіння без попереднього змішування) для точного прогнозування енергетичних характеристик факела.

Аналіз останніх досліджень. Протягом багатьох років лідируючі позиції на ринку палива, що використовується для обігріву житла, громадських установ, і підігріву води, займав природний газ. Вся система опалення, що збудована у країні, орієнтована саме на нього. У деяких регіонах, містах застосування блакитного палива сягає 95 % від всього ринку. Це призвело до залежності країни від поставок, позбавила можливості створити енергетичну безпеку держави.

У 80-ті роки минулого століття паливо, що отримують з біологічної сировини, стало завойовувати популярність. Першими його оцінили жителі Скандинавії, потім – інших європейських держав. В Україні поширення подібного виду палива відбулося близько 15-ти років тому, поступово завойовуючи все більше споживачів, які бажають заощадити [1]. На сьогодні багато хто знайомий з такою думкою, що «перехід на тверде біопаливо дозволить значно поліпшити екологічний стан на планеті». Тут потрібно розуміти, що його застосування дійсно істотно знижує рівень викидів вуглекислого газу. До того ж, для його виробництва немає потреби знищувати дерева. Воно виготовляється з відходів деревообробної, харчової та сільськогосподарської продукції. Більше того, протягом багатьох років існувала проблема утилізації відходів. Наприклад, що утворюються на олійно-екстракційних комбінатах, це лушпиння соняшника. За малої ваги воно має великі об'єми, легко запалюється, виділяє неприємний запах. Під час його гниття активно виділяється вуглекислий та інші гази, що негативно позначається на навколишньому середовищі. Зараз лушпиння соняшника використовується для виробництва пелет і брикетів. Вони мають високий рівень теплоутворення, під час спалювання не виділяють небезпечних речовин. А виділення вуглекислого газу значно менше ніж під час їх природного гниття. Тому можна з упевненістю говорити, що тверде біопаливо несе тільки користь планеті. Як з екологічної, так і з економічної точки зору [2]. Як впливає з аналізу експериментальної роботи [3], у разі поєднання твердопаливного котла і запропонованого

Вкрай важливо дослідити і виявити оптимальні режимні карти спалювання в залежності від повноти спалювання, викидів шкідливих газів (NO_x), структури золи, температури теплоносія. Причому, як показано в цій роботі, рівень генерації NO_x протягом 12-ти годин роботи котла не перевищував 100 ppm. В роботі [4] виконано порівняння значень викидів шкідливих речовин під час спалювання традиційних видів палива (природного газу та мазутів з різним вмістом сполук сірки) та біомаси, що використовується під час роботи паливель котлоагрегатів з урахуванням теплових характеристик та хімічного складу палива. Порівнюючи невідновлювальні види палива з біомасою, остання є безпечнішою з екологічного погляду. Забезпечуючи раціональні режими спалювання видів палива та зниження рівня викидів суспендованих твердих частинок, метану та неметанових летких органічних сполук, перспективи використання альтернативних видів палива будуть безперечними.

Формулювання мети. Метою дослідження є чисельне моделювання течії та взаємодії фаз, що дозволить отримати достовірні дані про структуру факела та оптимізувати параметри роботи пелетних пальників.

a

b

130

Методика реалізується у CFD-пакеті ANSYS та базується на підході Ейлера-Лагранжа з використанням моделі дискретної фази (DPM). Основні етапи моделювання включають:

- Нагрів та деволутизація: моделюється термічний розклад пелет із виділенням летких речовин, швидкість якого залежить від локальної температури газу.
- Інтеграція фаз: вихід летких враховується через джерельні члени у рівняннях балансу маси та енергії газової фази, що забезпечує фізичну коректність переходу речовини.
- Горіння летких: реакції описуються за допомогою Species Transport (для детальної кінетики) або Non-premixed Combustion (для факельних процесів).
- Вигорання коксу: після деволутизації моделюється гетерогенне горіння пористого вуглецевого залишку з використанням моделі кінетико-дифузійного обмеження.

Висновки. Реалізація запропонованих моделей спалювання твердого палива дозволить перетворити складні фізико-хімічні процеси горіння пелет у прогнозовану та керовану інженерну систему. Встановлення закономірностей взаємодії дискретної та газової фаз за допомогою інструментів комп'ютерного моделювання забезпечує можливість:

- Підвищення енергетичної ефективності: Оптимізація виходу летких речовин та реакцій горіння дозволяє досягти максимального ККД установок.
- Забезпечення екологічної безпеки: Точне регулювання подачі повітря сприяє мінімізації шкідливих викидів, підтримуючи статус пелет як вуглецево-нейтрального палива.
- Енергонезалежності побутового сектору: Вдосконалення систем автоматизації на основі отриманих моделей робить пелети повноцінною, безпечною та зручною альтернативою природному газу для опалення муніципальних і приватних об'єктів.

Таким чином, результати роботи стануть науковим підґрунтям для розробки високоефективних пелетних пальників нового покоління, що є важливим кроком на шляху до диверсифікації джерел енергії.

Перелік посилань:

1. Krona Impulse. Тверде біопаливо і екологія. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://www.kronaimpuls.com.ua/tverde-biopaliwo-i-ekologiya/>. Дата звернення: 03.03.2026 р.
2. Рачинський А. Ю. Викиди забруднювальних речовин від спалювання поширених на ринку України пелет як палива для пелетного котла з пальником ретордного типу / А. Ю. Рачинський, О. В. Баранюк, О. О. Пікенін, А. І. Бордіян // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2025. – № 5 (182). – С. 41–50. – DOI: <https://doi.org/10.31649/1997-9266-2025-182-5-41-50>.
3. Лисенко О. М., Веремійчук Г. М., і Сірий О. А., «Дослідження спалювання пелет сільськогосподарського походження у котлах потужністю до 25 кВт,» Теплофізика та теплоенергетика, т. 44, No 3, 2022. <https://doi.org/10.31472/tpe.3.2022.1>.
4. Левицька О. Г. і Січевий О. В., «Порівняльний аналіз викидів шкідливих речовин при застосуванні альтернативних природному газу біопалив,» Вісник Львівського державного університету безпеки життєдіяльності. Т. 20, 2019. <https://doi.org/10.32447/20784643.20.2019.13>.
5. Екологічні аспекти використання деревних паливних ресурсів. [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://bio.ukr.bio.ua/articles/3589/> Дата звернення 10.04.2025 р.
6. Твердопаливний котел Alter Duo Plus 25 кВт. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://tpt.com.ua/p765177117-alter-duo-plus.html> . – 03.03.2026 р.
7. Пелетний побутовий котел з бункером Kotlant КГП 25 кВт з автоматикою та вентилятором. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <https://bt.rozetka.com.ua/265964811/p265964811/>. – 03.03.2026 р.

¹ Аспірант 3 курсу Коновалюк О. Л.¹ Доц., к.т.н. Пешко В. А.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=MLIjHJsAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВТОМНЕ ПОШКОДЖЕННЯ ДЕТАЛЕЙ ТУРБІН ЧЕРЕЗ НЕРІВНОМІРНІСТЬ ТЕПЛОВОГО ПОЛЯ ПРИ ПУСКУ

Постановка проблеми та її актуальність. На даний момент теплові електростанції відіграють роль маневрених потужностей в Об'єднаній енергетичній системі України та активно залучаються до регулювання потужності. Маневрені режими експлуатації супроводжуються прискореним накопиченням розсіяного втомного пошкодження в найбільш навантажених деталях парових турбін що може призвести до появи тріщин втоми критичного розміру та передчасного виходу з ладу обладнання.

Аналіз останніх досліджень. Основним механізмом пошкодження, деталей парових турбін що проявляє себе під час пускових операцій є накопичення малоциклової втоми [1, 2]. Найбільш поширеним підходом до визначення пошкодження внаслідок циклічних механізмів є застосування теорії лінійного складання пошкоджень за гіпотезою Пальмгрена-Майнера. В цьому випадку для розрахункового значення амплітуди деформації визначається допустиме число циклів навантаження. Моделюванню малоциклової втоми роторної сталі FB2 для парових турбін присвячено роботу [1]. Дослідження виконувались для широкого діапазону температур (20–600 °C) та амплітуд деформацій (0,8–1,2 %). Авторами встановлено допустиме число циклів ізотермічного навантаження для заданого діапазону змінних параметрів. Також розроблено експериментальні криві малоциклової втоми сталі, які представляють високий інтерес при розрахунках залишкового ресурсу турбінного обладнання [2].

Формулювання мети. Встановити величину та темп накопичення розсіяного втомного пошкодження в найбільш навантажених частині ротора середнього тиску турбіни К-200-130 для різних технологій пуску, що реалізуються на теплових електростанціях України.

Основна частина. Дана робота є продовженням попередніх досліджень закономірностей формування нестационарного теплового та напружено-деформованого стану в елементах парових турбін під час пуску для різних технологій прогрівання та навантаження основного обладнання [3, 4].

Досліджується 2 відмінних пускових графіки турбіни К-200-130 що реально використовуються на теплових електростанціях України. Опис та аналіз цих графіків наведено в роботі [3], в ній же представлено результати моделювання нестационарного теплового поля ротора турбіни методом скінченних елементів. В роботі [4] проаналізовано поля інтенсивності напружень та визначено найбільш навантажені області ротора, для яких варто проводити розрахунок показників малоциклової втоми.

Відносне пошкодження Π' , що накопичується в металі турбіни за гіпотезою Пальмгрена-Майнера оцінюється за рівнянням:

$$\Pi' = \Pi'_{\text{ст}} + \Pi'_{\text{ц}} = \sum_{j=1}^{q'} \frac{t'_j}{t'_{pj}} + \sum_{l=1}^{k'} \frac{n'_l}{N'_{pl}}, \quad (1)$$

де $\Pi'_{\text{ст}}$, $\Pi'_{\text{ц}}$ – статичне та циклічне пошкодження;

t'_j – час роботи на j -ому сталому режимі за температури металу T'_j і еквівалентних напружень $(\sigma'_{ej})_{\text{max}}$;

t'_{pj} – час до настання граничного стану під дією еквівалентних напружень $(\sigma'_{ej})_{\max}$ при температурі металу T'_j , який визначається за діаграмами довготривалої міцності;

n'_l – число циклів l -го типу;

N'_{pl} – число циклів до появи втомних тріщин під дією тільки циклічних навантажень l -го типу;

q' – число різних типів сталих режимів;

k' – число різних типів циклів.

Для дослідження відносного пошкодження при експлуатації було обрано галтель тринадцятого ступеня ротора середнього тиску турбіни К-200-130, оскільки саме в цій області під час планово-попереджувальних ремонтів діагностуються тріщини, а також наявні найбільші за значенням інтенсивності напружень [4].

Динаміка зміни інтенсивності напружень в галтелі 13-го ступеня для різних технологій пуску представлена на рис. 1. Помітно, що для блоку 2 наявний найбільший рівень інтенсивності напружень протягом циклу (477 МПа) та значний час прикладання напружень більше 400 МПа (2,72 год, або 9800 с). Для блоку 1 максимум інтенсивності напружень є дещо меншим (454 МПа), а також час прикладання напружень більше 400 МПа є суттєво коротшим (1,32 год, або 4750 с). За природою всі вказані вище напруження в даній області є стискаючими.

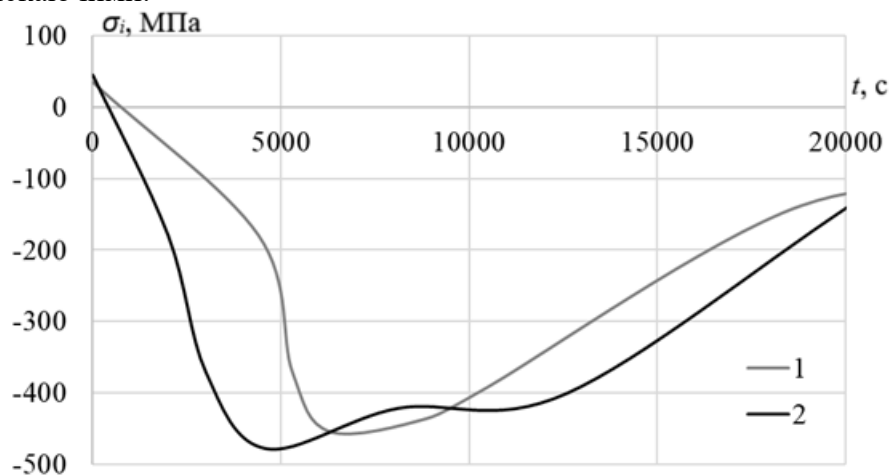


Рисунок 1 – Зміна інтенсивності напружень в галтелі 13-го ступеня РСТ турбіни К-200-130 при пуску з холодного стану для різних технологій пуску: 1 – Блок 1; 2 – Блок 2

Для представлених значень інтенсивності напружень було розраховано відносне пошкодження в галтелі 13-го ступеня ротора середнього тиску турбіни К-200-130 (рис. 2). Контрольне значення відносного пошкодження складає 100 %, що відповідає переходу деталі в граничний стан, коли його подальша експлуатація є небезпечною.

Допустиме число циклів навантаження до переходу в граничний стан для блоку 1 складає 3840, а для блоку 2 – 3320 (на 16 % менше). Таким чином, після 2000 циклів пуску, що часто розглядається як ресурсний показник для турбін К-200-130 накопичене пошкодження лише від дії циклічних механізмів при пуску складе 52 % для блоку 1 та 60 % для блоку 2 (рис. 2,а). Отримані дані свідчать про більшу опірність основного металу до накопичення малоциклової втоми при пуску турбіни за технологією що реалізована на енергоблоці № 1. Ці дані підтверджуються меншим рівнем градієнтів температур під час пуску [3] та свідчать про значний вплив термічних напружень на малоциклову втому високотемпературних елементів парових турбін.

В той же час, при роботі турбіна зазнаватиме впливу не лише циклічних, але і статичних механізмів пошкодження. На рис. 2,б представлено накопичення відносного пошкодження в галтелі 13-го ступеня ротора середнього тиску з врахування статичної складової від повзучості при роботі на постійній потужності. При розрахунку повзучості,

вважалося що турбіна працюватиме 7 днів після пуску на постійній потужності до подальшої зупинки, остигання та нового пуску з холодного стану.

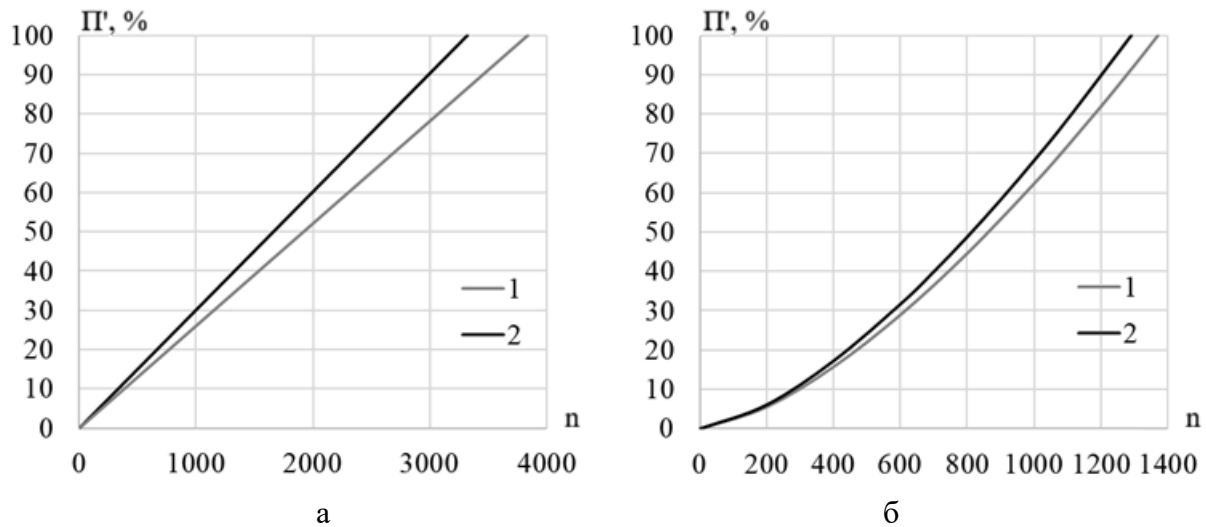


Рисунок 2 – Накопичення пошкодження в роторі середнього тиску під час циклів пуску: 1 – Блок 1; 2 – Блок 2. а – лише від дії малоциклової втоми; б – від сумісної дії малоциклової втоми та повзучості

Врахування статичної складової пошкодження (рис. 2,б) призвело до суттєвого скорочення допустимого числа циклів пуску турбіни з холодного стану: 1360 – для блоку 1 та 1290 – для блоку 2. Отримані дані свідчать про необхідність врахування всіх основних механізмів пошкодження при дослідженні індивідуального ресурсу високотемпературних елементів парових турбін.

Отримані результати доводять, що актуальним питанням є розробка спеціального графіку пуску, який дозволить скоротити негативний вплив нерівномірності температурного поля на темпи накопичення розсіяного втомного пошкодження та збільшити допустиме число циклів пуску турбіни, що є важливим для поточного режиму роботи енергосистеми України.

Висновки. Аналіз пускових режимів турбіни К-200-130 показав, що технологія прогрівання суттєво впливає на накопичення малоциклової втоми металу ротора. При дії лише циклічних навантажень пуск за технологією блоку №1 забезпечує більший ресурс у 3840 циклів проти 3320 для блоку №2. Комплексне врахування втоми та повзучості критично знижує допустиму кількість пусків (до 1360 та 1290 відповідно). Це доводить необхідність обов'язкового врахування всіх механізмів пошкодження та розробки оптимізованих графіків пуску для подовження ресурсу обладнання.

Перелік посилань:

1. Azeez A., Eriksson R., Calmunger M., Lindström S., Simonsson K. (2019). Low cycle fatigue modelling of a steam turbine rotor steel. *Procedia Structural Integrity*, 23, 149–154, <https://doi.org/10.1016/j.prostr.2020.01.078>.
2. Yue P., Ma J., Huang H., Shi Y., Zu J. (2021). Threshold damage-based fatigue life prediction of turbine blades under combined high and low cycle fatigue. *International Journal of Fatigue*, 150, 106323. <https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2021.106323>.
3. Пешко В., Коновалюк О. (2024). Закономірності формування температурного поля ротора турбіни під час пускового режиму роботи. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 35(74), 4, 254–259. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.4/37>.
4. Пешко В., Коновалюк О. (2025). Оцінка впливу технології пуску на напружено-деформований стан ротора турбіни К-200-130. *Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*, 36(75), 4, 149–156. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.4.1/19>.

¹ Аспірант 1 курсу Голівець О. О.

¹ Доц., к.т.н. Пешко В. А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОГЛЯД СУЧАСНИХ КОНСТРУКЦІЙ ТА МАТЕРІАЛІВ КІНЦЕВИХ УЩІЛЬНЕНЬ ТУРБІН ДЛЯ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ЕКОНОМІЧНОСТІ ТА ДОВГОВІЧНОСТІ

Постановка проблеми та її актуальність. Ефективність та надійність сучасних парових турбін теплових і атомних електростанцій значною мірою визначаються роботою їх ущільнювальних систем. Основне призначення кінцевих і проміжних ущільнень – мінімізація витоків робочого тіла (пари) із зон високого тиску в зони низького тиску, що безпосередньо впливає на внутрішній ККД та економічність турбіни [1]. Одночасно ці елементи мають забезпечувати довговічність і безпеку експлуатації, запобігаючи катастрофічному контакту ротора і статора та розвитку руйнівних тріщин [2]. Ключова проблема проектування полягає у пошуку оптимального компромісу між герметичністю (економічністю) та міцністю (довговічністю).

Аналіз останніх досліджень. Підвищення ефективності та надійності парових турбін залишається основним напрямом досліджень у енергетиці. Особлива увага приділяється вдосконаленню ущільнень, оскільки втрати від витоків пари можуть сягати 28–30 % від загальних втрат турбіни [1].

Формулювання мети. Метою даної роботи є систематизація та аналіз сучасних конструкцій кінцевих ущільнень турбін, дослідження впливу їх геометричних параметрів і матеріалів на економічність (рівень витоків) та довговічність (напружено-деформований стан і залишковий ресурс) турбінного обладнання.

Основна частина. Об'єктом дослідження є конструкції кінцевих ущільнень сучасних парових турбін. На рис. 1 представлено класифікацію основних типів ущільнень.

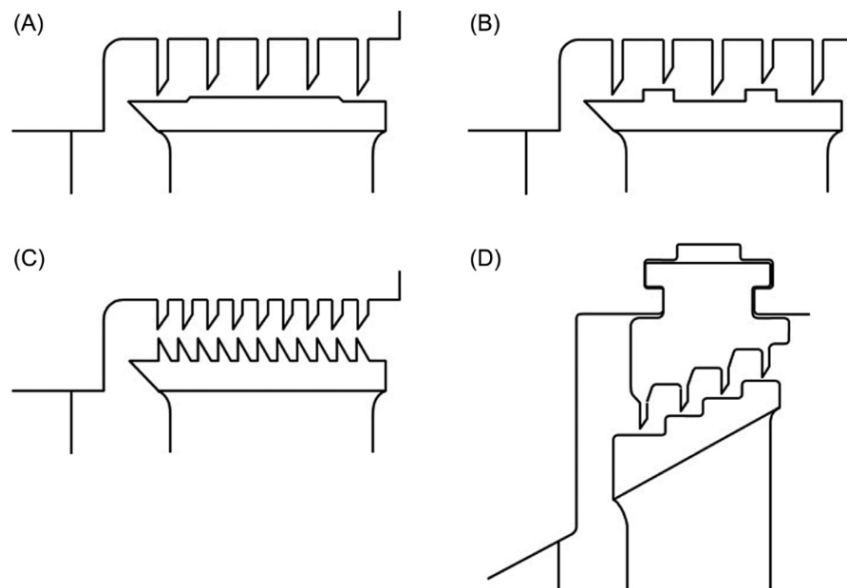


Рисунок 1 – Лабіринтові ущільнення для бандажа робочої лопатки:

- а – лабіринтове ущільнення з гладкою зовнішньою поверхнею бандажа; б – лабіринтове ущільнення з гребенями Hi-Lo (ступінчастий тип); в – лабіринтове ущільнення з подвійною гребінчастою структурою; г – ступінчасте лабіринтове ущільнення

(драбинчастого типу)

Лабіринтові ущільнення залишаються найпоширенішим типом. Їх робота ґрунтується на створенні гідравлічного опору шляхом багаторазового дроселювання потоку через послідовні зазори [1]. Поряд із простими гладкими лабіринтовими ущільненнями (рис. 1А) застосовують ступінчасті (рис. 1В), а також подвійні (рис. 1С) та похилі подвійні лабіринтові ущільнення, особливо ефективні для кінцевих ущільнень циліндрів низького тиску з великими осьовими тепловими розширеннями.

Щіткові ущільнення складаються з пучків тонких металевих щетинок (дроту), зафіксованих між передньою та задньою обоймами. Завдяки нахилу щетинок у напрямку обертання ротора ($\approx 45^\circ$) забезпечується мінімальний радіальний зазор. Конструктивно їх часто виконують як окремий сегмент, встановлений всередині лабіринтового каналу, з опорною пластиною для запобігання прогину щетинок під дією тиску [3]. Це дозволяє зменшити витoki до 2–3 разів порівняно з лабіринтовими ущільненнями [4].

Сотові ущільнення виготовляються з тонкої (близько 0,05–0,1 мм) фольги жароміцних нікелевих або кобальтових сплавів, що формуються в структуру з шестикутних чарунк і потім з'єднуються дифузійним зварюванням [5]. Ця структура забезпечує високу питому поверхню для тепловідведення та ефективну дисипацію енергії потоку. Завдяки інтенсивній турбулізації потоку в чарунках сотові ущільнення здатні забезпечувати значно більше позитивне демпфування порівняно з гладкими лабіринтами, пригнічуючи небажані коливання ротора [6].

Зношувані ущільнення класифікують за діапазоном робочих температур. Для низькотемпературних застосувань у компресорах ($< 400^\circ\text{C}$) використовують системи на основі алюміній-кремнію (Al-Si) з додаванням полімерних або інших легкоплавких фаз для створення контрольованого зносу [7]. Для середніх температур (до 760°C) застосовують металокерамічні покриття на основі CoNiCrAlY (кобальт-нікель-хром-алюміній-ітрієвий сплав), де пористість і міцність регулюються вмістом легуючих добавок та параметрами напilenня [8]. Для високотемпературних зон ($> 760^\circ\text{C}$) основним рішенням є пориста кераміка на основі ітрій-стабілізованого цирконію (YSZ). Для ефективного врізання в таку кераміку вершини лопаток турбін часто армують абразивними матеріалами, такими як кубічний нітрид бору (cBN) або карбід кремнію (SiC).

Вплив конструкції ущільнень на динаміку ротора є критичним. Потік у зазорі ущільнення генерує гідродинамічні сили, що описуються матрицею ротординамічних коефіцієнтів (жорсткість, демпфування, перехресні зв'язки). Дослідження показують, що сотові ущільнення, завдяки інтенсивній турбулізації потоку в чарунках, можуть забезпечувати значно більше позитивне демпфування, пригнічуючи небажані коливання ротора [6].

Для оцінки довговічності необхідний комплексний термомеханічний аналіз із використанням методу скінченних елементів (МСЕ).

На основі аналізу літературних джерел можна провести порівняння основних типів ущільнень за їх характеристиками.

Базові лабіринтові ущільнення мають найпростішу конструкцію та забезпечують надійну роботу, однак рівень витоків у них є найвищим, і саме їх показники приймаються за базовий рівень для порівняння. Вплив на ресурс ротора відповідає базовому рівню напружень.

Оптимізовані лабіринтові ущільнення (типу Hi-Lo з оптимізованим співвідношенням L/H) дозволяють зменшити витoki до 30 % порівняно з базовими [4]. За даними Черноусенка та ін. [2], перехід на такі ущільнення забезпечує збільшення залишкового ресурсу ротора на 6,1 % завдяки зниженню рівня напружень. Однак їх застосування обмежене при великих осьових теплових розширеннях через ризик контакту гребенів із виступами.

Щіткові ущільнення демонструють найкращу герметичність, забезпечуючи

зменшення витоків до 65 % порівняно з лабіринтовими [6]. Вони здатні працювати при високих перепадах тиску завдяки застосуванню зносостійких матеріалів (кобальтові та нікелеві сплави). Однак їх вплив на ресурс ротора потребує ретельного аналізу через контактний характер роботи та можливий вплив на роторну динаміку.

Сотові ущільнення забезпечують зменшення витоків на 30–50 % [7] і, що особливо важливо, суттєво покращують демпфувальні характеристики системи, пригнічуючи небажані коливання ротора [6]. За розрахунками [2], перехід від лабіринтових до сотових ущільнень дозволяє збільшити залишковий ресурс ротора високого тиску на 6,1 %, а при переході до прямооточних конструкцій – на 14,4 %. Основними недоліками є складність виготовлення та вища вартість.

Зношувані ущільнення дозволяють мінімізувати робочі зазори завдяки здатності покриття стиратися при контакті з лопатками, що забезпечує зменшення витоків на 20 – 40 %. Їх застосування потребує врахування температурного режиму (класифікація за діапазонами температур) та трибологічних характеристик матеріалів. Вплив на ресурс ротора залежить від конкретної конструкції та умов експлуатації.

Висновки. У ході дослідження здійснено огляд та систематизацію сучасних конструкцій кінцевих ущільнень парових турбін. Щіткові ущільнення забезпечують найкращу герметичність (зменшення витоків до 65 %), але потребують ретельного аналізу впливу на роторну динаміку. Сотові ущільнення, окрім зменшення витоків, суттєво покращують демпфувальні характеристики системи та можуть збільшити залишковий ресурс ротора на 6–14 % завдяки зниженню рівня напружень. Зношувані матеріали та покриття дозволяють мінімізувати робочі зазори, але їх застосування вимагає врахування температурних режимів і трибологічних характеристик. Перспективними напрямками подальших досліджень є розробка гібридних ущільнювальних конструкцій, інтеграція систем активного контролю зазорів та створення нових композитних матеріалів із покращеними трибологічними та ерозійними властивостями.

Перелік посилань:

1. Tanuma T., Tominaga J. Sealing designs and analyses for steam turbines. In: *Advances in Steam Turbines for Modern Power Plants*. Woodhead Publishing, 2022. P.359 – 382. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824359-6.00025-1>
2. Chernousenko O. Yu., Peshko V. A., Ryndiuk D. V. Impact Assessment of Modernization of Steam Turbine End Seals on the Residual Resource. *Energy Technologies and Resource Saving*. 2020. No. 3. P. 56–62. <https://doi.org/10.33070/etars.3.2020.06>
3. Patent US 6,554,268 B2. Brush seal for a turbine engine. 2003.
4. Turnquist N. et al. Brush Seals for Improved Steam Turbine Performance. *IMEchE Retrofitting Steam Power Generation Plant Seminar*. London, 2005.
5. Patent US 5,639,053. Honeycomb seal for steam turbine. 1997.
6. Moore J. J., Ransom D. L. Honeycomb seal effects on rotordynamic stability in high-performance turbomachinery. NASA/TM-2001-210952. NASA Glenn Research Center, 2001.
7. Denton J. D. Loss mechanisms in turbomachines. *Journal of Turbomachinery*. 1993. Vol. 115, No. 4. P. 621–656.
8. Kuwamura Y. et al. Development of new high-performance labyrinth seal. *Proceedings of the International Gas Turbine Congress*. 2011. Paper No. 0173.

СЕКЦІЯ № 5

**Проблеми теоретичної
і промислової
теплотехніки**

¹ Аспірант 2 курсу Бежик О. М.

¹ Доц., к.т.н. Притула Н. О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=uk&user=VaBr8T0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗНИЖЕННЯ ХОЛОДИЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ ШЛЯХОМ АДАПТИВНОГО РЕГУЛЮВАННЯ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ

Постановка проблеми та її актуальність. У виробничих приміщеннях із великими внутрішніми теплонадходженнями вентиляційна система фактично працює як система відведення надлишкової теплоти. У таких умовах значна частина енергоспоживання припадає на підготовку припливного повітря та роботу холодильної секції вентиляційної установки [1]. Особливо це характерно для виробничих приміщень із значними внутрішніми теплонадходженнями від технологічного обладнання та персоналу, де вентиляційна система фактично виконує функцію відведення надлишкової теплоти.

У традиційних вентиляційних установках частка рециркуляційного повітря зазвичай задається фіксованим значенням [2]. Однак оптимальне співвідношення зовнішнього та рециркуляційного повітря залежить від параметрів зовнішнього середовища, внутрішніх теплонадходжень та режиму експлуатації будівлі. У перехідні періоди року використання фіксованої частки рециркуляції може призводити до неефективної роботи холодильної секції вентиляційної установки.

Сучасні дослідження у сфері HVAC-систем показують перспективність застосування адаптивних алгоритмів керування вентиляційними установками, які дозволяють змінювати частку рециркуляційного повітря залежно від поточних параметрів повітряного середовища з метою мінімізації енергоспоживання [3].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні наукові дослідження дедалі частіше підкреслюють необхідність переходу від традиційних фіксованих схем повітрообміну до адаптивних систем керування вентиляцією, які здатні оперативно реагувати на зміни параметрів зовнішнього та внутрішнього повітря [3, 4]. Одним із перспективних напрямів у цій сфері є використання адаптивних камер змішування, де співвідношення зовнішнього та рециркуляційного повітря визначається не наперед встановленим значенням, а розрахунковим критерієм, спрямованим на мінімізацію теплових або холодильних витрат під час підготовки припливного повітря.

Найбільша ефективність таких рішень проявляється у перехідні періоди року, коли протягом доби спостерігаються суттєві коливання температури зовнішнього повітря, а застосування фіксованих режимів рециркуляції призводить до нераціонального використання енергетичних ресурсів. За умов значних внутрішніх теплонадходжень адаптивне регулювання частки зовнішнього повітря дає змогу більш повно використовувати потенціал так званого «вільного охолодження», що дозволяє знизити навантаження на холодильні установки без погіршення параметрів мікроклімату в приміщеннях [4].

Попри значну кількість публікацій, присвячених енергоефективності вентиляційних систем, більшість із них зосереджується або на узагальнених схемах керування, або на умовних об'єктах дослідження. Водночас питання кількісної оцінки ефективності адаптивних камер змішування на основі реальних промислових об'єктів з урахуванням сезонних та добових змін режимів їх роботи все ще висвітлене недостатньо.

Формулювання мети. Оцінка можливості зниження холодильного навантаження припливно-витяжної вентиляційної установки шляхом адаптивного регулювання частки рециркуляційного повітря залежно від параметрів зовнішнього та внутрішнього повітря.

Основна частина. Об'єктом дослідження є припливно-витяжна вентиляційна установка харчового підприємства (рис. 1) з витратою припливного повітря 47 900 м³/год, що обслуговує виробничі приміщення фасування та пакування продукції. Сумарні внутрішні теплонадходження у виробничих приміщеннях становлять 216,7 кВт. Дослідження виконано для реальної вентиляційної установки промислового харчового підприємства, що дозволяє оцінити ефективність адаптивного регулювання в умовах фактичної експлуатації.



Рисунок 1 – Вентиляційна установка, що є об'єктом дослідження

Конструктивно установка оснащена водяною нагрівальною секцією з теплоносієм температурного графіка 80/60 °C та охолоджувальною секцією, що працює на розчині пропіленгліколю 40 % з температурним режимом 7/12 °C. Система автоматичного керування дозволяє регулювати положення заслінок у камері змішування в широкому діапазоні, включно з повним перекриттям подачі зовнішнього повітря у черговому режимі роботи в холодний період року.

Параметри внутрішнього повітря у виробничих приміщеннях прийнято відповідно до технологічних та санітарних вимог: температура повітря підтримується на рівні +22±2 °C, а відносна вологість не перевищує 60 %. Видаляємо повітря для розрахунків прийнято з усередненими параметрами температури 25 °C та відносної вологості 50 %, що відповідає реальним умовам експлуатації установки протягом року.

Режим роботи підприємства передбачає двозмінну експлуатацію тривалістю 16 годин на добу (з 7:00 до 23:00). У неробочий час вентиляційна установка переходить у черговий режим, при якому подача зовнішнього повітря припиняється, а робота системи спрямована на компенсацію тепловтрат приміщень у холодний період року.

Методика дослідження базується на аналізі теплового балансу приміщень та вентиляційної установки. Необхідна холодильна потужність вентиляційної системи визначається за залежністю

$$Q = m c_p (t_m - t_s), \quad (1)$$

де m – масова витрата повітря, кг/с; c_p – теплоємність повітря, кДж/(кг·°C); t_m – температура повітря після камери змішування, °C; t_s – необхідна температура припливного повітря, °C.

Для порівняння ефективності розглянуто два режими роботи вентиляційної установки:

- традиційний режим із фіксованою часткою зовнішнього повітря;
- адаптивний режим, у якому співвідношення зовнішнього та рециркуляційного повітря змінюється залежно від параметрів повітряного середовища.

Помісячний аналіз теплового балансу для кліматичних умов м. Луцьк показав, що у виробничих приміщеннях надлишок внутрішньої теплоти спостерігається протягом усього

року, включно з холодним періодом. Це створює передумови для використання потенціалу зовнішнього повітря для так званого «вільного охолодження» (free cooling).

Для оцінки ефективності адаптивного регулювання виконано погодинні розрахунки для типових діб квітня та жовтня з урахуванням добових коливань температури зовнішнього повітря та обмежень мінімальної подачі свіжого повітря відповідно до нормативних вимог до вентиляції [5].

На рис. 2 наведено порівняння погодинної холодинної потужності вентиляційної установки для адаптивної та традиційної схем роботи камери змішування.

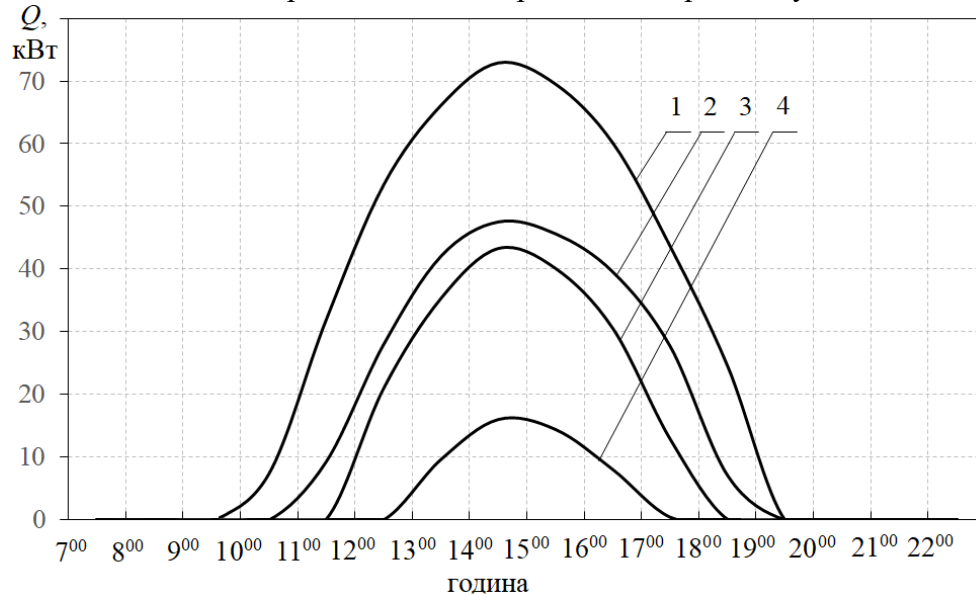


Рисунок 2 – Порівняння погодинної холодинної потужності вентиляційної установки для адаптивної та фіксованої частки зовнішнього повітря (типова доба перехідного періоду): 1, 2 – з фіксованою камерою змішування у квітні та жовтні відповідно; 3, 4 – з адаптивною камерою змішування у квітні та жовтні відповідно

Як видно з графіка, при фіксованій частці зовнішнього повітря холодинна секція працює довше та з більшою потужністю. Адаптивне регулювання дозволяє істотно зменшити тривалість роботи холодинної секції та пікові значення холодинної потужності.

Висновки. Результати розрахунків показали, що сумарне холодинне навантаження вентиляційної установки при використанні адаптивної камери змішування зменшується на 57,2 % для типової доби квітня та на 80,4 % для жовтня. Узагальнений потенціал зниження витрат холоду у перехідний період року становить приблизно 40–55 %. Отримані результати підтверджують доцільність застосування адаптивного регулювання рециркуляції повітря в промислових вентиляційних системах із значними внутрішніми теплонадходженнями.

Перелік посилань:

1. Chenari B., Dias Carrilho J., Gameiro da Silva M. Towards sustainable, energy-efficient and healthy ventilation strategies in buildings. A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2016. Vol. 59. P. 1426–1447. DOI: 10.1016/j.rser.2016.01.074.
2. Goodfellow H., Tahti E. *Industrial Ventilation Design Guidebook*. Academic Press, 2001.
3. Vasile V. et al. The Effects of an Adaptive Ventilation Control System on In-door Air Quality and Energy Consumption // *Sustainability*. – 2024. – Vol. 16(22):9836 doi.org/10.3390/su16229836.
4. Hadžiahmetović Z. Solution Proposal for Utilization of the Waste Heat in Refrigeration Systems // *TEM Journal*. – 2021. – Vol. 10(1), pp. 177–182. DOI: 10.18421/TEM101-22.
5. ASHRAE Standard 62.1–2019. Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. Atlanta: ASHRAE, 2019.

¹ Аспірант 2 курсу Вовк В. В.¹ Проф., д.т.н. Безродний М. К.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=MXjA5VYAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОТОЧНОЇ ТНСУ ЗА РАХУНОК БАЙПАСУВАННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСА

Постановка проблеми та її актуальність. Підвищення енергетичної ефективності проточних зерносушарок в межах видалення вологи з зерна є необхідним науковим пошуком, особливо при використанні таких складних систем, як системи з тепловими насосами. Одним із методів зниження енергоємності процесу теплонасосного сушіння матеріалів є байпасування теплового насоса. Однак питання ефективності цього методу для установок сушіння зерна є не вивченим і потребує спеціальних досліджень.

Аналіз останніх досліджень. Перспективним напрямом удосконалення теплонасосних сушильних установок (ТНСУ) є застосування схем із частковим байпасуванням сушильного агента (СА) повз тепловий насос (ТН), що є добре вивчено для подібних технологічних процесів сушіння деревини [1]. Байпасування дозволяє оптимізувати об'ємні потоки через теплообмінне обладнання ТН, уникаючи надмірного зростання габаритів установки та підвищуючи загальний ККД системи.

Підвищення енергоефективності теплонасосних схем безпосередньо корелює з покращенням екологічних показників агропромислового виробництва [2]. Впровадження рециркуляції СА та байпасування ТН у поєднанні з теплонапосною трансформацією енергії дозволяє суттєво знизити вуглецевий слід технологічного процесу [3]. Таким чином, інтеграція ТН із системами байпасування в проточних комплексах є екологічно доцільним та енергетично виправданим кроком у розвитку сучасних зернопереробних технологій.

Формулювання мети. Виконання чисельного аналізу на основі аналітичної моделі ТНСУ дозволило показати вплив часткового байпасування теплового насоса на енергоефективність проточних теплонасосних зерносушарок. Для реалізації поставленої мети розроблено замкнуту систему аналітичних виразів, що описують термодинамічний цикл установки з процесом сушіння зерна.

Основна частина. Схема проточної теплонапосної сушарки зерна з частковим байпасуванням теплового насоса представлена на рис. 1.

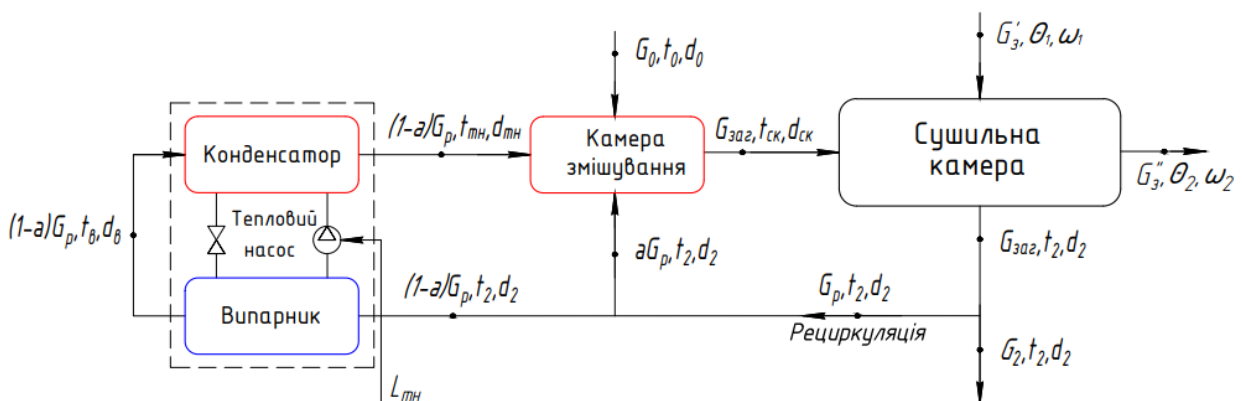


Рисунок 1 – Схема проточної ТНСУ з рециркуляцією СА та частковим байпасуванням ТН

Енергоефективність сушарок зернових в частині витрати енергії безпосередньо на видалення вологи з зерна оцінюється за допомогою коефіцієнта використання затраченої енергії (КВЕ), який розширено описано в попередніх працях [4]. Загальний вираз КВЕ для ТНСУ описується як

$$\eta_{\text{cy}} = \frac{Q_{\text{вип}}}{L_{\text{TH}}}, \quad (1)$$

де $Q_{\text{вип}}$ – тепловий потік, що витрачається безпосередньо на випаровування вологи, кВт; L_{TH} – потужність приводу компресора теплового насоса, кВт.

Виконання аналітичного дослідження масових та теплових балансів, що враховує параметри сушильного агента та зерна у вузлових точках системи, дозволило визначити величину КВЕ для заданих параметрів сушіння зерна за кінцевим виразом

$$\eta_{\text{cy}} = \frac{r(t_m)\Delta d_{\text{ск}}}{K(1-a)(h_2-h_b)}(\varepsilon_{\text{TH}} - 1), \quad (2)$$

де $r(t_m)$ – питома теплота випаровування вологи при температурі мокрого термометра, кДж/кг_{вл}; $\Delta d_{\text{ск}}$ – зміна вологості СА в СК ТНСУ, кг_{вол}/кг_{са}; коефіцієнт рециркуляції, який являє собою відношення $K = G_{\text{рец}}/G_{\text{заг}}$ і може бути визначений із теплового балансу сушарки; a – коефіцієнт байпасування; h_2 – ентальпія відпрацьованого СА після сушильної камери (СК), кДж/кг_{са}; h_b – ентальпія цього ж сушильного агента на виході з випарника теплового насоса, кДж/кг_{са}; ε_{TH} – коефіцієнт трансформації ТН.

В межах проведеного чисельного дослідження виконано розрахунки, що дозволяють виконати співставлення з попередніми дослідження проточних сушарок без байпасування [4], які було виконані за аналогічною методологією. За виразом (2) розраховано коефіцієнт використання зовнішньої енергії на видалення вологи для ТНСУ з частковим байпасуванням теплового насоса, який наведено на рис. 2.

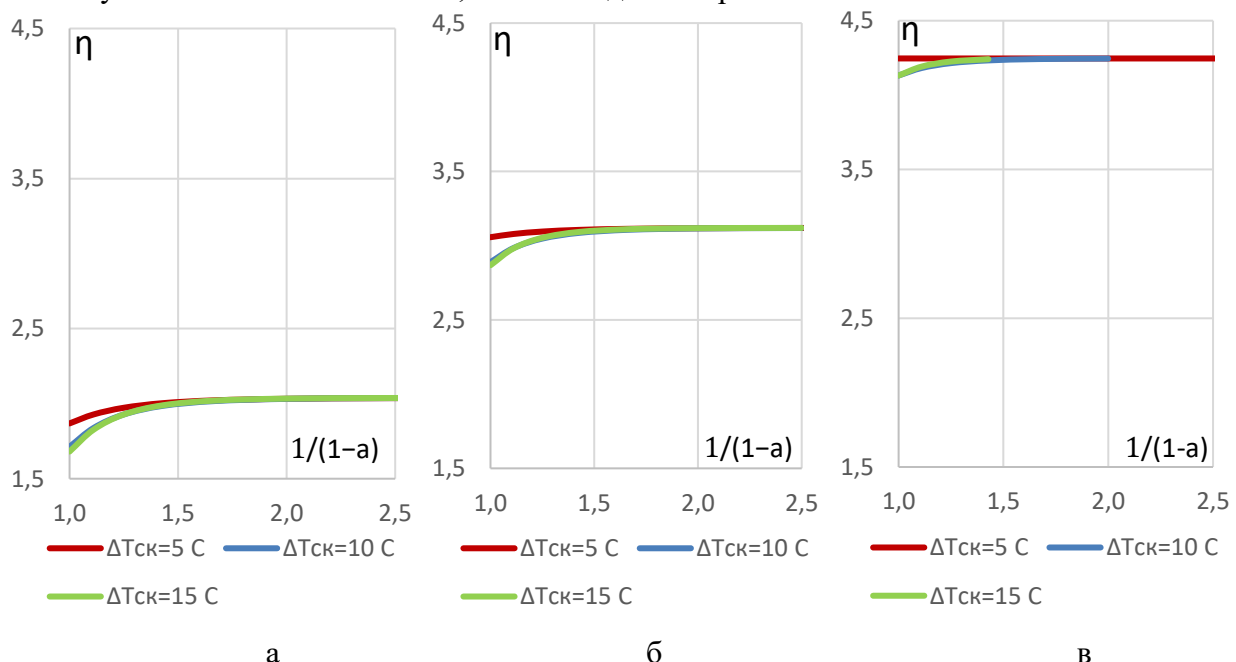


Рисунок 2 – Коефіцієнт використання енергії ТНСУ в залежності від параметра байпасування при температурі СА 55 °С для різних значень перепаду температури СА в сушильній камері та частки видалення вологи з зерна $\Delta\omega$
а – 6 %; б – 9 %; в – 12 %

Результати моделювання показують, що при зростанні коефіцієнта байпасування енергетична ефективність ТНСУ зростає особливо для низьких значень $\Delta\omega$ та високих перепадах $\Delta t_{\text{ск}}$, що обумовлено зростанням коефіцієнта рециркуляції сушильного агента в циклі сушарки. При значеннях параметра байпасування $1/(1-a)=2$ та вище для всіх режимів роботи ефективність ТНСУ стає майже ідентичною, і підвищення коефіцієнта

байпасування теплового насоса вже не має сенсу для зростання ефективності. Це свідчить про те, що за цих умов досягається повне використання енергії приводу ТН в сушильному процесі і, відповідно відсутні втрати енергії в навколишнє середовище з відпрацьованим СА.

Однак, при проектуванні сушарок необхідно врахувати особливість, що підвищення енергетичної ефективності за рахунок збільшення коефіцієнта байпасування потребує значного перегріву СА в конденсаторі ТН. Даний перегрів обумовлений необхідністю підтримувати задані параметри СА на вході в СК при меншій кількості СА, що проходить через ТН. Співставлення з попередніми дослідженнями представлено на рис. 3, де наведено залежність максимального КВЕ на видалення вологи зерна для різних технологічних температур сушіння, який отримано при значенні коефіцієнта байпасування $a=0,5$.

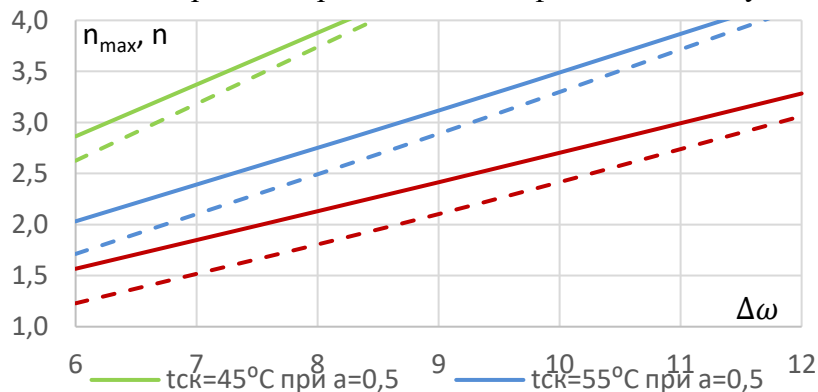


Рисунок 3 – Значення максимального значення КВЕ η_{max} ТНСУ при $a = 0,5$ та КВЕ для ТНСУ без байпасування ТН ($a = 0$) в залежності від $\Delta\omega$

Графіки на рис. 3 демонструють вплив байпасування на енергетичну ефективність ТНСУ для різних низькотемпературних режимів сушіння зерна при зміні інтенсивності сушіння $\Delta\omega$. Видно, що приріст ефективності більш значний в зоні низької інтенсивності $\Delta\omega$ та зростає з підвищенням температури сушіння.

Висновки. Часткове байпасування ТН в циклі ТНСУ зерна є одним з заходів, що заслуговує ретельного розгляду та практичного впровадження в реальних сушильних установках. В практичних моделях та подальших дослідженнях слід врахувати:

1. Часткове байпасування ТН суттєво покращує енергетичну ефективність теплонасосної сушарки при низькій інтенсивності сушіння.

2. Граничні значення коефіцієнта байпасування ТН визначаються технологічними умовами процесу. Його рекомендовані значення лежать в межах $a = 0,35 \dots 0,5$, що забезпечує максимальну енергетичну ефективність сушарки для даного ТН.

3. При подальших дослідженнях слід врахувати вплив внутрішнього ККД теплового насоса на доцільність виконання його байпасування.

Перелік посилань:

1. Безродний М. К., Кутра Д. С. Ефективність застосування теплових насосів у установках сушіння деревини: моногр. К.: НТУУ «КПІ», 2011. – 240с.

2. Li Jin Goh, Mohd Yusof Othman, Sohif Mat, Hafidz Ruslan, Kamaruzzaman Sopian. (2011) Review of heat pump systems for drying application. (2011) Renewable and Sustainable Energy Reviews. Vol. 15, Issue 9, December, Pages 4788–4796. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2011.07.072>.

3. Abaubakry M'Baye (2022) A case study of heat recovery: a heat pump in an industrial site. Journal of Renewable Energy and Sustainable Development (RES D), Volume 8, Issue 1, June 2022. Pages 20–29. DOI: [dx.doi.org/10.21622/RES D.2022.08.1.020](https://doi.org/10.21622/RES D.2022.08.1.020).

4. Безродний М. К., Вовк В. В. Енергетична ефективність проточних теплонасосних сушарок зерна. Енергетика і автоматика. 2025. №3 (79). с. 125–142. – DOI: 10.31548/energiya3 (79).2025.125.

¹ Аспірант 2 курсу Ляшенко А. М.¹ Доц., к.т.н. Притула Н. О.<https://scholar.google.com/citations?user=VaBr8T0AAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ТЕПЛОПЕРЕДАЧІ ПІД ЧАС ОСУШЕННЯ ПОВІТРЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Більшість існуючих систем кондиціонування повітря з низькою вологістю є традиційними системами конденсаційного осушення [1, 2]. Для реалізації теплопередачі між повітрям та охолоджуючою рідиною переважно застосовуються ребристо-трубні теплообмінники (РТТ). У випадку, коли температура поверхні труб або ребер з боку повітря є нижчою за температуру точки роси, такі теплообмінники працюють у вологому режимі, що супроводжується утворенням крапель конденсату на поверхнях ребер і трубок. За цих умов розрахунок процесів теплопередачі в РТТ ускладнюється через одночасне протікання тепло- та масообмінних процесів: з боку повітря передача теплоти відбувається як у явній, так і в прихованій формі. Для визначення загального коефіцієнта теплопередачі РТТ під час осушення повітря найчастіше застосовують два методи: ентальпійний і температурний [3]. Для порівняння процесів у системах HVAC, а також для пошуку нових схемних рішень, спрямованих на підвищення ефективності конденсаційного осушення, важливо детально розуміти процеси, що відбуваються у поверхневому осушувачі – ключовому елементі системи осушення.

Аналіз останніх досліджень. Для ентальпійного методу різниця ентальпій є рушійним потенціалом процесів тепло- та масообміну. Загальна кількість теплоти, яка передається в РТТ визначається за формулою:

$$Q_{\text{заг}} = UA \Delta h_{\text{лог}}, \quad (1)$$

де A – площа поверхні теплообміну РТТ, м^2 ; $\Delta h_{\text{лог}}$ – логарифмічна середня різниця ентальпій, кДж/кг ; U – загальний коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$.

Температурний метод базується на реальній різниці температур між холодною поверхнею теплообмінника та вологим повітрям і подається у вигляді рівняння

$$Q_{\text{заг}} = kA \Delta t_{\text{лог}}, \quad (2)$$

де k – загальний коефіцієнт теплопередачі, $\text{Вт}/(\text{м}^2\text{К})$; $\Delta t_{\text{лог}}$ – середньологарифмічна різниця температур, $^{\circ}\text{C}$.

Формули для визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі U та k наведено у працях [3, 4]. Проте наявні залежності є досить складними, що ускладнює їх практичне використання під час проєктування систем HVAC. Аналіз наукових джерел показав, що існуючі дослідження приділяють недостатню увагу визначенню загальної теплопередачі РТТ у режимах конденсації вологи, тобто під час осушення повітря. Температурний метод є більш зручним у застосуванні та відзначається меншою обчислювальною складністю порівняно з ентальпійним підходом. Водночас цей метод не враховує вплив масопереносу на ефективність ребер, що може спричиняти суттєві відхилення від експериментальних результатів, особливо в режимах із інтенсивним утворенням конденсату.

Формулювання мети. Отримання емпіричних залежностей для визначення загальних коефіцієнтів теплопередачі за ентальпійним та температурним методами. Проведення експериментального дослідження тепломасообміну під час осушення повітря в РТТ. Вивчення впливу робочих умов (витрати повітря та холодої потужності) на ефективність охолодника з хвилястим оребренням, що працює на холодоагенті R32.

Основна частина. Конструкцію та принцип дії припливно-рециркуляційної установки (рис. 1), детально розглянуто у статті [5]. Для дослідження процесу осушення потоку повітря використовувалась секція охолодження з фреоновим охолоджувачем Aerostar серії SDC 40-20 у поєднанні з повітряним тепловим насосом. Теплообмінна поверхня РТТ SDC 40-20 складається з алюмінієвих пластин товщиною 0,1 мм, натягнутих на мідні трубки і має площу 8 м² [6]. Для визначення експериментальних значень коефіцієнтів U та k було проведено серію експериментальних досліджень при змінній витраті повітря.

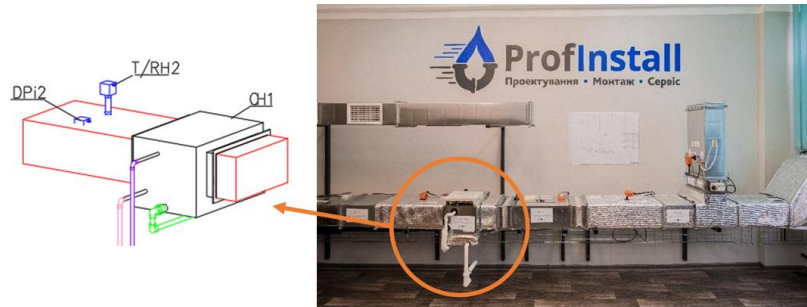


Рисунок 1 – Загальний вигляд установки: T/RH – датчик температури та вологості повітря на виході з охолоджувача; DPi – датчик перепаду тиску; CH1 – фреоновий охолоджувач Aerostar SDC 40-20 [5]

На рис. 2 показано, кількість теплоти, яка передається від повітря до холодоагенту шляхом випаровування вологості становить від 25 до 60 % у всіх експериментах. Таким чином під час всіх експериментів, поверхня ребер знаходилась у частково вологому стані. Що ускладнює розрахунок теплопередачі в РТТ за ентальпійним або температурним методами.

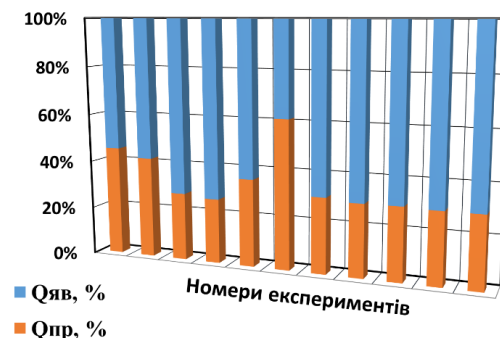


Рисунок 2 – Баланс прихованої та явної теплоти у РТТ під час експериментальних досліджень осушення повітря

Знаючи відповідні експериментальні значення для загального теплового потоку та ентальпій можна за рівняннями (1) та (2) знайти відповідно загальні коефіцієнти теплопередачі U та k :

$$U_{\text{екс}} = \frac{Q_{\text{заг}}}{A \Delta h_{\text{лог}}}; \quad (3)$$

$$k_{\text{екс}} = \frac{Q_{\text{зак}}}{A \Delta t_{\text{лог}}}. \quad (4)$$

Для оцінювання впливу кількості рядів труб на інтенсивність тепломасообміну було проаналізовано експлуатаційні характеристики поверхневих теплообмінників компанії Aerostar для різних повітроохолоджувачів серії SDC. Порівняння проводилося за постійної масової витрати та ідентичних вхідних температурних параметрів повітря.

Результати дослідження показали, що серед усіх розглянутих початкових параметрів найбільш істотний вплив має витрата (швидкість) повітря, що рухається через РТТ.

На рис. 3 та 4 наведено залежність коефіцієнтів теплопередачі від швидкості повітря на вході в РТТ. Як видно, вплив витрати повітря є співставним для обох випадків. Різна потужність холодильного обладнання впливала на абсолютне значення кількості теплоти, що відводилася від повітря, але набагато менше впливала на отримані коефіцієнти теплопередачі в дослідженому діапазоні.

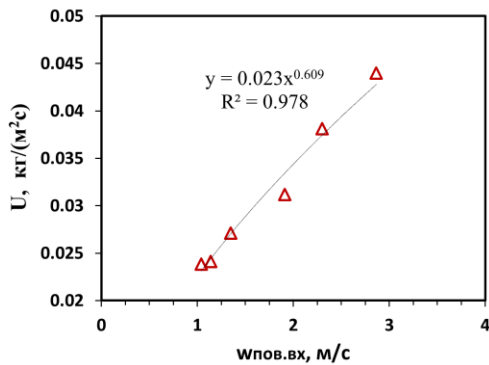


Рисунок 3 – Вплив витрати повітря на коефіцієнт теплопередачі, порахований ентальпійним методом

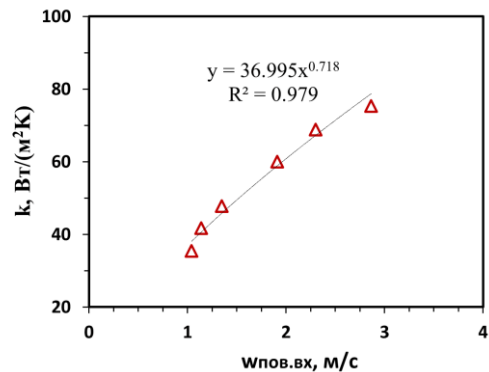


Рисунок 4 – Вплив витрати повітря на коефіцієнт теплопередачі, порахований через середній температурний напір

Отримані експериментальні дані вдалося узагальнити рівняннями:

$$U = 0,023w_{\text{пов}}^{0.61}; \quad (5)$$

$$k = 37w_{\text{пов}}^{0.718}. \quad (6)$$

Висновки. Експериментально досліджено процес теплопередачі під час осушення повітря в поверхневому ребристо-трубному охолоджувачі прямого випаровування (холодоагент R32). Встановлено, що серед робочих параметрів найбільший вплив на ефективність осушення має витрата повітря. Показано, що кількість рядів та холодильна потужність суттєво не впливають на коефіцієнти теплопередачі під час осушення. Отримано нові прості емпіричні рівняння загальних коефіцієнтів теплопередачі (5) та (6) для ентальпійного та температурного методу розрахунку. Запропоновані залежності описують експериментальні дані з похибкою $\pm 2\%$ і рекомендовані до використання для ребристо-трубних охолоджувачів з геометрією, характерною для серії Aerostar SDC, у діапазоні зміни швидкостей повітря від 1 до 3 м/с.

Перелік посилань:

1. Das Vorhaben, "Optimale Regelungsstrategie zum effizienten Betrieb von Klimaanlagen und deren Kälteversorgung," Förderkennzeichen 1050-B5-0.
2. Su X., Geng Y., Huang L., Li S., Wang Q., Xu Z., Tian S. Review on dehumidification technology in low and extremely low humidity industrial environments. Energy 302 (2024) 131793 <https://doi.org/10.1016/j.energy.2024.131793>.
3. Zhang G., Wang B., Li X., Shi W., Cao Y. Review of experimentation and modeling of heat and mass transfer performance of fin-and-tube heat exchangers with dehumidification. Applied Thermal Engineering. 2019. V. 146. P. 701–717. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2018.10.032>.
4. Naef A. A. Qasem, Syed M. Zubair. Compact and microchannel heat exchangers: A comprehensive review of air-side friction factor and heat transfer correlations. Energy Conversion and Management. 2018. V. 173. P. 555–601. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2018.06.104>.
5. Притула Н. О., Ляшенко А. М. Валідація лабораторного стенду для дослідження процесу конденсаційного осушення повітря. Енергетика і автоматика. 2025. №1. с.53–68. [https://doi.org/10.31548/energiya1\(77\).2025.053](https://doi.org/10.31548/energiya1(77).2025.053).
6. Оф. сайт компанії Aerostar. <https://aerostar.ua/ua> (Дата звернення: 01.04.2026)

В основі розрахунку будь-якого рекуператора лежать два базові рівняння:

1) рівняння теплопередачі

$$Q = kF\Delta t, \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, який передається через поверхню, Вт;

F – площа теплопередаючих стінок рекуператора, м²;

k – середній коефіцієнт теплопередачі, Вт/(м²·К);

Δt – середня різниця температур між теплоносіями, К.

2) рівняння теплового балансу:

$$Q = G_1 c_p (t_1 - t_{ox}) = G_2 c_p (t_n - t_o), \quad (2)$$

де G_1, G_2 – масові витрати відпрацьованого і свіжого повітря відповідно, кг/с;

c_p – масова питома теплоємність повітря, Дж/(кг·К);

t_1 – температура відпрацьованого повітря на вході в рекуператор, °С;

t_{ox} – температура охолодженого відпрацьованого повітря, °С;

t_n – температура нагрітого свіжого повітря на виході з рекуператора, °С;

t_o – температура навколишнього середовища, °С.

У цьому дослідженні шуканою величиною є площа поверхні теплообміну F .

Якщо $G_1 = G_2 = G$, то прирівнявши рівняння (1) та (2) вийде:

$$\frac{F}{G} = \frac{c_p(t_1 - t_{ox})}{k\Delta t} \quad \text{або} \quad \frac{F}{G} = \frac{c_p(t_n - t_o)}{k\Delta t}, \quad (3)$$

де F/G – питома поверхня рекуператора на одиницю витрати повітря, м² · с/кг.

Необхідно встановити, як ця величина залежить від характеристики рекуператора η_p .

Для цього через η_p треба виразити величини $t_{ox}, t_n, \Delta t$.

$$t_{ox} = t_1 - \eta_p(t_1 - t_o), \quad (4)$$

$$t_n = t_1 - (1 - \eta_p)(t_1 - t_o). \quad (5)$$

Отже, з урахуванням виразів (4) та (5), середня різниця температур між теплоносіями, матиме вигляд:

$$\Delta t = \frac{t_1 + t_{ox}}{2} - \frac{t_n + t_o}{2} = (t_1 - t_o)(1 - \eta_p). \quad (6)$$

Коефіцієнт теплопередачі рекуператора знаходиться як:

$$k = \frac{1}{\frac{1}{\alpha_1} + \frac{\delta}{\lambda} + \frac{1}{\alpha_2}}. \quad (7)$$

У виразі (7) можна знехтувати величиною термічного опору $\frac{\delta}{\lambda}$ металевої стінки рекуператора. Тоді, за умови, що $G_1 = G_2$, для пластинчатого рекуператора можна прийняти $\alpha_1 = \alpha_2 = \alpha_{пов}$, а вираз для коефіцієнта теплопередачі набуває вигляд:

$$k = \frac{\alpha_{пов}}{2}. \quad (8)$$

Тому виходить, що шукана залежність (3) зводиться до такого виразу:

$$\frac{F}{G} = \frac{2c_p\eta_p}{\alpha_{пов}(1 - \eta_p)}. \quad (9)$$

Отже, співвідношення (3), що визначає питому поверхню рекуператора на одиницю витрати повітря, залежить лише від двох параметрів η_p і $\alpha_{пов}$:

$$\frac{F}{G} = f(\eta_p, \alpha_{пов}). \quad (10)$$

На рис. 2 показані залежності величини F/G від характеристик рекуператора η_p і $\alpha_{пов}$ в практично важливих діапазонах зміни цих величин.

Графік (рис. 2,а) показує, що зі зростанням η_p потрібна питома поверхня рекуператора різко збільшується (особливо понад 0,6–0,7), але підвищення $\alpha_{пов}$ зменшує необхідну площу теплообміну, дозволяючи скоротити габарити рекуператора без втрати його ефективності. Графік (рис. 2,б) показує, що в коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{пов}$ на величину питомої поверхні теплообміну особливо великий при високих значеннях коефіцієнта рекуперації, який

забезпечує високу енергетичну ефективність схеми вентиляції та опалення. Графік підтверджує, що підвищення інтенсивності теплообміну є ключовим шляхом зменшення поверхні рекуператора, особливо при проєктуванні високоефективних систем з великими значеннями коефіцієнта рекуперації.

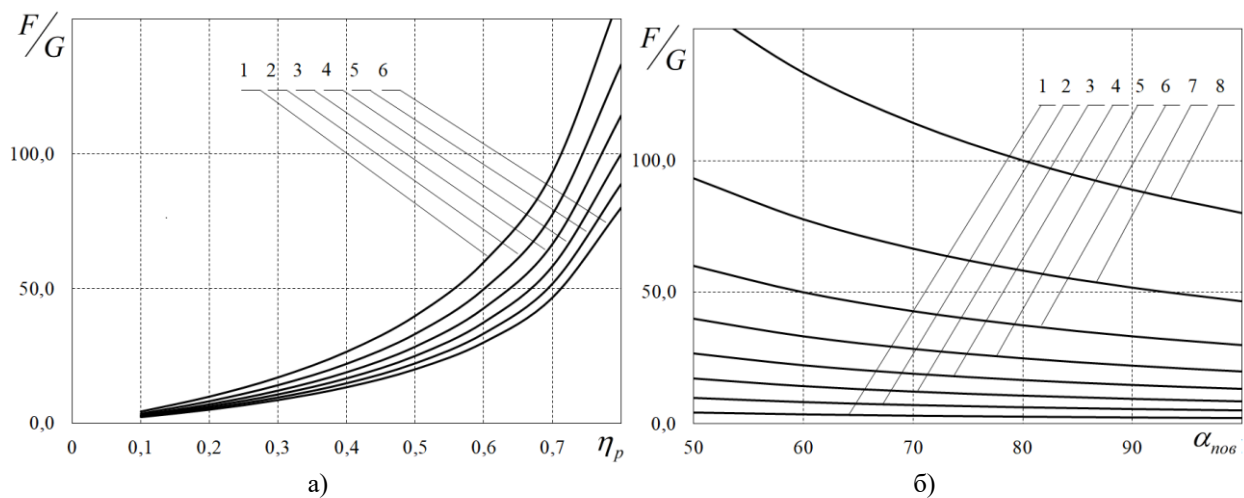


Рисунок 2 – Графік залежності питомої поверхні рекуператора на одиницю витрати повітря F/G :

а – від коефіцієнта рекуперації η_p для різних значень коефіцієнта тепловіддачі:

1-6 $\alpha_{\text{пов}} = 50; 60; 70; 80; 90; 100 \text{ Вт/м}^2\text{К}$; б – від коефіцієнта тепловіддачі $\alpha_{\text{пов}}$ для різних значень коефіцієнта рекуперації: 1-8 $\eta_p = 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8$.

Висновки. Аналіз показав, що енергоефективність теплонасосно-рекуператорних схем значною мірою визначається коефіцієнтом рекуперації, але в літературі бракує рекомендацій щодо його вибору. Водночас збільшення цього коефіцієнта підвищує енергоефективність, проте може вимагати більшої питомої поверхні теплообміну й погіршувати масогабаритні характеристики, тому розрахунки дають змогу обрати раціональний компроміс.

Перелік посилань:

1. Kadir Amasyali, Nora M. El-Gohary A review of data-driven building energy consumption prediction studies // Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2018. V. 81. P. 1192-1205. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2017.04.095>.
2. Renewable Energy Policies in a Time of Transition: Heating and Cooling. URL: <https://www.irena.org/publications/2020/Nov/Renewable-Energy-Policies-in-a-Time-of-Transition-Heating-and-Cooling>.
3. Мисак С., Шаповал С., Хивлюд А. Аналіз частки відновлюваних джерел енергії у валовому кінцевому енергоспоживанні країн Європи. Енерготехнології та ресурсозбереження. 2024. № 78 (1). с. 59–75. <https://doi.org/10.33070/etars.1.2024.05>.
4. Безродний М. К., Притула Н. О. Енергоефективність теплонасосних схем опалення, вентиляції і кондиціонування: монографія / М. К. Безродний, Н. О. Притула. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка», 2023, 528 с.
5. Безродний М. К., Притула Н. О., Опанасюк І. Ю. Теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти і рециркуляцією відпрацьованого повітря. KPI Science News. 2019. № 3. с. 7–15. <https://doi.org/10.20535/kpi-sn.2019.3.175730>.
6. Безродний М. К., Притула Н. О., Опанасюк І. Ю. Комбінована теплонасосна система повітряного опалення та вентиляції з рекуператором теплоти та частковою рециркуляцією відпрацьованого повітря. Енергетика: економіка, технології, екологія. 2019. № 3. с. 65–73.

¹ Аспірант 2 курсу Менжинський О. Ю.

¹ Доц., к.т.н. Соломаха А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk&oi=sra>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПОВІТРЯНИХ ТА ГЕОТЕРМАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ НАСОСІВ В УМОВАХ РЕАЛЬНОЇ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасний етап розвитку енергетики характеризується активним переходом на низьковуглецеві системи теплопостачання, де ключову роль відіграє впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ). Теплові насоси (ТН) є однією з найперспективніших технологій для декарбонізації житлового сектору, оскільки вони здатні трансформувати низькопотенційну енергію довкілля у високопотенційну теплоту для опалення та гарячого водопостачання (ГВП). Актуальність проблеми зростає на тлі європейських директив (зокрема, 2018/844/EU), проте вибір між повітряними та геотермальними системами залишається складним завданням, адже їхня фактична ефективність критично залежить від місцевих кліматичних умов. В Україні використання ТН лише набуває масового характеру, тому отримання достовірних даних про їхню реальну ефективність є необхідним кроком для скорочення термінів окупності інвестицій.

Аналіз останніх досліджень. Міжнародний досвід демонструє значний інтерес до оцінки сезонного коефіцієнта ефективності (SCOP) теплових насосів. Зокрема, дослідження ефективності систем у різних кліматичних зонах (за допомогою моделювання TRNSYS) підтверджують, що геотермальні насоси (GSHP) демонструють стабільну роботу в холодному кліматі, тоді як повітряні (ASHP) різко втрачають ефективність за низьких температур. Сучасні наукові дослідження також фокусуються на методах підвищення SCOP, включаючи застосування інверторних компресорів, предиктивного управління з прогнозуванням погодних умов (збільшення SCOP до 23 %) та інтеграцію низькотемпературних теплових акумуляторів. Водночас, дослідження європейських авторів наголошують на значній залежності фактичного сезонного коефіцієнта ефективності від умов локального клімату [1-4].

Більшість існуючих технічних рішень та методик оцінки ефективності базується на європейських нормах (EN 14511, EN 14825, EN 16147) та номінальних показниках COP (Coefficient of Performance), отриманих у лабораторних умовах. Проте пряме перенесення цих стандартів на кліматичні умови України без адаптації часто дає некоректні результати. В Україні практично відсутні масштабні експериментальні дослідження, які б враховували енергетичні витрати на відтайку випарника повітряних ТН, динаміку температурного виснаження ґрунтового масиву та роботу систем на комбіновані навантаження (ГВП, басейн, охолодження).

Формулювання мети. Метою роботи є кількісна оцінка та порівняльний аналіз фактичної енергоефективності (сезонного коефіцієнта ефективності, SCOP) повітряного ТН Viessmann Vitocal 200-S D16 та геотермального ТН Viessmann Vitocal 300-G C16 на основі річного циклу експлуатації в реальних кліматичних умовах України.

Основна частина. В основу дослідження покладено метод безперервного автоматизованого моніторингу робочих параметрів теплових насосів в умовах реальної експлуатації на діючому об'єкті. На відміну від стандартних лабораторних випробувань за методикою температурних «бінів» згідно зі стандартом EN 14825, які оперують

усередненими кліматичними даними, у цій роботі використано масиви фактичних емпіричних даних експлуатації. Збір даних здійснювався за допомогою високоточних інтегрованих контролерів Viessmann Vitotronic 200 (тип WO1C). Система моніторингу спирається на розгалужену мережу датчиків температури (зокрема, типу NTC 10 кОм та Pt500A), що безперервно фіксували показники зовнішнього повітря, первинного ґрунтового контуру, а також параметри теплоносія в магістралях подачі та зворотного вторинного контуру.

Для математичної обробки результатів використовувалися наступні залежності. Миттєвий коефіцієнт трансформації теплоти розраховувався за допомогою класичного термодинамічного балансу:

$$\text{COP} = \frac{\dot{Q}_{HP}}{P_{el}} = \frac{\dot{m} \cdot c_p \cdot (T_1 - T_2)}{P_e}, \quad (1)$$

де $\dot{m}$ – масова витрата теплоносія, кг/с;

c_p – питома теплоємність, кДж/(кг·К);

T_1, T_2 – температури подачі та зворотної лінії;

P_e – електрична потужність компресора та допоміжного обладнання.

Для обчислення фактичної сезонної ефективності застосовано метод інтегрування тижневих показників виробленої теплової енергії ($Q_{HP,i}$) та спожитої електричної енергії ($E_{el,i}$) протягом усього досліджуваного періоду:

$$\text{SCOP} = \frac{\sum_{i=1}^n Q_{HP,i}}{\sum_{i=1}^n E_{el,i}} \quad (2)$$

Для порівняльного аналізу та оцінки термодинамічної досконалості реальних робочих циклів також використовувалася теоретична межа ефективності ідеального циклу Карно (COP_{max}).

На основі ґрунтового аналізу масиву експлуатаційних даних, зібраних протягом повного річного циклу (з вересня 2023 року по вересень 2024 року), встановлено фактичні робочі характеристики двох типів систем при змішаних навантаженнях:

Геотермальна система (Viessmann Vitocal 300-G C16): Тепловий насос типу «розсіл-вода» продемонстрував надзвичайно високу стабільність енергетичних показників із середньорічним значенням $\text{SCOP} = 4,41$. Така ефективність зумовлена значною термічною інерційністю ґрунтового масиву: температура первинного контуру (розсолу) протягом усього опалювального сезону знаходилася у вузькому та оптимальному діапазоні від 0,7 °C до 10,7 °C. Це забезпечило підтримання миттєвого значення COP на рівні вище 4,0 навіть у періоди пікових зимових морозів, уникаючи критичних перевантажень компресора. Окрім того, система довела свою високу економічність у літній період: завдяки вбудованому блоку «natural cooling» (пасивне охолодження) установка відпрацювала понад 1000 годин, відводячи надлишкове тепло від будівлі безпосередньо в ґрунт із мінімальним споживанням електроенергії, яка витрачалася виключно на роботу циркуляційних насосів.

Повітряна система (Viessmann Vitocal 200-S D16): Тепловий насос типу «повітря-вода» показав середньорічний $\text{SCOP} = 3,38$. Характерною особливістю його роботи стала суттєва нестабільність показників, яка мала пряму негативну кореляцію з температурою зовнішнього середовища. Критичне падіння ефективності було зафіксовано на 2-му тижні 2024 року: при зниженні зовнішньої температури до -15,9 °C миттєвий COP системи обвалився до показника 2,62. Аналіз річного енергетичного балансу показав, що Vitocal 200-S загалом виробив 38 289 кВт·год тепла, з яких 78,8 % було спрямовано на комбіноване навантаження – базове опалення будівлі та постійний підігрів басейну. Загальне

споживання електроенергії системою виявилось високим і склало 11 335 кВт·год. Такі значні енерговитрати пояснюються синергією кількох факторів: тривалою роботою компресора за умов низьких температур, високими енергетичними витратами на регулярну відтайку випарника зовнішнього блоку (що не фіксується ідеальними лабораторними тестами), а також необхідністю підтримувати високі температури подачі теплоносія для теплообмінника басейну.

Висновки. Для кліматичних умов України верифіковано реальний розрив між теоретичними (задекларованими за європейськими стандартами) та фактичними показниками SCOP для бівалентних систем тепlopостачання. Доведено, що при роботі на змішане навантаження геотермальні ТН забезпечують на 30,5 % вищу сезонну енергоефективність порівняно з повітряними аналогами.

Отримані емпіричні дані є критично важливими для оптимізації проєктних рішень при влаштуванні систем опалення приватних будинків. Результати дозволяють обґрунтовано рекомендувати використання ґрунтових теплових насосів для об'єктів із постійним цілорічним навантаженням (наприклад, басейни) та потребою у кондиціонуванні, що сприятиме суттєвому зниженню навантажень на електричні мережі в зимові максимуми.

Перелік посилань:

1. Safa A., Fung A., & Kumar R. (2015). Comparative thermal performances of a ground source heat pump and a variable capacity air source heat pump systems for sustainable houses. *Applied Thermal Engineering*, 81, 279–287.
2. Pospisil J., Spilacek M., & Kudela L. (2018). Potential of predictive control for improvement of seasonal coefficient of performance of air source heat pump in Central European climate zone. *Energy*, 154, 415–423.
3. Kowalski P., & Szalanski P. (2019). Seasonal coefficient of performance of air-to-air heat pump and energy performance of a building in Poland. *E3S Web of Conferences*, 116, 00039.
4. Dongellini M., Naldi C., & Morini G. (2015). Seasonal performance evaluation of electric air-to-water heat pump systems. *Applied Thermal Engineering*, 90, 1072–1081.
5. ДСТУ EN 14511:2020 (EN 14511:2018, IDT). Кондиціонери, агрегатовані охолоджувачі рідини та теплові насоси з компресорами з електроприводом для обігрівання та охолодження приміщень.

¹ Аспірант 2 курсу Правослов А. О.

¹ Доц., к.т.н. Романова К. О.

https://scholar.google.ru/citations?hl=uk&user=L1WpB4AAAAAJ&view_op

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ КОТЕЛЬНОЇ УСТАНОВКИ ШЛЯХОМ ОПТИМІЗАЦІЇ ПОВІТРЯНО-ПАЛИВНОГО СПІВВІДНОШЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах енергетичної кризи та зростання вартості паливно-енергетичних ресурсів підвищення енергоефективності котельних установок є одним із пріоритетних завдань промислової теплоенергетики України. Котельні установки є значними споживачами природного газу, і навіть незначне відхилення повітряно-паливного співвідношення від оптимального призводить до суттєвих втрат теплоти та зростання питомих витрат палива [1]. Це обумовлює актуальність розробки та впровадження методів контролю й оптимізації процесу горіння безпосередньо в умовах експлуатації.

Аналіз останніх досліджень. Питання підвищення ефективності роботи котельних установок розглядаються у численних наукових працях. Г. Сатьявада та С. Балді запропонували гібридний підхід першопринципного моделювання для моніторингу енергоефективності конденсаційних котлів, що дозволяє в режимі реального часу оцінювати відхилення від оптимального режиму [2]. Д. Моліна та ін. застосували багатоцільову оптимізацію для підвищення ефективності парового котла, досягнувши значного зниження питомої витрати палива [3]. Дослідження термодинамічних процесів у повітряному потоці, проведені М. Стручаєвим та Ю. Постол, підтверджують визначальну роль якості повітропостачання для забезпечення повноти згоряння палива [4]. Загальні питання енергозбереження в теплоенергетичних системах висвітлено в інших джерелах [5, 6].

Формулювання мети. Метою роботи є визначення оптимального повітряно-паливного співвідношення для котельної установки, що працює на природному газі, з метою мінімізації питомої витрати палива та підвищення ККД котла.

Основна частина. Ефективність процесу горіння в котельній установці суттєво залежить від коефіцієнта надлишку повітря α , який визначається як відношення фактичної кількості повітря до теоретично необхідного:

$$\alpha = \frac{L_{\text{факт}}}{L_0}, \quad (1)$$

де $L_{\text{факт}}$ – фактична кількість повітря, що подається на горіння, $\text{м}^3/\text{м}^3$ палива;
 L_0 – теоретично необхідна кількість повітря для повного згоряння одиниці палива, $\text{м}^3/\text{м}^3$.

При $\alpha < 1$ спостерігається неповне згоряння палива з утворенням СО та незгорілих вуглеводнів, що призводить до хімічного недопалу. На рис.1 наведено залежність температури відхідних газів t_{yx} від коефіцієнта надлишку повітря α при трьох рівнях навантаження котла: 50 %, 75 % та 100 %.

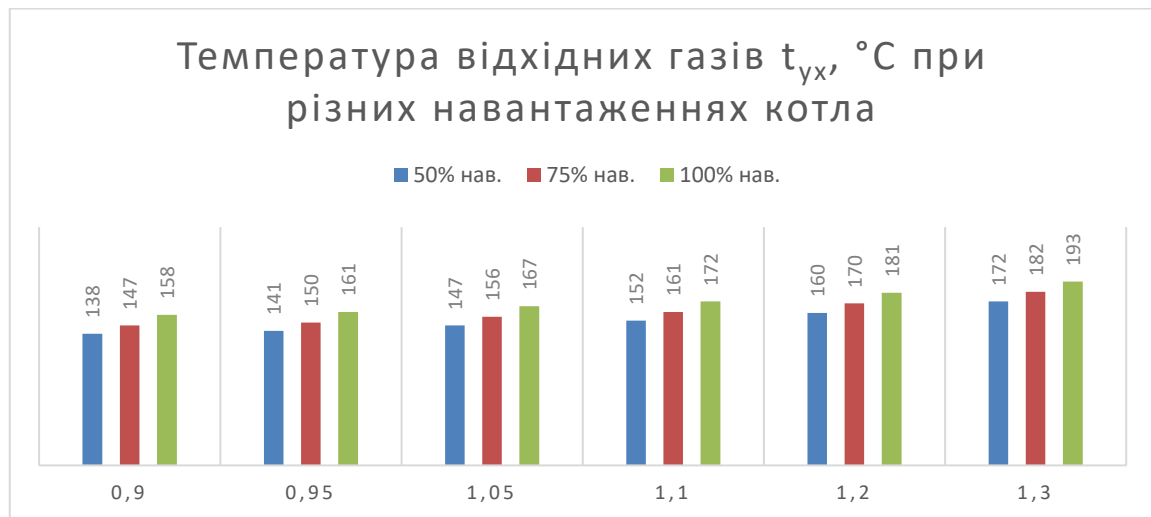


Рисунок 1 – Температура відхідних газів t_{yx} , °C при різних навантаженнях котла

З графіка видно, що зі зростанням α температура відхідних газів монотонно збільшується за всіх режимів навантаження, що підтверджує зростання теплових втрат із димовими газами. Підтримання оптимального коефіцієнта надлишку повітря позитивно впливає не лише на паливну економічність, а й на екологічні показники роботи котельної установки. Зменшення хімічного недопалу при $\alpha \approx 1,05$ сприяє зниженню викидів оксиду вуглецю та незгорілих вуглеводнів, а обмеження надлишкового повітря – зменшенню об'єму відхідних газів і, відповідно, втрат теплоти з ними. У результаті досягається комплексний ефект: підвищення ККД, скорочення витрат природного газу та зниження антропогенного навантаження на довкілля.

Контроль коефіцієнта надлишку повітря α доцільно здійснювати на ділянці подачі повітря до пального пристрою із застосуванням датчиків кисню в димових газах та автоматизованого регулятора співвідношення «газ–повітря».

При $\alpha > 1$ надлишкове повітря охолоджує топкові гази та збільшує втрати теплоти з димовими газами. Тепловий ККД котла η визначається як:

$$\eta = 1 - \sum q_i = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6), \quad (2)$$

$$\eta = 1 - \sum q_i = 1 - (q_2 + q_3 + q_4 + q_5 + q_6),$$

де q_2 – відносні втрати теплоти з димовими газами;

q_3 – втрати від хімічного недопалу;

q_4 – втрати від механічного недопалу;

q_5 – втрати від зовнішнього охолодження;

q_6 – втрати з фізичною теплотою шлаку.

Залежність втрат теплоти з димовими газами q_2 від коефіцієнта надлишку повітря описується виразом:

$$q_2 = \frac{(\alpha - 1) \cdot V_0 \cdot c_p \cdot (t_{yx} - t_0)}{Q_H^p} \cdot 100\%, \quad (3)$$

де V_0 – теоретичний об'єм димових газів;

$\text{м}^3/\text{м}^3$; c_p – питома теплоємність димових газів;

$\text{кДж}/(\text{м}^3 \cdot \text{К})$; t_{yx} – температура відхідних газів;

°C; t_0 – температура навколишнього повітря;

°C; Q_H^p – нижча теплота згоряння палива, $\text{кДж}/\text{м}^3$.

На підставі розрахунків за наведеними залежностями було проведено аналіз роботи водогрійного котла при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря. Результати розрахунку зведено до таб. 1.

Таблиця 1 – Показники роботи котельної установки при різних значеннях коефіцієнта надлишку повітря

Коефіцієнт надлишку повітря α	Температура відхідних газів t_{yx} , °C	Втрати з димовими газами q_2 , %	Втрати від хімічного недопалу q_3 , %	ККД котла η , %
0,90	158	7,1	3,8	89,1
0,95	161	7,6	1,9	90,5
1,05	167	8,4	0,2	91,4
1,10	172	9,2	0,0	90,8
1,20	181	10,9	0,0	89,1
1,30	193	13,1	0,0	86,9

З аналізу даних табл. 1 випливає, що максимальний ККД котла досягається при $\alpha = 1,05$, що відповідає незначному надлишку повітря, достатньому для забезпечення повноти згоряння при мінімальних втратах з відхідними газами. Збільшення α понад 1,10 призводить до інтенсивного зростання q_2 та зниження ККД. Зменшення α нижче 1,00 викликає різке зростання хімічного недопалу q_3 . На рис.2 представлено зміну показників теплових втрат котла – втрат із димовими газами q_2 , втрат від хімічного недопалу q_3 , сумарних втрат Σq_i та ККД η – залежно від коефіцієнта надлишку повітря α в діапазоні 0,90–1,30.

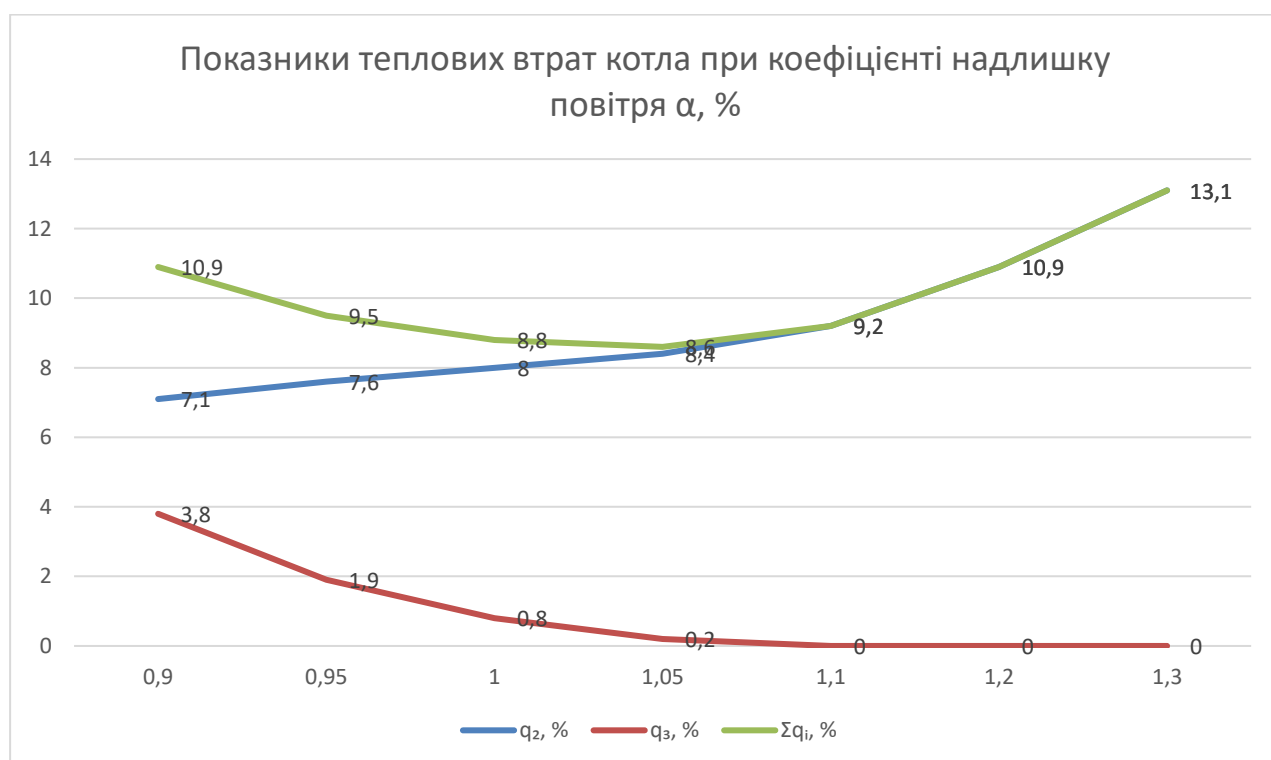


Рисунок 2 – Показники теплових втрат котла, коефіцієнт надлишку повітря $\alpha = 0,90\text{--}1,30$

Аналіз графіка свідчить про те, що оптимальне значення $\alpha = 1,05$ забезпечує мінімальні сумарні втрати та максимальний ККД котла 91,4 %. Економічна доцільність впровадження автоматичного регулювання підтверджується швидкою окупністю таких систем за рахунок зменшення витрат палива. Навіть незначне підвищення ККД на 1–2 %

для котелень середньої потужності забезпечує суттєву річну економію природного газу. Крім того, стабілізація режиму горіння знижує термічне навантаження на поверхні нагріву, що позитивно впливає на ресурс обладнання та зменшує витрати на ремонт і обслуговування.

Практична реалізація оптимізації повітряно-паливного співвідношення передбачає встановлення автоматичної системи регулювання подачі повітря з використанням газоаналізатора відхідних газів за вмістом O_2 . Коригування положення регулювального клапана повітря здійснюється у зворотному зв'язку за сигналом від газоаналізатора, що забезпечує підтримання α у діапазоні 1,03–1,07 незалежно від навантаження котла [1].

Висновки. Оптимізація повітряно-паливного співвідношення є ефективним і порівняно малозатратним заходом підвищення енергоефективності котельної установки. Розрахунки показали, що підтримання коефіцієнта надлишку повітря на рівні $\alpha = 1,05$ дозволяє досягти максимального ККД котла 91,4 % та знизити питому витрату газу на 2–4 % порівняно з нерегульованим режимом. Впровадження автоматичної системи регулювання на базі газоаналізатора відхідних газів забезпечує стабільне підтримання оптимального режиму горіння в умовах змінного навантаження.

Перелік посилань:

1. Ткаченко С. Й., Чепурний М. М., Степанов Д. В. Розрахунки теплових схем і основи проектування джерел теплопостачання : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2005. 137 с.
2. Satyavada H., Baldi S. Monitoring energy efficiency of condensing boilers via hybrid first-principle modelling and estimation. *Energy*. 2018. Vol. 142. P. 121–129. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.09.124>.
3. Molina D. L. et al. Multiobjective Optimization of the Energy Efficiency and the Steam Flow in a Bagasse Boiler. *Sustainability*. 2023. Vol. 15, № 14. DOI: <https://doi.org/10.3390/su151411290>.
4. Стручаєв М. І., Постол Ю. О. Аналіз термодинамічних процесів у потоці повітря. Вісник ХНТУСГ ім. Петра Василенка. 2017. Вип. 187. URL: <https://elar.tsatu.edu.ua/server/api/core/bitstreams/5815f487-91e2-4601-aa58-0070cd95750f/content> (дата звернення: 22.02.2026).
5. Трикоз В., Галавур М., Постол Ю. О., Стручаєв М. І. Енергоефективність та енергозбереження. Сучасні проблеми інноваційного розвитку електричної інженерії : матеріали І Всеукр. інтернет-конф. Мелітополь : ТДАТУ, 2020. С. 63–65.
6. Підвищення енергоефективності національної економіки – концепція нової цільової програми на 2022-2026 роки. Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. URL: <https://saee.gov.ua/news/pidvishhennia-energoefektivnosti-nacionalnoyi-ekonomiki-koncepciia-novoyi-ciliovoyi-programi-na-2022-2026-roki> (дата звернення: 22.02.2026).

¹ Аспірант 2 курсу Теличко І. В.

¹ Доц., к.т.н. Середа В. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=ua&user=-a6E3eMAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ГІБРИДНІ СИСТЕМИ ОПРІСНЕННЯ ВОДИ З МІНІМАЛЬНИМ СКИДАННЯМ РОЗСОЛУ

Постановка проблеми та її актуальність. Зростання дефіциту прісної води стимулює розвиток опріснення морської та солонуватої води; у світі діють тисячі установок із сумарною продуктивністю порядку 142 млн м³/добу [1]. Водночас опріснення супроводжується утворенням значних обсягів концентрованого розсолу, скидання якого створює екологічні ризики та посилюється регуляторними обмеженнями [2]. Тому актуальним є перехід до підходів мінімального/нульового скиду рідини, (Minimal/Zero Liquid Discharge, MLD/ZLD), однак їх реалізацію стримує висока енергоємність і вартість кристалізаційних стадій [3]. Це обґрунтовує потребу в енергоефективних гібридних схемах, для зменшення обсягу кінцевого скиду.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження MLD/ZLD переважно зосереджені на гібридних схемах, оскільки вони часто мають кращі енергетичні та економічні показники, ніж окремо мембранні або термічні рішення [4]. Для мембранного напрямку розвивають високонапірний зворотний осмос, (High-Pressure Reverse Osmosis, HPRO) та споріднені підходи для роботи з більш солоними розсолами, але їх застосування обмежують компакція мембран, поляризація та масштабування [2]. Водночас кристалізація лишається «вузьким місцем» ZLD через високу енергоємність, тому пропонують альтернативи на базі зволоження–осушення, (Humidification–Dehumidification, HDH): показано HDH-кристалізацію з 700–900 кДж/кг розсолу (тепло) та 5–11 кДж/кг (електрика) [3], а також малі гібридні HDH–RO системи з низьким питомим електроспоживанням у конкретних конфігураціях [5].

Формулювання мети. Метою роботи є обґрунтування доцільності використання гібридної схеми RO + HDH для реалізації підходів MLD/ZLD шляхом:

- аналізу енергетичних обмежень RO при зростанні солоності;
- оцінки потенціалу HDH як стадії доущільнення/кристалізації концентрату;
- формування логіки інтеграції RO та HDH для зменшення обсягу кінцевого скиду.

Основна частина. Зворотний осмос є домінуючою мембранною технологією опріснення. Для RO характерні питомі витрати електроенергії на рівні 2–6 кВт·год/м³ (для типових умов) [6]. Важливо, що стандартні RO-системи мають обмеження за солоністю живильної води: узагальнені порівняння технологій наводять граничне значення близько 70 г/л загальної кількості розчинених речовин (Total Dissolved Solids, TDS) для RO [3]. При подальшому зростанні солоності різко зростає осмотичний тиск, що вимагає підвищення робочого тиску та призводить до збільшення питомого енергоспоживання (Specific Energy Consumption, SEC), а також ускладнює роботу через поляризацію концентрації та масштабування. Додатково це підвищує ризики неорганічного накипу та мембранного фаулінгу, що знижує проникність, скорочує міжсервісні інтервали та підвищує витрати на промивання й попередню підготовку води. У результаті RO доцільно використовувати як енергоефективну стадію попереднього вилучення води, тоді як подальше доущільнення концентрату потребує інтеграції з альтернативними процесами.

Осмотичний тиск можна описати рівнянням ван'т-Гоффа:

$$\pi = iCRT, \quad (1)$$

де i – безрозмірний фактор ван’т-Гоффа, C – молярна концентрація розчиненої речовини моль/м³, R – універсальна газова стала Дж/(моль · К), T – абсолютна температура К.

Оскільки концентрація C зростає зі збільшенням TDS, осмотичний тиск π зростає, погіршуючи енергетичну ефективність RO на високих солоностях. Тому RO доцільно використовувати як енергоефективну стадію попереднього вилучення води в діапазоні до ~70 г/л, після чого потрібна інша технологія доуцілювання.

HDH є термічною технологією, що базується на випаровуванні води в потоці повітря та подальшій конденсації пари. На відміну від RO, HDH не обмежена осмотичним тиском і може працювати з високомінералізованими розсолами. Для задач ZLD особливо цікавими є HDH-конфігурації, які поєднують концентрування та кристалізацію; для HDH-кристалізації показано низькі електровитрати (~ 4 кВт·год/м³) і помірні теплові витрати (700–900 кДж/кг розсолу) при роботі з концентрованими потоками [3]. Це робить HDH перспективною стадією «після RO» для зменшення обсягу залишкового розсолу та підготовки до вилучення солей. Питоме енергоспоживання в системах HDH і RO при різній солоності води наведено в Табл. 1.

Таблиця – 1 Питоме енергоспоживання HDH/RO.

Тип води HDH/RO	Солоність живильної води, ppm (TDS), мг/л HDH/RO	Робочий тиск, МПа HDH/RO	Питоме енергоспоживання, кВт·год/м ³ HDH/RO
Побутова	< 1 000	0,1/0,3–1	~4<~0,5–1,0
Слабосолона вода	1 000 – 10 000	0,1/1–2,5	~4/1–2,5
Морська вода	10 000 – 40 000	0,1/5,5–8,0	~4/3–6
Концентровані розсоли	> 40 000 – 70 000+	0,1/7,0–12,0+	~4–5/5–10+

MLD орієнтована на максимальне скорочення обсягу розсолу перед утилізацією, тоді як ZLD передбачає повне усунення рідкого скиду з отриманням твердої солі та води, придатної для повторного використання [2]. Оглядові дані підкреслюють, що гібридні системи в багатьох випадках забезпечують нижчі значення SEC і кращу економіку порівняно з «чисто мембранними» або «чисто термічними» підходами [4]. Схема гібридної установки знесолення води показана на рис. 1.

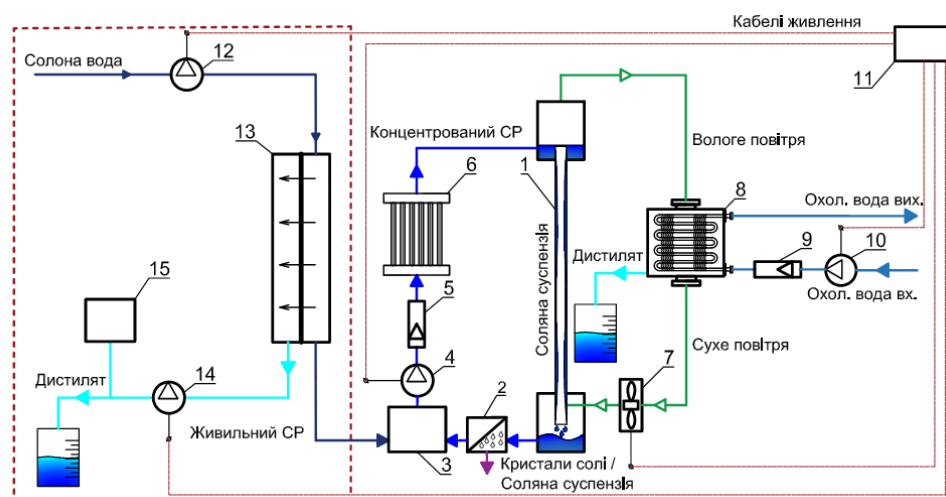


Рисунок 1 – Схема гібридної установки знесолення води:

- 1 – насадки; 2 – камера зволожувача / знесолення; 3 – конденсатор; 4 – живильний бак; 5 – фільтр для солі; 6, 10, 12, 14 – насоси; 7 – повітрянагрівач; 8 – вентилятор; 9 – пакувальний матеріал; 11 – джерело живлення; 13 – мембрана; 15 – розширювальний бак; CP – солоний розчин

У гібридній схемі RO + HDH RO виконує енергоефективну стадію попередньої концентрації (до технологічно доцільної межі солоності), після чого HDH використовується для подальшого доущільнення концентрату та (за необхідності) кристалізації. Така логіка інтеграції дозволяє зменшити навантаження на найбільш енергоємні ZLD-стадії та знизити обсяг кінцевого скиду. Крім того, перенесення «високосоного» етапу з мембранної частини на HDH зменшує ризики мембранного масштабування й фаулінгу, стабілізуючи роботу RO у його оптимальному діапазоні. Це також дає змогу ефективніше розподіляти енергетичні потоки: електроенергія переважно витрачається на RO, тоді як HDH може використовувати низькопотенційне або відпрацьоване тепло. У підсумку підвищується загальний ступінь водовідновлення, а концентрат перетворюється на більш керований потік, придатний для подальшого вилучення солей у межах MLD/ZLD.

Висновки. RO є домінуючою та енергоефективною технологією опріснення з типовим SEC 2–6 кВт·год/м³, однак практично обмежена солоністю близько 70 г/л [6]. Зі зростанням солоності підвищується осмотичний тиск ($\pi = iCRT$), що призводить до зростання робочого тиску й енерговитрат RO та погіршення експлуатаційної надійності. Додатковими наслідками є зростання схильності до концентраційної поляризації, масштабування та фаулінгу, що знижує продуктивність і збільшує потребу в інтенсивнішій підготовці води та сервісному обслуговуванні мембран. HDH може працювати з високомінералізованими розсолами та є перспективною стадією доущільнення/кристалізації; для HDH-кристалізації показані 700–900 кДж/кг розсолу тепла та 5–11 кДж/кг електроенергії [3]. За наявності низькопотенційного або відпрацьованого тепла термічна складова може бути частково «дешевшою» з точки зору електричного балансу установки, що підвищує практичну привабливість HDH у блоці керування розсолом. Гібридизація RO + HDH є обґрунтованим шляхом до MLD/ZLD, оскільки поєднує енергоефективність мембранної стадії та технологічну придатність термічної стадії для високих солоностей [4]. Подальші дослідження доцільно спрямувати на оптимізацію інтеграції (теплова рекуперація, вибір робочих температур/витрат повітря і розсолу, режимів концентрування), а також на узгодження баз порівняння енергоспоживання (на 1 м³ продукту та/або на 1 кг/м³ оброблюваного розсолу) для коректної оцінки ефективності гібридних схем у MLD/ZLD.

Перелік посилань:

1. Elewa M. M. Emerging and Conventional Water Desalination Technologies Powered by Renewable Energy and Energy Storage Systems toward Zero Liquid Discharge. *Separations*, 11 (2024) 291.
2. Manawi Y., Jawad J., Alafifi F., Kochkodan V. A mini-review on the use of high-pressure reverse osmosis (HPRO) in desalination and water treatment. *Desalination*, 620 (2026) 119618.
3. Chen Q., Akhtar F. H., Burhan M., Ma K., Ng K. C. A novel zero-liquid discharge desalination system based on the humidification-dehumidification process: A preliminary study. *Water Research*, 207 (2021) 117794.
4. Anjomani N., Shamshiri S., Babapoor A., Rahimi-Ahar Z., Mastani Joybari M., Khiadani M. Desalination systems for minimal and zero liquid discharge purposes: A review. *Chemical Engineering and Processing – Process Intensification*, 216 (2025) 110442.
5. Djuansjah J., Joseph A., Abdelgaied M., Ataya S., Sharshir S.W. Techno-economic investigation of the solar-powered innovative small-scale hybrid HDH-RO-SD desalination unit incorporated with a shell and tube nano-enhanced energy storage reservoir. *Separation and Purification Technology*, 390 (2026) 136966.
6. Prado de Nicolás A., Molina-García Á., García-Bermejo J.T., Vera-García F. Desalination, minimal and zero liquid discharge powered by renewable energy sources: Current status and future perspectives. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 187 (2023) 113733.

¹ Аспірант 3 курсу Заболотний О. А.

¹ Доц., к.т.н. Соломаха А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk&oi=sra>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ УЛОВЛЕННЯ ДІОКСИДУ ВУГЛЕЦЮ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ БІОГАЗУ

Постановка проблеми та її актуальність. Викиди діоксиду вуглецю – одна із ключових проблем сучасної енергетики, що загрожує екологічній безпеці усіх регіонів світу. Один із основних викликів розвитку енергетики на сьогоднішній день – зменшення викидів парникових газів та перехід до низьковуглецевих технологій генерації енергії для запобігання змін клімату. Одним із перспективних напрямків вирішення проблеми є застосування технологій уловлення діоксиду вуглецю із газових потоків, зокрема з використанням абсорбційних методів та масообмінних апаратів. Технологія має значний потенціал для зменшення негативного впливу промисловості на екосистему світу.

Аналіз останніх досліджень. У актуальних дослідженнях значна увага приділяється системам уловлення CO₂, зокрема системам абсорбції-десорбції із використанням водних розчинів амінів. Автори відмічають, що дана технологія забезпечує вищу селективність і ефективність уловлення діоксиду вуглецю у порівнянні із альтернативними [1]. Однак зазначається, що для регенерації розчину необхідна значна теплова потужність окремих елементів системи, що робить процес досить енергоємним і є одним із головних недоліків технології [2]. Також, у сучасних наукових роботах автори розглядають використання біогазу як перспективне джерело енергії, проте його широке використання обмежене через високий вміст діоксиду вуглецю. CO₂ може викликати корозію обладнання і негативно впливає на якість спалювання [3]. Проте автори звертають увагу на перспективу уловлення діоксиду вуглецю із біогазу за допомогою хімічної абсорбції, зокрема із використанням водного розчину моноетаноламіну. Висока селективність хімічних абсорбентів дозволяє отримати біометан із дуже високим вмістом метану, що може сягати 99 % [4].

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження системи уловлення діоксиду вуглецю за допомогою хімічної абсорбції із використанням біогазу, та оцінки доцільності використання частини отриманого біометану для забезпечення власних енергетичних потреб системи.

Основна частина. Розглянемо схему процесу уловлення діоксиду вуглецю що зображена на рис. 1. В даній системі реалізовано цикл абсорбції CO₂ із регенерацією абсорбенту. Основні елементи схеми – абсорбер 2, де відбувається уловлення діоксиду вуглецю, і регенераційна колона 4, де насичений CO₂ абсорбент регенерує, відновлюючи свою здатність поглинати вуглець. На схемі зображено два основні контури – відкритий газовий і закритий рідинний контури. Особливість запропонованої схеми полягає у наявності котла 10, який дозволяє спалювати продукт уловлення CO₂ на місці, тим самим забезпечувати високі енергетичні потреби системи регенерації абсорбенту.

У газовому контурі, біогаз із сховища 1 подається до абсорберу 2, де відбувається уловлення діоксиду вуглецю у результаті контакту біогазу із рідким абсорбентом. Після абсорберу, очищений біогаз(біометан) охолоджується у охолоджувачі 7, проходить через сепаратор 8, де конденсат відводиться на дренаж 14. Далі біометан потрапляє до розподільвача 9, газовий потік розділяється, направляючи необхідний об'єм біометану на власні потреби системи до котла 10, а решта подається до споживача 15. Після спалювання,

продукти згоряння біометану підігрівають циркулюючий через теплообмінник 6 теплоносії і викидаються у навколишнє середовище 16.

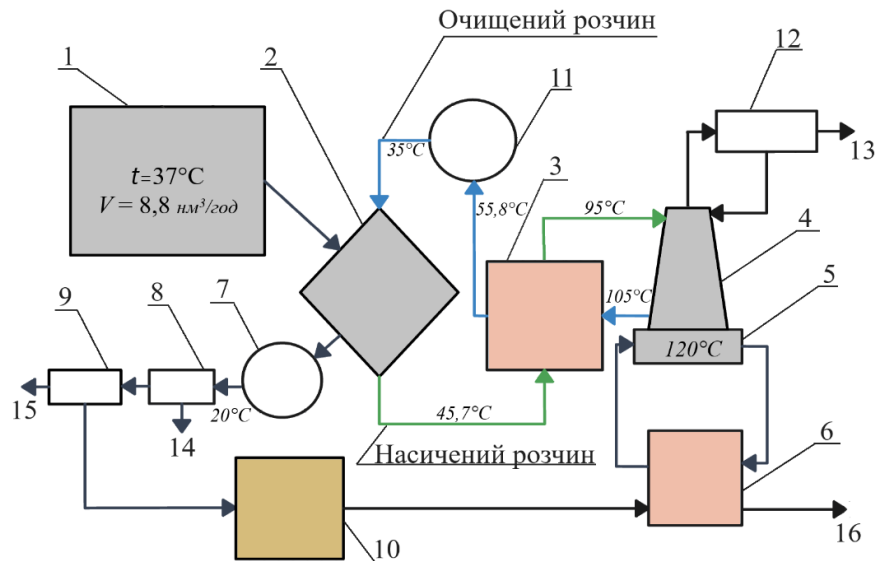


Рисунок 1 – Принципова схема процесу уловлення діоксиду вуглецю:

- 1 – сховище біогазу; 2 – абсорбер; 3 – теплообмінник рідинного контуру;
4 – регенераційна колона; 5 – ребойлер; 6 – теплообмінник; 7 – охолоджувач біометану;
8 – сепаратор; 9 – розподільувач; 10 – котел; 11 – охолоджувач абсорбенту;
12 – конденсатор; 13 – уловлений CO₂; 14 – відвід рідини на дренаж; 15 – подача біометану до споживача; 16 – викид димових газів

У рідинному контурі абсорбент циркулює між трьома ключовими елементами – абсорбером 2, теплообмінником 3, та колоною 4. Зеленим кольором позначений потік насиченого абсорбенту, а синім – потік регенованого розчину. Абсорбент, насичений діоксидом вуглецю після абсорбера 2, проходить через теплообмінник 3 для підігріву, після чого потрапляє до верхньої частини колоны 4. Стікаючи вниз, абсорбент відновлює свою поглинальну здатність, і відбирається із нижньої частини колоны до теплообмінника 3 у якості гарячого теплоносія. Після теплообміну розчин подається до охолоджувача 11 перед повторним відпрацюванням у абсорбері 2. Теплоносії теплообмінника 6 забезпечує ребойлер 5 необхідною кількістю теплоти для регенерації абсорбенту у колоны 4. Пари розчину з колоны потрапляють до конденсатора 12, де абсорбент конденсується і подається назад у колону, а CO₂ у якості газу відбирається із системи у точці 13.

Для оцінки енергоспоживання необхідно врахувати кількість теплової енергії яку потрібно підвести до системи. Також необхідно врахувати елементи, де необхідно відвести теплоту. Такими елементами є конденсатор, та охолоджувачі біометану і регенованого розчину. Ребойлер являється основною енергетичною потребою системи. Для розрахунку кількості теплоти, яку необхідно підвести до ребойлеру, необхідно врахувати питому витрату теплоти на регенерацію абсорбенту [5], і кількість вуглецю, що поглинає десорбер.

Розрахунок необхідної кількості тепла на забезпечення процесу регенерації розраховувався за формулою:

$$Q_{\text{реб}} = m_{\text{CO}_2, \text{абс}} \cdot q_{\text{МЕАрег}}, \quad (1)$$

де $m_{\text{CO}_2, \text{абс}}$ – масова частка вуглецю, що десорбер поглинає за 1 годину, кг/год;
 $q_{\text{МЕАрег}}$ – питома витрата теплоти на регенерацію абсорбенту [5], кДж/кг_{co2}.

За результатами розрахунку кількість теплоти що необхідна для протікання процесу десорбції склала 5,4 кВт. Отже, для стабільної роботи ребойлеру і регенерації абсорбенту котел повинен забезпечити системі 5,4 кВт тепла.

Кількість теплоти що необхідно відвести відводити у охолоджуючих елементах системи розраховувалась наступним чином. Для оцінки необхідної кількості відведеної теплоти у охолоджувачі 11 використовувалась наступна формула:

$$Q_{\text{ох}} = m_l c_{pl} (t_{\text{оч1}} - t_{\text{оч2}}), \quad (2)$$

де m_l – масова витрата розчину, кг/год; c_{pl} – питома теплоємність розчину по середній температурі потоку, кДж/кгК; $t_{\text{оч1}}$ – температура розчину на вході до теплообмінника, °С; $t_{\text{оч2}}$ – температура розчину на виході із теплообмінника, °С.

За результатом розрахунку кількість теплоти що необхідно відвести у охолоджувачі 11 склала 2,27 кВт.

При розрахунку кількості теплоти, що необхідно відвести у конденсаторі, потрібно врахувати приховану теплоту конденсації рідини. Отже необхідно врахувати приховану теплоту пароутворення λ , кДж/кг, а також масову витрату конденсату. Значення розраховувалося за формулою:

$$Q_{\text{конд}} = \frac{m_{\text{конд}} \cdot \lambda}{3600}, \quad (3)$$

де $m_{\text{конд}}$ – масова витрата конденсату, кг/год.

Також враховується теплота, яка розраховується аналогічно формулі (1), за результатами розрахунку кількість теплоти що необхідно відвести від конденсатору склала 0,9 кВт. Аналогічно розраховувалась теплота охолоджувача 7, має місце конденсація парів води, при заданих вихідних даних результат розрахунку склав 0,27 кВт теплоти.

За результатами розрахунку для системи був встановлений котел 9 кВт, із ККД 85 %. Була проведена оцінка частки біометану що необхідна для забезпечення необхідною кількістю теплоти ребойлера, а також загальної частки біометану отриманого після уловлення CO₂. Для оцінки доцільності відбору газу на забезпечення власних потреб, була розрахована загальна кількість біометану і частка газу що необхідна для забезпечення необхідною кількістю теплоти ребойлера.

Розрахунок кількості біометану, яку необхідно спалити для забезпечення власних потреб системи проводився за формулою:

$$V_{G_{\text{реб}}} = \frac{Q_{\text{реб}}}{\eta \cdot Q_{\text{н}}^{\text{р}}}, \quad (4)$$

де $Q_{\text{реб}}$ – кількість теплоти необхідна для регенерації абсорбенту, кВт.

У результаті розрахунків, при витраті біогазу 8,8 нм³/год, загальна кількість отриманого біометану склала 6,19 нм³/год. Витрата на власні потреби склала 1,04 нм³/год.

Висновки. Підсумовуючи, в результаті розрахунків основних елементів схеми, кількість теплоти що необхідно відводити у охолоджувачах склала 3,44 кВт. Кількість теплоти що потрібно підводити для стабільної регенерації аміну склала 5,4 кВт, із яких 2,4 кВт поглинається під час реакції вивільнення CO₂. Відбір газу на власні потреби складає 16,8 % від загального газового потоку. З урахуванням розрахунків, після видалення CO₂ і забезпечення власних потреб системи, з 1 нм³/год біогазу отримаємо 0,59 нм³/год біометану.

Перелік посилань:

1. Jaesu Jang, Gwan Hong Min, Sung Chan Nam, Kibong Lee, Sunghoon Lee. Study of CO₂ absorption into monoethanolamine solution in a rotating packed bed. Journal of CO₂ Utilization, 2026, 105.
2. Mores P. L., Scenna N. J., Mussati S. F. Modeling and optimization of the solvent regeneration and CO₂ desorption process. Energy, 2012, Vol. 45, Issue 1, 1042–1058.
3. Getu A. M., Nigus G. H., Ababay K. W., Eshetu G. Recent Progress and Future Perspective of Biogas-Upgrading techniques. BioEnergy Research, 2025.
4. Ryckebosch E., Drouillon M., Vervaeren H. Techniques for transformation of biogas to biomethane. Biomass and Bioenergy, 2011, 35(5), 1633–1645.
5. Bui M. et al., Carbon capture and storage (CCS): the way forward. Energy and Environmental Science, 2018, 11, 1062–1176.

¹ Бакалаврант 3 курсу Мілейко Б. Д.

¹ Доц., к.т.н. Боженко М. Ф.

<https://scholar.google.com/citations?user=QItq4r8AAAAJ&hl=uk&oi=sra>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ ПРОМИСЛОВО-ОПАЛЮВАЛЬНОЇ КОТЕЛЬНОЇ ПРИ ВСТАНОВЛЕННІ УТИЛІЗАТОРІВ ТЕПЛОТИ ДИМОВИХ ГАЗІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Одним із джерел централізованого та помірно-централізованого теплопостачання житлових, громадських та промислових будівель в Україні є промислово-опалювальні котельні з водогрійними та паровими котлами типів КВ-ГМ та ДЕ відповідно, які характеризуються підвищеними температурами відхідних димових газів.

Зниження температури відхідних димових газів за котлами може бути досягнуто при встановленні за ними теплоутилізаційних установок (ТУ), що в цілому сприятиме підвищенню енергетичної ефективності котельень. Потоки утилізованої теплоти можуть бути корисно використані або в циклі котельні, або для нагрівання води зовнішніх споживачів. ТУ можуть експлуатуватися в режимах, коли від димових газів відводяться тільки потоки «явної» теплоти або і «явної» та «прихованої». Другий режим експлуатації з енергетичної точки зору є більш ефективним.

Аналіз останніх досліджень. Промислово-опалювальна пароводогрійна котельня, яка розташована у м. Києві, призначена для покриття навантажень на опалення, вентиляцію і гаряче водопостачання промислового підприємства і житлового сектору, а також технологічне парове навантаження підприємства. Розрахунковий температурний графік теплової мережі складає $(150 / 70) ^\circ\text{C}$, а водяна пара на технологію спрямовується з тиском 0,7 МПа. В результаті розрахунків теплової схеми були визначені витрати і параметри теплоносіїв за всіма потоками, у результаті для встановлення в котельні були обрані 2 водогрійні котли КВ-ГМ-6,5 і 2 парові котли ДЕ-6,5-14 ГМ. Температура відхідних димових газів за водогрійними котлами становить $t'_{\text{г.в}} = 153 ^\circ\text{C}$, за паровими $t'_{\text{г.п}} = 155 ^\circ\text{C}$ [1]. Для компенсації витікання води в теплових мережах та недо повернення конденсату від технологічних споживачів в котельні передбачена хімічна водопідготовка (ХВП). Сира вода перед ХВП витратою $\Sigma G_{\text{с.в}} = 6,1 \text{ кг/с}$ нагрівається в окремо встановленому пароводяному теплообміннику від $t'_{\text{с.в}} = 5 ^\circ\text{C}$ до $t''_{\text{с.в}} = 25 ^\circ\text{C}$. Хімічно підготовлена вода розділяється на два потоки: один з них після нагрівання в охолоднику продувальної води спрямовується у деаератор живильної води, другий після підігрівання в охолоднику деаерованої води, – у деаератор підживлювальної води.

Формулювання мети. Для підвищення енергетичної ефективності котельні пропонується для першої черги її модернізації встановити за одним з парових котлів поверхневий утилізатор-калорифер, який буде використаний для нагрівання сирої води перед ХВО.

Основна частина. Необхідна теплопродуктивність калориферної установки для нагрівання сирої води, кВт [2]:

$$Q_k = \sum G_{\text{с.в}} c_{\text{в}} (t''_{\text{с.в}} - t'_{\text{с.в}}), \quad (1)$$

де $c_{\text{в}}$ - теплоємність води, кДж/(кг·К).

Беремо $c_{\text{в}} = 4,19 \text{ кДж/(кг·К)}$, тоді величина $Q_k = 511,2 \text{ кВт}$.

Масова витрата сухих продуктів згорання на виході з котла, кг/с [2]:

$$I_r^c = \frac{B_k}{3600} G_r^c, \quad (2)$$

де B_k – витрата природного газу на спалювання в котлі, м³/год;

G_r^c – маса сухих продуктів згорання, кг/м³.

Для котла ДЕ-6,5-14ГМ величина $B_k = 489$ м³/кг [1], а для усередненого складу природного газу $G_r^c = 13,42$ кг/м³ [3], тоді $I_r^c = 1,82$ кг/с.

Для визначення режиму експлуатації калориферної установки за методикою [4] обчислюють умовну питому кількість відведеної від димових газів теплоти, кДж/кг

$$q'_{к.г} = \frac{Q_k}{I_r^c (t'_r)^{0,85}}. \quad (3)$$

Тоді при $q'_{к.г} = 3,86$ кДж/кг визначають температуру димових газів на виході з калориферної установки $t''_r = 40$ °С (режим експлуатації – «мокрый») та коефіцієнт байпасування $\theta_r = 0,23$ [3].

При виборі типу теплоутилізаційної установки орієнтуємося на біметалеві калорифери зі спіральним оребренням моделі КСк.

З урахуванням того, що на ТУ спрямовується витрата димових газів $L_k = L_r^c (1 - \theta_r)$, яка становитиме 1,4 кг/с, обираємо 5 калориферів КСк-3-9 та визначаємо дійсну масову швидкість димових газів у фронтальному перерізі ТУ $(\rho v)_r^d = 3,07$ кг/(с·м²). За таблицею технічних характеристик занотуємо дійсну площу теплопередавальної поверхні одного з них $F_{д1} = 23,4$ м² (загальна $\Sigma F_d = 117$ м²), площу живого перерізу для води $f_w = 0,00116$ м², і площу живого перерізу для проходження димових газів $f_{жс} = 0,189$ м². Всі калорифери в ТУ розміщені послідовно за напрямком руху димових газів ($N = 1$) і паралельно за напрямком руху потоку води ($n_k = 5$).

За рівнянням суцільності визначаємо швидкість руху води в трубках калориферів, м²

$$\omega_b = \frac{\Sigma G_{с.в}}{\rho_b f_w n_k}, \quad (4)$$

де ρ_b – густина води, кг/м³.

Беремо $\rho_b = 1000$ кг/м³, тоді $\omega_b = 1,05$ м/с.

Визначають коефіцієнт теплопередачі від димових газів до води при віднесенні теплового потоку до оребреної поверхні, Вт/(м²·К) [4]:

$$K_{op} = \frac{1}{(1/\alpha_{вн})\varphi + (1/\alpha_3)}, \quad (5)$$

де $\alpha_{вн}$ і α_3 – коефіцієнти тепловіддачі на внутрішніх та зовнішніх поверхнях трубок калорифера, Вт/(м²·К), відповідно;

φ – коефіцієнт оребрення зовнішніх поверхонь трубок калориферів, величина якого складає 16,48.

$$\alpha_{вн} = (3353,6 + 49,89\bar{t}_b - 0,105\bar{t}_b^2) \omega_b^{0,8}, \quad (6)$$

де $\bar{t}_b$ – середня температура води, що нагрівається, °С.

Тоді при $\bar{t}_b = 15$ °С величина $\alpha_{вн} = 4242$ Вт/(м²·К).

При визначенні α_3 використали безрозмірне рівняння, в якому враховували зрошення зовнішньої поверхні оребрених труб конденсатом з димових газів [4]:

$$Nu_r = 4,55 Re_r^{0,315} K_{зр}^{0,388} Pr_r^{2/3}, \quad (7)$$

де Nu_r , Re_r , $K_{зр}$, Pr_r – відповідно числа Нуссельта і Рейнольдса, критерії зрощення і Прандтля

$$Nu_r = \frac{\alpha_3 d_{32}}{\lambda_r}; \quad Re_r = \frac{v_r d_{32}}{\nu_r}; \quad K_{зр} = \frac{W d_{32}}{\mu_r},$$

де d_{32} – зовнішній діаметр алюмінієвих трубок, м, який дорівнює 0,018 м;

v_r – швидкість димових газів в живому перерізі калорифера, м/с;

W – густина зрошення зовнішньої поверхні оребрених труб, кг/(м²·с);

λ_r , ν_r , μ_r – відповідно теплопровідність [Вт/(м·К)], кінематична [м²/с] і динамічна в'язкість димових газів [кг/(м·с)].

За відповідними таблицями визначили фізичні властивості димових газів при середній температурі 97,5 °С; за методикою [4] – швидкість димових газів $v_r = 7,72$ м/с та густину зрошення $W = 0,000992$ кг/(м²·с) (при зміні вологовмісту димових газів від $d'_r = 0,13$ кг/кг с.г до $d''_r = 0,047$ кг/кг с.г), потім величини $Re_r = 6524$ і $K_{зр} = 0,88$, за формулою (7) число $Nu_r = 53,7$ і коефіцієнт тепловіддачі $\alpha_3 = 92,5$ Вт/(м²·К), а за формулою (5) – коефіцієнт теплопередачі $K_{ор} = 68$ Вт/(м²·К).

За відомою формулою визначили середній температурний напір для перехресної схеми руху теплоносіїв $\Delta t_{ср} = 70,3$ °С, а за рівнянням теплопередачі – необхідну площу теплопередавальної поверхні $F_T = 106,8$ м². Запас дійсної площі теплопередавальної поверхні по відношенню до необхідної складає близько 9 %, що практично відповідає рекомендованому значенню цієї величини.

Висновки. Охолодження продуктів згоряння природного газу в калориферній установці сприятиме зменшенню втрат потоків теплоти з димовими газами q_2 і, відповідно, збільшенню ККД котла. Кількість утилізованої теплоти димових газів для одного парового котла за опалювальний сезон з урахуванням розрахункової температури внутрішнього повітря в приміщеннях ($t_{вн} = 20$ °С), розрахункової температури зовнішнього повітря на опалення ($t_{р.о} = -22$ °С), середньої температури зовнішнього повітря за опалювальний період ($t_{ср.о} = -0,1$ °С), тривалості опалювального періоду ($n_o = 176$ діб), розраховується за відомою залежністю [2] і складе 3720 ГДж/сезон. Економічна ефективність утилізації теплоти при вартості одиниці теплоти за даними Київтеплоенерго 1 654,41 грн/Гкал (394,85 грн/ГДж) складе 1 468 840 грн/сезон.

Перелік посилань:

1. Алабовский О. М., Боженко М. Ф., Хоренченко Ю. В. Проективання котелень промислових підприємств: Курсове проектування з елементами САПР: навч. посіб. К: Вища школа. 1992. 207 с.
2. Боженко М. Ф., Сало В. П. Энергозбереження в теплопостачанні : навч. посіб. К. : НТУУ «КПІ». 2008. 268 с.
3. Боженко М. Ф. Методика вибору поверхневих утилізаторів теплоти димових газів в котельнях. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Т 36 (75). № 1 (1). 2025. С.107 – 113. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.1.1/16>.
4. Боженко М. Ф., Камишний Б. М. Методика визначення енергетичної ефективності утилізації теплоти димових газів котелень. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Т 35 (74). № 1 (2). 2024. С.34-39. <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.1.2/06>.

¹ Аспірант 1 курсу Алтин В. І.¹ Доц., к.т.н. Соломаха А. С.<https://scholar.google.com/citations?user=ZqcAQ-oAAAAJ&hl=uk&oi=sra>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОНТАКТНИЙ ЗВОЛОЖУВАЧ ПОВІТРЯ З ВИКОРИСТАННЯМ ЕРЛІФТНОГО ЕФЕКТУ

Постановка проблеми та її актуальність. Для різних технічних застосувань існує необхідність зволоження повітря. Існує два основних способи збільшити кількість вологи в повітряному потоці: випарне зволоження повітря та подача вологи в потік повітря у вигляді водяної пари. Впорскування пари вимагає суттєвих енергетичних затрат на випаровування рідини і застосовується в основному при реалізації прецензійного (точного) підтримання заданої вологості повітря. В усіх інших випадках застосовується випарне зволоження, коли потік повітря контактує із водою в рідкій фазі. Теплообмінники для зволоження повітря можуть бути форсуночного типу, з насадкою, на яку подається рідина, барботажного типу та інші [1].

Пропускання повітря через шар рідини (барботаж) дозволяє відносно просто отримати насичене повітря з відповідною температурою мокрого термометра. При цьому реалізується максимально можливий контакт між повітрям та водою, що призводить до інтенсивного теплообміну між рідиною та газом. Це дозволяє реалізувати процес в малому об'ємі [2-3]. Основним недоліком барботажного зволожувача є високе споживання енергії на привод повітродувки, оскільки пропускання повітря через шар рідини супроводжується високими гідравлічними втратами в порівнянні з іншими способами зволоження повітря. Пошук шляхів зменшення гідравлічних втрат при барботуванні повітря через воду є актуальним завданням та дозволить суттєво підвищити загальну ефективність системи.



Рисунок 1 – Контактна камера зволоження повітря ерліфтного типу:
а – принципова схема; б – зовнішній вигляд на експериментальному стенді

Аналіз останніх досліджень. Для систем з невеликою продуктивністю по вологому повітрю в якості зволожувача можна використати контактну камеру, яка побудована на основі ерліфтного насосу (див. рис. 1,а) [4-6]. Повітря під надлишковим тиском подається через шар рідини, який знаходиться в нижній зоні контактної камери. Вдаряючись об воду, потік газу розбивається на велику кількість повітряних бульбашок і, оскільки повітря має меншу густину, ніж рідина, то воно піднімається вгору по центральній трубі. В результаті виникає емульговане середовище з надзвичайно розвиненою поверхнею теплообміну між повітрям та водою. Оскільки, питома вага емульсії менша за питому вагу води, що її оточує, а тиск газового потоку більший за атмосферний, то емульгований шар води піднімається вище рівня води, який підтримується в резервуарі. Рух води вгору разом з повітрям з подальшим переливанням через край контактної камери називається ерліфтом. Для інтенсифікації процесу можливий попередній нагрів теплоносіїв (повітря, води або їх обох).

Формулювання мети. Метою дослідження є експериментальна перевірка роботи ерліфтною камери в режимі зволоження повітря. Для цього було виготовлено лабораторний зразок камери та змонтовано її на відповідному експериментальному стенді (див. рис.1,б).

Основна частина. Ерліфтні системи – це відносно прості пристрої, що працюють зі стисненим повітрям. Їхня робота заснована на різниці тисків між входом та виходом з контактної камери, а також на використанні різниці густин емульгованої рідини з повітряними бульбашками та чистої рідини. Домінуючими силами, що діють на водоповітряну суміш в ерліфтній камері, є гравітаційні, інерційні та сили плавучості. Сила плавучості діє як підйомна сила, тоді як сила тяжіння протистоїть їй. Велика кількість газових бульбашок діє на воду як поршень. Чим більшою є початкова швидкість газового потоку на вході у воду, тим більше утворюється бульбашок і тим більшою стає міжфазна поверхня, через яку відбувається тепло- та масообмін. Якщо рушійні сили достатньо великі, рідина піднімається вздовж труби та викидається на рівні, вищому за рівень занурення. В іншому випадку рідина піднімається лише до рівня, де ці діючі сили будуть врівноважені. Ерліфтна контактна камера працює задовільно, якщо виконується умова [6]

$$P_6 = P_e + P_{тр} + P_{вих},$$

де P_6 – тиск газових бульбашок у нижньому шарі ерліфтною камери, мм вод. ст.; $P_в$ – гідростатичний тиск емульгованого шару води, мм вод.ст.; $P_{тр}$ – втрати на тертя під час руху емульсії, мм вод. ст.; $P_{вих}$ – необхідний запас тиску на виході з ерліфтною зони, мм вод. ст.

В залежності від співвідношенням швидкостей фаз, об'ємної витрати газу, фізичних властивостей рідини, а також умов підведення повітря та геометричних параметрів контактної камери в ерліфтній трубі можуть виникати різні режими течії двофазного потоку. Уолліс виділяє 5 основних режимів течії у вертикальній трубі [7], які змінюються від бульбашкового до емульсійного із зростанням швидкості газу. А саме: 1) Бульбашковий режим: рідина перебуває у вигляді суцільної фази, а газ розподілений у вигляді бульбашок (низька швидкість газу); 2) Снарядний (пробковий) режим: бульбашки зливаються у великі снаряди, що займають майже весь переріз труби, чергуючись із проміжками суцільної рідини; 3) Плівковий (хвильовий) режим: рідина рухається переважно по стінках труби у вигляді плівки, а газ по центру труби; 4) Дисперсно-кільцевий режим: висока швидкість газу зриває плівку рідини, перетворюючи її на краплі, які дисперговані в ядрі потоку, а тонка плівка залишається на стінках; 5) Емульсійний режим: інтенсивне перемішування, при якому рідина диспергована в газі (характерно для дуже високих швидкостей).

Застосування різних режимів течії досліджувалися для роботи ерліфтних насосів [4-5]. Вже починаючи з бульбашкового режиму двофазний потік повітря та води легший за однофазну воду, і з'являється ефект ерліфта. Сила інерції введених бульбашок повітря витісняє навколишню воду та піднімає її на верхній рівень труби. Проте, дослідження ерліфтних насосів показали, що величина сили інерції бульбашок недостатньо висока, щоб підняти воду на значну висоту. Було зроблено висновок, що бульбашковий потік недоцільно використовувати для процесів перекачування рідини, він можливий лише за високих коефіцієнтів занурення в ерліфтному насосі [4].

При переході до снарядного режиму великі бульбашки повітря діють як пневматичні поршні, які штовхають воду вгору вздовж висхідної труби. Повітряна бульбашка (снаряд) не тільки штовхає воду, що знаходиться спереду, але й тягне воду за собою завдяки підсмоктуванню, що створюється швидким рухом бульбашок. З точки зору перекачування рідини такий режим є оптимальним [4].

При переході до кільцевого режиму швидкість повітря стає доволі високою, оскільки саме вона безпосередньо пов'язана з напруженням зсуву на межі розділу повітря-вода та змушує воду рухатися вгору. Висока швидкість повітря необхідна для створення достатньої сили тертя, щоб плівка рідини рухалася вгору. В цьому випадку ерліфтний насос діє з низькою продуктивністю, оскільки витрата води невисока.

Таким чином, проведений аналіз показав, що для роботи ерліфтного насоса оптимальним є снарядний режим роботи. В той же час, реалізація процесу в ерліфтній камері з метою зволоження повітря залишається майже невивченою, невідомі оптимальні режими роботи. Це потребує додаткового дослідження та аналізу. Проведені експериментальні дослідження на розробленому стенді з різними початковими температурами повітря показали високу ефективність розробленого зволожувача з точки зору масообмінних процесів: в усіх проведених експериментах повітря на виході із зволожувача мало температуру близьку до температури мокрого термометра. На даний момент відбувається налаштування вимірювального обладнання для проведення гідравлічних досліджень.

Висновки. Ерліфтна контактна камера має певні особливості в порівнянні із простим барботажем, які потребують окремого дослідження з метою оптимізації роботи зволожувача. Зокрема, структура емульгованого шару неоднорідна і залежить від гідродинаміки двофазного потоку; швидкість руху газових бульбашок (газової фази) і води всередині емульгованого шару перебуває між собою у певній залежності; температура повітря на виході з ерліфтною камери перебуває у прямій залежності від температури нагрітої води. Ці питання важко піддаються теоретичному аналізу і тому оптимальним варіантом є проведення експериментального дослідження, для чого й було змонтовано стенд із спеціально виготовленою для цього камерою зволоження. В подальшому планується отримати залежності перепаду тиску від режим руху двофазного середовища з метою визначення оптимальної витрати повітря через шар рідини для розробленої ерліфтною камери.

Перелік посилань:

1. Липа А. І. Кондиціонування повітря. Основи теорії. Сучасні технології обробки повітря, 2010, 607 с.
2. Fatemeh Pourghorban, Zohreh Rahimi-Ahar, Mohammad Sadegh Hatamipour. Performance evaluation of bubble column humidifier using various air distributors in a humidification-dehumidification desalination plant. Applied Thermal Engineering, 2023, 227, 120392. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2023.120392>
3. Khan M, Antar MA, Khalifa AE, Zubair SM. Experimental investigation of air heated bubble column humidification dehumidification desalination system. Int. J Energy Res. 2020, 1–19, 19. <https://doi.org/10.1002/er.5951>
4. Christophe Vial, Souhila Poncin, Gabriel Wild, Noel Midoux. A simple method for regime identification and flow characterisation in bubble columns and airlift reactors. Midoux Chemical Engineering and Processing, 2001, 40, 135–151. [https://doi.org/10.1016/S0255-2701\(00\)00133-1](https://doi.org/10.1016/S0255-2701(00)00133-1)
5. Rashal Abed, Mohamed M. Hussein, Wael H. Ahmed, Sherif Abdou. Two-Phase Flow Mass Transfer Analysis of Airlift Pump for Aquaculture Applications. Fluids, 2021, 6(6), 226 <https://doi.org/10.3390/fluids6060226>
6. Hanafizadeh P., Ghorbani B. Review study on airlift pumping systems. Multiphase Science & Technology, 2012, 24 (4), 323–362. <https://doi.org/10.1615/MultScienTechn.v24.i4.30>
7. Wallis G. One-dimensional two-phase flow, 1969, 438 p.

СЕКЦІЯ № 6

**Енергетичний
менеджмент
та інжинірінг**

¹ Аспірант 1 курсу Бабіч Т. М.¹ Ст.викл., к.т.н. Буяк Н. А.<https://scholar.google.com/citations?user=B77eOhgAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДОЛОГІЧНІ ПІДХОДИ ДО АНАЛІЗУ ЖИТТЄВОГО ЦИКЛУ (LCA) СИСТЕМ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ ТА ЕНЕРГОПОСТАЧАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Процеси декарбонізації енергетики та підвищення енергоефективності вимагають перегляду підходів до оцінки екологічного впливу систем теплопостачання й енергопостачання. Зменшення експлуатаційних викидів супроводжується зростанням ролі приєднаного вуглецю, пов'язаного з інфраструктурною та технологічною складовою. Тому важливо застосовувати методи системного аналізу для оцінки впливу енергетичних систем на довкілля протягом усього життєвого циклу.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження підтверджують доцільність аналізу життєвого циклу (LCA) як інструменту екологічної оцінки енергетичних і теплотехнічних систем. Роботи зосереджені на визначенні меж системи, виборі функціональної одиниці, методах алокації потоків та інтерпретації результатів. Окремий напрям – сценарний і динамічний LCA. Сценарний підхід моделює розвиток енергосистем з урахуванням змін у балансі, технологіях і політиках декарбонізації. Динамічний LCA враховує часові аспекти роботи систем і строки служби обладнання. Адаптація цих підходів до національних енергосистем залишається недостатньо дослідженою.

Формулювання мети. Метою роботи є систематизація та аналіз методологічних підходів до застосування аналізу життєвого циклу в галузі теплопостачання та енергопостачання з акцентом на оцінку приєднаного вуглецю та визначення ключових методичних чинників, що впливають на достовірність результатів LCA.

Основна частина. Методологія аналізу життєвого циклу базується на системному підході до оцінки екологічного впливу технічних систем протягом усього їх існування – від видобутку сировини до утилізації. Згідно зі стандартами [1] та [2] LCA включає чотири взаємопов'язані етапи: визначення мети й області дослідження, інвентаризацію, оцінку екологічних впливів та інтерпретацію результатів. На рис. 1 показано ці етапи – визначення мети та обсягу, інвентаризаційний аналіз, оцінку впливу та інтерпретацію – із підкресленням їх взаємозв'язку й ітеративного характеру.



Рисунок 1 – Структура аналізу життєвого циклу відповідно до стандартів ISO 14040 та ISO 14044

Для систем теплопостачання ключовим є визначення меж системи та вибір функціональної одиниці – зазвичай це кількість корисної теплової енергії, доставленої

споживачу. Тривалість життєвого циклу, включно з терміном служби обладнання та частотою його заміни, сильно впливає на вуглецевий слід та співвідношення експлуатаційних і приєднаних викидів.

Важливим етапом LCA є алокація – розподіл енергії та матеріалів між різними продуктами або функціями системи. Метод розподілу (за масою, енергією, економічною вартістю або через розширення системи) значно впливає на результати та потребує обґрунтування.

Особливу увагу приділяють оцінці приєданого вуглецю (embodied carbon) – викидів, що виникають під час виробництва, транспортування, монтажу, обслуговування та утилізації теплотехнічного обладнання. Основну частку цього вуглецю дають теплогенератори, трубопроводи, теплообмінники та допоміжне обладнання.



Рисунок 2 – Співвідношення експлуатаційних і приєднаних викидів протягом життєвого циклу енергетичної системи за EN 15978:2011 [3]

Графік на рис. 2 показує залежність між потенціалом зменшення вуглецевого сліду та точністю оцінки на різних стадіях життєвого циклу. Найбільший ефект дають рішення на ранніх етапах проєктування, хоча точність тоді низька. На пізніших стадіях точність зростає, але потенціал скорочення викидів зменшується.

За методологією [3] життєвий цикл поділяється на модулі A–D, що забезпечує прозору структурування внеску стадій. Концепція whole-life carbon дозволяє оцінювати вплив теплотехнічних систем з урахуванням поточних і довгострокових наслідків.

Подальший розвиток LCA пов'язаний із сценарним і динамічним підходами, які враховують зміну паливно-енергетичного балансу, технологій і трансформацію систем у часі, важливу для стратегічного планування декарбонізації [4, 5]. Рис. 3 ілюструє концепцію сценарного та динамічного аналізу життєвого циклу (LCA) для енергетичних систем, де поєднано стандартну структуру ISO LCA (чорні блоки) з додатковими динамічними частинами (сині блоки). Стандартні етапи включають визначення мети та обсягу, інвентаризаційний аналіз, оцінку впливу та інтерпретацію. До них додаються альтернативні та потенційні динамічні компоненти, такі як динамічний обсяг, інвентаризація процесів, системи, характеристики та динамічне зважування, що дозволяють враховувати часові зміни в паливно-енергетичному балансі, технологіях і режимах роботи систем [4, 5]. Це розширення робить аналіз більш гнучким і точним для моделювання різних сценаріїв розвитку, що є ключовим для стратегічного планування декарбонізації та сталого розвитку енергетичних систем у довгостроковій перспективі. Методологічні рішення щодо меж системи, вибору функціональної одиниці, методів алокації та часової параметризації визначають результати LCA і є окремим об'єктом досліджень у теплотехніці. LCA

застосовують для аналізу джерел енергії – від біоенергетики до традиційних і відновлюваних систем, а також у утепленні будівель [6, 7].

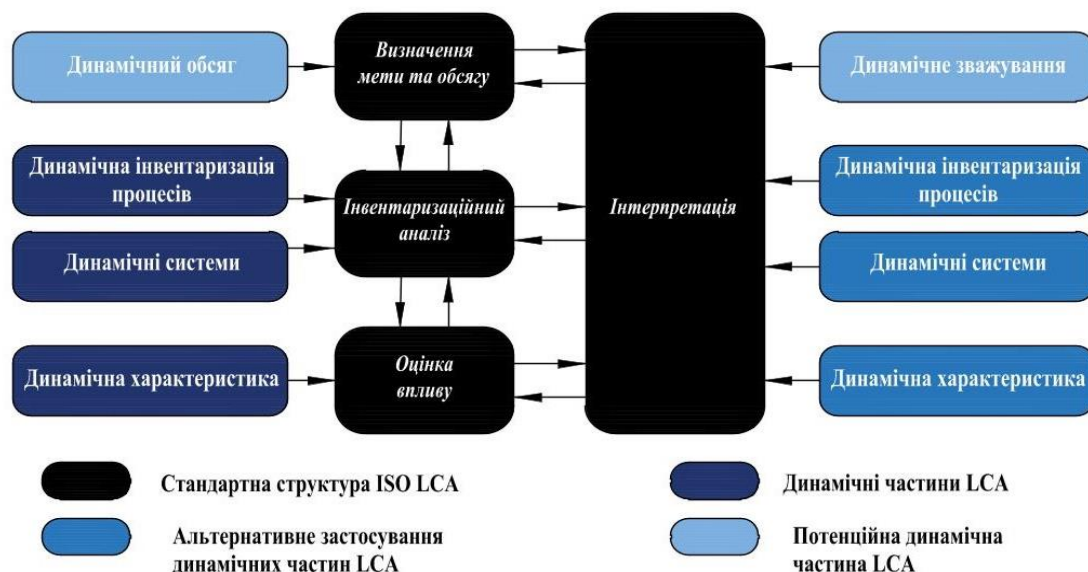


Рисунок 3 – Концепція сценарного та динамічного LCA для енергетичних систем

В Україні методологія LCA поступово входить у наукову, освітню та нормативну практику, хоча її застосування обмежене. Стандарти ISO [1, 2] формують основу для оцінки життєвого циклу продукції та процесів, зокрема у виробництві та споживанні енергії. Розвиток методології стримує дефіцит даних і відсутність платформ, водночас вона використовується для оцінки вуглецевого сліду та ресурсної інтенсивності. Сценарний і динамічний підходи та локальні бази даних дозволяють точніше оцінювати вуглецевий слід і прогнозувати ефект енергоефективних рішень, роблячи LCA ключовим інструментом сталого розвитку та декарбонізації енергетики в Україні.

Висновки. LCA – ефективний інструмент оцінки екологічного впливу систем теплопостачання. Достовірність результатів залежить від коректного вибору меж, функціональної одиниці та методів алокації. Методологія сприяє розвитку стратегій декарбонізації та сталого розвитку енергетики, створюючи перспективи для її більш широкого та ефективного впровадження в Україні в майбутньому.

Перелік посилань:

1. ISO 14040:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Principles and framework. Official edition. Geneva, 2006.
2. ISO 14044:2006. Environmental management – Life cycle assessment – Requirements and guidelines. Geneva : International Organization for Standardization, 2006.
3. EN 15978:2011. Sustainability of construction works – Assessment of environmental performance of buildings – Calculation method. Official edition. 2011. 60 p.
4. Nieuwlaar E. Life Cycle Assessment and Energy Systems. Reference Module in Earth Systems and Environmental Sciences. 2013. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-409548-9.01334-8> (date of access: 05.03.2026).
5. Comparative scenario-based LCA of renewable energy technologies focused on the end-of-life evaluation / F. Rossi et al. Journal of Cleaner Production. 2023. P. 136931. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.136931> (date of access: 05.03.2026).
6. Materials and service lives alterations impacts on reducing the whole life embodied carbon of buildings: A case study of a student accommodation development in Ireland / P. Moran et al. Case Studies in Construction Materials. 2025. Vol. 22. P. e04514. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2025.e04514> (date of access: 05.03.2026).
7. Life-cycle assessment of district heating systems / M. Ristimäki et al. Energy Policy. 2013. Vol. 63, no. 15. P. 168–179.

¹ Магістрант 1 курсу Корчма В. О.

¹ Ст.викл., к.т.н. Шевченко О. М.

<https://scholar.google.com/citations?user=7gLSQIwAAAAJ&hl=ru>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ ІНФОРМАЦІЙНИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ КОМПЛЕКСНОГО ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ БУДІВЕЛЬ ЗАКЛАДІВ ОСВІТИ

Постановка проблеми та її актуальність. Загальновідомо, що частка будівельного фонду у балансі світового енерговикористання складає близько сорока відсотків та третини глобальних викидів діоксиду вуглецю. В той же час будівлі є невід'ємною частиною нашого життя та створені для забезпечення комфортних умов перебування в них. Для забезпечення балансу між комфортом для користувачів та впливом будівель на довкілля необхідно застосовувати сучасні інформаційні технології. Використання комп'ютерного моделювання дозволяє не лише діагностувати поточний стан інженерних систем, а й прогнозувати технічну ефективність та фінансову доцільність впровадження відновлюваних джерел енергії для підвищення енергетичної стійкості закладів освіти.

Аналіз останніх досліджень. Проведення енергетичного аудиту будівлі є стандартизованою процедурою. Сучасні дослідження ефективності інженерних рішень дедалі частіше спираються на використання спеціалізованого комп'ютерного програмного забезпечення. Програми для енергетичного моделювання, такі як системи оцінки чистої енергії RETScreen, симулятори сонячних станцій PVSol та комплекси для проектування геотермальних систем GeoT*SOL, дозволяють виконувати динамічну симуляцію роботи інженерних мереж, враховуючи кліматичні особливості регіону [1], графіки навантажень, характеристики обладнання та терміни окупності капіталовкладень.

Формулювання мети. Метою роботи є моделювання технічно та економічно обґрунтованих рішень енергоефективної модернізації будівлі закладу освіти з застосуванням комплексу інформаційних технологій.

Основна частина. Об'єктом енергетичного обстеження є економіко-правовий ліцей №1 за адресою: м. Чорноморськ, вул. Шкільна, 8 (рис. 1).



Рисунок 1 – Економіко-правовий ліцей № 1 в м. Чорноморськ

На даний момент в ліцеї навчаються та працюють 670 осіб. Режим роботи закладу освіти з понеділка по п'ятницю з 8:00 до 21:30. Загальна площа об'єкту складає 3537,1 м², а загальний об'єм – 15951,0 м³. Споруда налічує три поверхи, розрахункова висота одного

поверху становить 3,29 м. Наявний роздільний підвал, неопалювальне горище. Споруда була прийнята в експлуатацію у 1963 році. Система ГВП в закладі відсутня. Вентиляція приміщень будівлі припливно-витяжна з природним спонуканням. Видалення повітря здійснюється через вентиляційні канали. Для забезпечення належного повітрообміну приміщення харчоблоку обладнані механічною системою припливно-витяжної вентиляції.

Комплексне комп'ютерне моделювання складалося з трьох незалежних етапів. На першому етапі в програмному середовищі RETScreen Expert [3] було сформовано базову цифрову модель будівлі та проведено фінансово-економічний аналіз. Розраховано загальне теплоспоживання, яке становить $\approx 353 \text{ МВт}\cdot\text{год/рік}$. У рамках цифрової моделі було запропоновано комплекс заходів: утеплення зовнішніх стін та даху мінеральною ватою, модернізація індивідуального теплового пункту та встановлення припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією тепла. Моделювання фінансових показників показало, що капітальні витрати на впровадження вказаних заходів для досліджуваного об'єкту становитимуть 386 474 євро. При цьому розрахунковий простий термін окупності проекту складе ≈ 19 років, що є прийнятним показником для масштабних інфраструктурних об'єктів муніципальної власності.

На другому етапі у середовищі для моделювання фотоелектричних систем PVSol [4] було розроблено тривимірну комп'ютерну модель будівлі для оцінки потенціалу сонячної генерації (рис. 2).

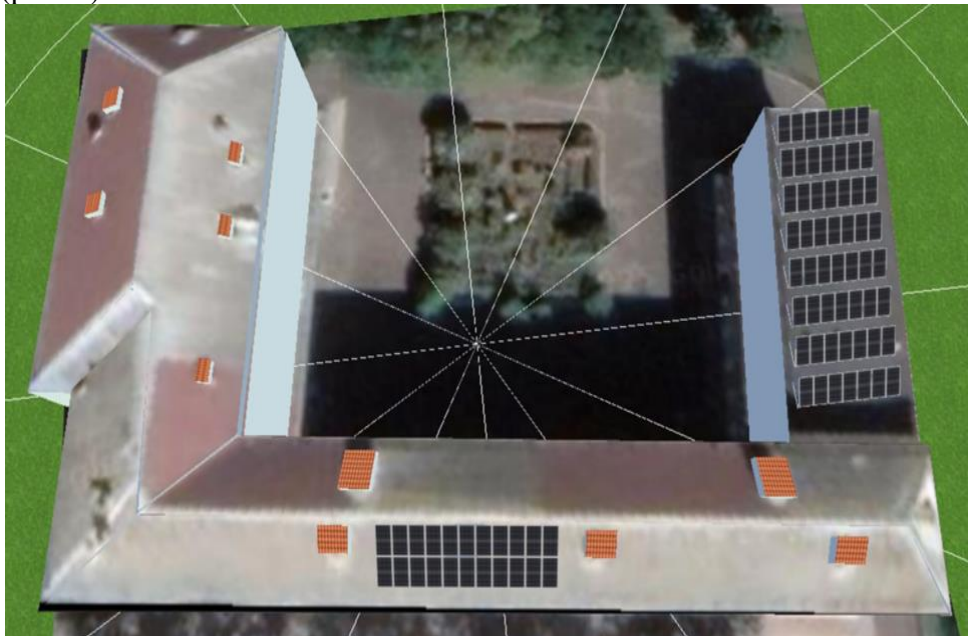


Рисунок 2– Загальний вигляд розміщення сонячних панелей

Програмний алгоритм оптимізував розміщення 78 сонячних модулів по 450 Вт (56 – на плоскому даху спортзали, 22 – на скатному під кутом 30°). Результати симуляції підтвердили генерацію 39 738 кВт·год/рік. Оскільки максимум виробництва припадає на літній період, передбачено роботу системи паралельно з централізованою електромережею: літні надлишки енергії експортуватимуться в мережу для компенсації зимового споживання. Такий перерозподіл дозволить забезпечити загальний річний енергетичний баланс ліцею без необхідності встановлення високовартісних акумуляторних батарей.

На третьому етапі за допомогою спеціалізованого програмного комплексу для моделювання теплових насосів GeoT*SOL [5] проведено порівняльний аналіз систем теплопостачання. У програмному середовищі GeoT*SOL було порівняно систему типу повітря-вода та геотермальну систему типу ґрунт-вода. Основні результати моделювання наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Енергоспоживання ОЕС за різних умов її роботи

Показник	Тепловий насос типу повітря-вода	Тепловий насос типу ґрунт-вода
Вироблена тепла енергія тепловим насосом, кВт·год/рік	201 818	296 624
Загальна спожита електроенергія системою, кВт·год/рік	202 235	125 148
Сезонний коефіцієнт ефективності теплового насоса (COP)	3,73	4,13
Сезонний коефіцієнт ефективності всієї системи (COP) (з урахуванням додаткового електронагрівача)	1,73	2,81
Частка покриття теплової потреби тепловим насосом, %	58	85
Частка прямого електричного догріву системою, %	42	15

Симуляція роботи повітряного теплового насоса продемонструвала його залежність від умов місцевого клімату: при зниженні температури повітря система покриває лише 58 % річної потреби у теплі. Решту 42 % потреби в тепловій енергії забезпечує електричний нагрівач прямої дії, через що загальний COP системи складає 1,73. Натомість тепловий насос ґрунт-вода забезпечує стабільне покриття 85 % загального навантаження з COP насоса на рівні 4,13 та загальним COP системи – 2,81.

Висновки. В роботі успішно проведено комплексне комп'ютерне моделювання будівлі економіко-правового ліцею №1 м. Чорноморськ. Застосування трьох незалежних програмних комплексів дозволило не лише розрахувати технічні параметри, але й підтвердити фінансову доцільність проекту зі строком окупності у дев'ятнадцять років. Математично доведено, що для комплексної модернізації найбільш доцільним є впровадження геотермального теплового насоса типу ґрунт-вода разом із сонячною електростанцією. Використання сучасного програмного забезпечення є критично необхідним інструментом в системі муніципального енергетичного планування територіальних громад.

Перелік посилань:

1. Будівельна кліматологія : ДСТУ-Н Б В.1.1–27:2010. Київ : Мінрегіонбуд України, 2011. 123 с.
2. Теплова ізоляція будівель : ДБН В.2.6–31:2016. Київ : Мінрегіон України, 2016. 33 с.
3. RETScreen Clean Energy Management Software [Електронний ресурс] / Natural Resources Canada. URL: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/tools-applications/retscreen> (дата звернення: 09.03.2026).
4. PV*SOL – Design and simulation of photovoltaics systems [Електронний ресурс] / Valentin Software GmbH. URL: <https://valentin-software.com/en/products/pvsol/> (дата звернення: 09.03.2026).
5. GeoT*SOL – Design and simulation of heat pump systems [Електронний ресурс] / Valentin Software GmbH. URL: <https://valentin-software.com/en/products/geotsol/> (дата звернення: 09.03.2026).

¹ Аспірант 1 курсу Куран Ю. Р.

¹ Проф., д.т.н. Дешко В. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГРАМНІ ЗАСОБИ ЕНЕРГЕТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕНЕРГОСИСТЕМ ПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВ: HOMER PRO, TRNSYS, TIMES TA ENERGYPLAN

Постановка проблеми та її актуальність. Чорна металургія традиційно належить до базових галузей економіки України. За підсумками 2024 року внесок металургійного сектору у ВВП становив близько 7,2 %, а частка чорних металів у структурі експорту товарів – 15,4 % [1]. У 2025 році виробництво сталевих продукції досягло 6,52 млн т, а внутрішнє споживання зросло на 21,7 % порівняно з 2024 роком [2]. За міжнародними оцінками, сталеливарний сектор забезпечує близько 20 % загального енергоспоживання промисловості та до 8 % кінцевого енергоспоживання економіки [5]. До 2022 року металургійні підприємства України формували близько 23 % промислового споживання електроенергії [6]. Висока частка паливної складової, складна міжгалузева структура енергетичних потоків та значна роль галузі у промисловому виробництві обумовлюють необхідність застосування спеціалізованих програмних засобів енергетичного моделювання для аналізу сценаріїв розвитку чорної металургії та її впливу на енергетичний баланс України.

Аналіз останніх досліджень. Питання енергоємності продукції чорної металургії та методичні підходи до її визначення розглядаються у роботах Куца Г.О. та Тесленка О.І. [3, 4], де обґрунтовано доцільність багаторівневого підходу, що охоплює пряму технологічну, повну та інтегральну енергоємність. Показано, що повна технологічна енергоємність продукції чорної металургії істотно перевищує показники прямого енергоспоживання з урахуванням виробництва коксу, агломерату, окатишів та транспортування. У міжнародній науковій практиці для аналізу та оптимізації енергосистем промислових підприємств широко застосовуються програмні комплекси різних класів. Зокрема, HOMER Pro активно використовується для техніко-економічного аналізу мікромереж [7], TRNSYS – для динамічного моделювання теплових систем [9, 10], TIMES – для довгострокової оптимізації енергосистем з урахуванням декарбонізації [13, 14], а EnergyPLAN – для аналізу балансів на національному та регіональному рівнях. Порівняльний аналіз можливостей цих інструментів стосовно задач металургійних підприємств у вітчизняній літературі представлений недостатньо.

Формулювання мети. Метою роботи є порівняльна характеристика провідних програмних засобів енергетичного моделювання – HOMER Pro, TRNSYS, TIMES та EnergyPLAN – з точки зору їх методологічних підходів, функціональних можливостей та придатності для аналізу енергосистем підприємств чорної металургії України.

Основна частина. HOMER Pro (Hybrid Optimization of Multiple Energy Resources) – програмний комплекс компанії HOMER Energy (UL Solutions, США) для техніко-економічного моделювання та оптимізації енергетичних систем із розподіленою генерацією. Базовим принципом є розрахунок погодинного балансу енергії протягом року (8 760 годин) із подальшою оптимізацією конфігурації за критерієм мінімальної чистої приведеної вартості (NPC). Програма виконує аналіз чутливості до зміни тарифів, вартості палива та капітальних витрат [7, 8]. Підхід до теплопостачання є спрощеним: відсутнє гідравлічне моделювання теплових мереж, а модель СНР працює на фіксованих співвідношеннях потужності [8]. HOMER Pro є ефективним для техніко-економічного

порівняння варіантів енергопостачання промислових об'єктів з відновлюваними джерелами та накопичувачами. Ліцензія є строковою (зазвичай 1 рік); доступна академічна версія.

TRNSYS (TRaNsient SYStems Simulation) – програмний комплекс для детального динамічного моделювання, розроблений у 1970-х роках у Лабораторії сонячної енергії Університету Вісконсина–Медисон, США (поточна версія – 18.05.0001, 2023). На відміну від балансних методів, TRNSYS реалізує покроковий у часі чисельний розв'язок математичних моделей фізичних процесів у кожному компоненті системи, що дозволяє аналізувати перехідні режими та накопичення тепла [9, 10]. Стандартна бібліотека містить близько 150 компонентів: котли, теплові насоси, ФЕ-модулі, СНР-установки, теплообмінники, багатозонна модель будівлі (Type 56 / TRNBuild). Програма є еталонним інструментом для сертифікації сонячних систем за стандартами SRCC та ENV 12977-2, відповідає вимогам ASHRAE 140 і ASHRAE 90.1. Для оптимізаційних задач інтегрується з GenOpt, MATLAB, Python [11, 12]. Ліцензія є безстроковою.

TIMES (The Integrated MARKAL-EFOM System) – генератор оптимізаційних моделей, розроблений у рамках програми IEA ETSAP (консорціум понад 20 країн). Поточна версія – v4.8.1 (2024); вихідний код відкритий (GPL-3.0, GitHub). TIMES мінімізує сумарну дисконтовану вартість енергетичної системи за весь горизонт моделювання (до 2100 р.) при виконанні балансових обмежень і заданих цільових показників (частка ВДЕ, рівень викидів CO₂) [13, 14]. Архітектура побудована навколо Референсної енергетичної системи (RES). Програма підтримує гнучку часову деталізацію (12–288 зрізів на рік), багаторегіональне моделювання та розрахунок граничних витрат на скорочення викидів (MAC). В Україні використовується ІЕП НАН України у вигляді моделі TIMES-Ukraine (близько 2 050 технологій). Для роботи необхідне комерційне середовище GAMS та інтерфейс VEDA2.0 (або безкоштовна альтернатива xl2times).

EnergyPLAN (Advanced Energy System Analysis Computer Model) – програмне забезпечення для симуляції енергетичних систем на рівні країни або регіону, розроблене у 1999 році під керівництвом проф. Г. Лунда в Університеті Ольборга, Данія (поточна версія – 16.3, 2024). Програма реалізує детерміновану модель «вхід–вихід»: розрахунок енергетичних і матеріальних балансів для всіх секторів (електроенергетика, теплопостачання, промисловість, транспорт, Power-to-X) у кожній з 8 760 годин року. EnergyPLAN надає вибір між стратегіями диспетчеризації: технічна та ринкова оптимізація. Розрахунок одного річного сценарію займає кілька секунд. Програма поширюється як безкоштовне програмне забезпечення і використовується у понад 80 країнах; на її основі виконано сотні рецензованих наукових публікацій. Для автоматизованого пошуку оптимальних конфігурацій інтегрується з EPLANopt або MATLAB Toolbox for EnergyPLAN.

Висновки. Проведений аналіз показує, що розглянуті програмні засоби є взаємодоповнювальними інструментами: HOMER Pro – для техніко-економічної оцінки варіантів мікромережі та гібридних систем енергопостачання; TRNSYS – для детального динамічного моделювання теплових процесів і систем будівлі; TIMES – для довгострокової оптимізації конфігурації енергосистеми з урахуванням декарбонізації; EnergyPLAN – для аналізу міжсекторних енергетичних балансів на рівні регіону або країни. Для комплексного дослідження енергосистем підприємств чорної металургії доцільним є поєднання підходів: TIMES – на етапі стратегічної оптимізації конфігурації; TRNSYS або спеціалізовані симулятори теплових мереж – на етапі детального моделювання обраного варіанту.

Перелік посилань.

1. Economic impact of iron & steel industry of Ukraine 2024. GMK Center. 2025. URL: https://gmk.center/wp-content/uploads/2025/04/eng_2025_Econ_Steel-impact.pdf.
2. Consumption of steel products in Ukraine in 2025 increased by 21.7% y/y. GMK Center. 2026. URL: <https://gmk.center/en/news/consumption-of-steel-products-in-ukraine-in-2025-increased-by-21-7-y-y/>.

3. Куц Г. О., Тесленко О. І. Доповнення методичних положень визначення повної енергоємності продукції промислових виробництв. *Вчені записки ТНУ ім. В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. 2022. Т. 33(72), № 5. С. 244–250.
4. Куц Г. О., Тесленко О. І. Прогнозна оцінка повної технологічної енергоємності продукції чорної металургії України за виробничими схемами до 2040 року. *Проблеми загальної енергетики*. 2021. Вип. 2. С. 44–52.
5. International Energy Agency. *Iron and Steel Technology Roadmap: Towards More Sustainable Steelmaking*. Paris : IEA, 2020.
6. Ukrainian steelmakers reduced electricity consumption by 52% y/y in 2022. GMK Center. 2023. URL: <https://gmk.center/en/news/ukrainian-steelmakers-reduced-electricity-consumption-by-52-y-y-in-2022/> .
7. Lambert T., Gilman P., Lilienthal P. Micropower system modeling with HOMER. *Integration of Alternative Sources of Energy*. Hoboken : Wiley-IEEE Press, 2006. P. 379–418.
8. HOMER Pro. HOMER Energy by UL Solutions. 2025. URL: <https://www.homerenergy.com> .
9. Solar prophets: A history of UW-Madison’s Solar Energy Lab. Wisconsin Energy Institute. 2016.
10. Klein S. A. et al. *TRNSYS 18: A Transient System Simulation Program*. Madison: Solar Energy Laboratory, University of Wisconsin–Madison, 2017.
11. TRNSYS. Transient System Simulation Tool. trnsys.org. 2023. URL: <https://trnsys.org/>.
12. TRNSYS. Features, Pricing & Ordering. TESS – Thermal Energy System Specialists. URL: <https://www.trnsys.com/order/pricing.php.html> .
13. IEA-ETSAP. Energy Systems Analysis. 2025. URL: <https://iea-etsap.org/>
14. IEA-ETSAP. TIMES. 2024. URL: <https://iea-etsap.org/index.php/etsap-tools/model-generators/times>.

¹ Магістрант 1 курсу Ленков Д. Є.¹ Доц., к.т.н. Суходуб І. О.<https://scholar.google.com/citations?user=sHVLLBgAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОМПЛЕКСНА ОЦІНКА ПОТЕНЦІАЛУ ВПРОВАДЖЕННЯ ВІДНОВЛЮВАЛЬНИХ ДЖЕРЕЛ ЕНЕРГІЇ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ СТАНДАРТУ NZEB НА ПРИКЛАДІ НАВЧАЛЬНОГО ЗАКЛАДУ

Постановка проблеми та її актуальність. З 1 квітня 2025 року в Україні набули чинності вимоги до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії (nZEB) відповідно до наказу Мінрозвитку № 168 від 06.02.2025 [1]. Ключова вимога наказу – нові будівлі мають відповідати класу енергоефективності «А», а реконструйовані – «В». Також вони повинні максимально знижувати споживання енергії з невідновлюваних джерел, частково або повністю покривати свої потреби за рахунок ВДЕ. В умовах європейської інтеграції та повоєнного відновлення ця вимога набуває особливого значення: понад 70 % будівель навчальних закладів збудовано до 1990 р. і характеризуються класом енергоефективності F–G. Поточна практика термомодернізації шкіл здебільшого обмежується заходами щодо утеплення огорожувальних конструкцій та модернізацією системи теплопостачання, тоді як питання досяжності nZEB-статусу для конкретних об'єктів через верифіковане динамічне моделювання та інтеграцію ВДЕ залишається практично не дослідженим. Це зумовлює необхідність розробки комплексного методологічного підходу, що дозволяє кількісно оцінити, наскільки реальна будівля наближається до стандарту nZEB та які кроки залишаються для його досягнення.

Формулювання мети. Розробка енергетичної моделі будівлі закладу освіти, верифікованої на фактичних даних споживання та оцінкою технічного й економічного потенціалу інтеграції систем ВДЕ для досягнення стандарту nZEB.

Об'єкт дослідження. Об'єктом дослідження є ліцей № 1, м. Нововолинськ, Волинської обл., чотириповерхова будівля П – подібної форми 1959 р. побудови. Опалювана площа становить 4 275 м², кількість одночасно перебуваючих людей – 670 осіб. Під усією площею знаходиться опалювальний підвал.

Дослідження виконано у два етапи:

1. Збір необхідної інформації: визначення споживання теплової та електричної енергії за 2021–2023 рр.; інвентаризація інженерних систем.

2. Створення енергетичної моделі будівлі в програмному середовищі DesignBuilder / EnergyPlus: 3D – геометрія, калібрування за фактичним споживанням, розрахунок трьох сценаріїв.

Теплотехнічні характеристики огорожувальних конструкцій ліцею, котрі суттєво не відповідають чинним нормам [2], наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій навчального закладу

	Огорожувальні конструкції	Опір теплопередачі, м ² ·К/Вт	
		Базовий	Нормативний
1	Зовнішні стіни	1,2	4
2	Світлопрозорі конструкції	0,45	0,9
3	Зовнішні двері	0,49	0,7
4	Горищне перекриття	1,4	6

Верифікація енергетичної моделі. Аналіз рахунків за 2021–2023 рр. виявив середнє споживання теплової енергії 433 Гкал/рік, електричної – 25 757 кВт·год/рік. Характерною особливістю об'єкта є режим «недогріву», тобто фактичне теплоспоживання на 25 % нижче нормативного, що зумовлено гідравлічним розбалансуванням системи опалення, а також тим, що умови експлуатації не відповідають нормативним вимогам [3]. Результати калібрування моделі наведено у табл. 2 – відхилення становить менше 1 %.

Таблиця 2 – Результат верифікації енергетичної моделі будівлі

Модель	Історичне	Actual	Baseline	Proposed
Електроенергія				
Абсолютне значення	25 757	25 776,15	99 109,71	99 109,71
Теплова енергія				
Абсолютне значення	550 041	550 370	689 680	86 357
Загальне енергоспоживання				
Абсолютне значення	575 798	576 146	788 790	185 467
Зниження	–	–	–	76 % від базового 68 % від фактичного

В енергетичній моделі було змодельовано три сценарії. Фактичний – поточний стан. Базовий – відтворює нормативні умови експлуатації без модернізації, що дозволяє коректно оцінити реальну проблему недогріву. Запропонований – комплекс заходів: утеплення огорожувальних конструкцій, реконструкція ІТП, встановлення рекуператора теплоти механічної системи вентиляції та переривчастого режиму опалення. Більш детальне порівняння вищенаведених сценаріїв, з зазначеним ефектом наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Поетапне порівняння

Захід	До, кВт·год	Після, кВт·год	Економія, кВт·год/ %	
Actual – Baseline				
Встановлення нормативної внутрішньої температури	550 370	656 140	–105 770	–19,22
Нормування теплонадходжень	656 140	590 220	65 920	11,98
Нормування повітрообміну	590 220	689 680	–99 460	–18,07
Порівняння	550 370	689 680	–139 310	–25,31
Електрична енергія				
Нормування теплонадходжень	25 776,15	99 109,71	–73 333,56	–284,71
Baseline – Proposed				
Утеплення	689 680	288 829	400 851	72,83
Встановлення рекуператора	288 829	152 960	135 869	24,69
Модернізація ІТП	152 960	115 268	37 692	6,85
Встановлення переривчастого режиму опалення	115 268	86 357	28 911	5,25

Інтеграція систем відновлюваних джерел енергії. Після оптимізації теплозахисту оболонки розроблено дві незалежні системи ВДЕ, що покривають різні види навантажень. В табл. 4 наведено результати симулювання.

Таблиця 4 – Характеристики систем ВДЕ

Система ВДЕ	Покриття за рахунок провадження, кВт·год	Частка покриття, %
ФЕС (128,87 м ² ; 58 модулів; 26,1 кВт – пік)	27 819 (генерація) 10 653 (покриття)	41,3
Тепловий насос ґрунт – вода (35,5 кВт; SPF 4; 14 скважин)	112 709	75

Опираючись на проведені раніше дослідження даного об'єкту [4] можна дійти висновку, що впровадження енергоефективних заходів, не враховуючи інтеграцію ВДЕ дозволить досягнути класу енергоефективності – «В».

Висновки. Розроблена двостадійна методика забезпечила верифікацію енергетичної моделі з відхиленням від фактичного споживання менше ніж в один відсоток, в свою чергу це підтверджує її придатність для достовірного прогнозування ефекту від заходів енергомодернізації. Застосування комплексу заходів з підвищення теплозахисту огорожувальних конструкцій, реконструкція ІТП та встановлення рекуператорів теплоти в системі механічної вентиляції та впровадження переривчастого режиму опалення дозволяють знизити теплоспоживання на 76 % відносно базового сценарію. Інтеграція двох систем ВДЕ: ФЕС і теплового насоса (ґрунт – вода) дозволяє покрити 41,3 % потреби електричної енергії і 75 % навантаження на опалення за рахунок відновлюваних джерел. Досягнутий клас «В» у поєднанні зі значною часткою ВДЕ відповідає ключовій вимозі наказу Мінрозвитку № 168 від 06.02.2025 щодо стандарту nZEB, хоча остаточне підтвердження статусу потребує розрахунку первинної енергії за методологією наказу.

Перелік посилань:

1. Деякі питання запровадження вимог до будівель з близьким до нульового рівнем споживання енергії : Наказ М-ва розвитку громад та територій України від 06.02.2025 № 168 : станом на 1 квіт. 2025 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0284-25#Text> (дата звернення: 26.02.2026).
2. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. К.: Мінрегіон України, 2022. 27 с.
3. ДП«УкрНДНЦ». Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання. ДП«УкрНДНЦ», 2022. 152 с.
4. Ленков Д. Є., Яценко О. І. Зниження використання теплової енергії на потреби опалення нововолинського ліцею № 1. *XXII міжнародноа науково-практична конференція молодих вчених та студентів «Сучасні проблеми наукового забезпечення енергетики»*, 2025. – 3 ст.

¹ Магістрант 1 курсу Ленков Д. Є.

¹ Ст.викл., к.т.н. Шевченко О. М.

<https://scholar.google.com/citations?user=7gLSQIwAAAAJ&hl=ru>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

УНІВЕРСАЛЬНІ ЗАХОДИ З ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ В БУДІВЛЯХ: СИСТЕМАТИЗАЦІЯ ТА ОЦІНКА ЕФЕКТИВНОСТІ

Постановка проблеми та її актуальність. Житловий фонд України налічує понад 180 тис. багатоквартирних будинків, переважна більшість яких збудована до 1990 року і характеризується значними питомими витратами теплової енергії, яка в середньому становить 200–350 кВт·год/м² на рік, що вдвічі-втричі перевищує нормативи країн ЄС [3]. З 2019 року ДУ «Фонд енергоефективності» реалізує програму «Енергодім», яка надає гранти ОСББ на проведення заходів з термомодернізації. Станом на кінець 2024 року по 437 ОСББ повністю/частково завершено будівельні роботи, а по 218 проектах отримано підтверджені дані про економію енергії [1]. Наявність цього масиву даних відкриває можливість для об'єктивної систематизації заходів на основі реального українського досвіду, що і визначає мету цієї роботи.

Аналіз останніх досліджень. Об'єктом дослідження є відкриті дані ДУ «Фонд енергоефективності»: звіт про діяльність за 2024 рік [1] та реєстр проектів «Перші ластівки» [2], що містять відомості про 10 проектів програми «Енергодім» з детальними заходами. Для аналізу використано зведені показники по 218 повністю завершених і верифікованих проектах, по яких наявні підтверджені дані про економію енергії. Заходи систематизовано за двома пакетами – «А» (базовий, модернізація інженерних систем) та «Б» (комплексний, включає теплоізоляцію огорожувальних конструкцій). Для кожної групи розраховано середній рівень економії енергії, середню вартість проекту та питому вартість зекономленого кВт·год.

Формулювання мети. Метою цієї роботи є ідентифікація та оцінка ефективності найбільш універсальних заходів з енергозбереження, що можуть бути реалізовані як в існуючих, так і в нових будівлях.

Основна частина. Згідно зі звітом Фонду [1], станом на 31.12.2024 по завершених та верифікованих проектах програми «Енергодім» отримано такі результати (табл. 1).

Таблиця 1 – Зведені показники завершених проектів (станом на 23.12.2024)

Показник	Пакет А	Пакет Б	Разом
Кількість завершених проектів, од.	76	124	218
Середній рівень економії енергії, %	27,2	35,2	31,8
Річна економія енергії, тис. кВт·год/рік	35 259	63 191	98 450
Середня вартість проекту, млн грн	1,16	8,65	–

Аналіз переліку заходів, передбачених програмою, та даних реєстру «Перші ластівки» [2] дозволяє визначити типовий склад кожного пакету (табл. 2).

Таблиця 2 – Типові заходи за пакетами програми «Енергодім» та їх частота

Захід	Пакет А	Пакет Б	Частота
Встановлення/модернізація ІТП	+	+	9/10
Теплоізоляція трубопроводів опалення	+	+	9/10
Гідравлічне балансування системи опалення	+	+	8/10
Заміна зовнішніх дверей / вікон МЗК	+	+	5/10
Теплоізоляція зовнішніх стін	-	+	3/10
Теплоізоляція даху та підвалу	-	+	2/10

Більш наочна інформація, з відсотком по кожному заходу наведена на рис. 1.

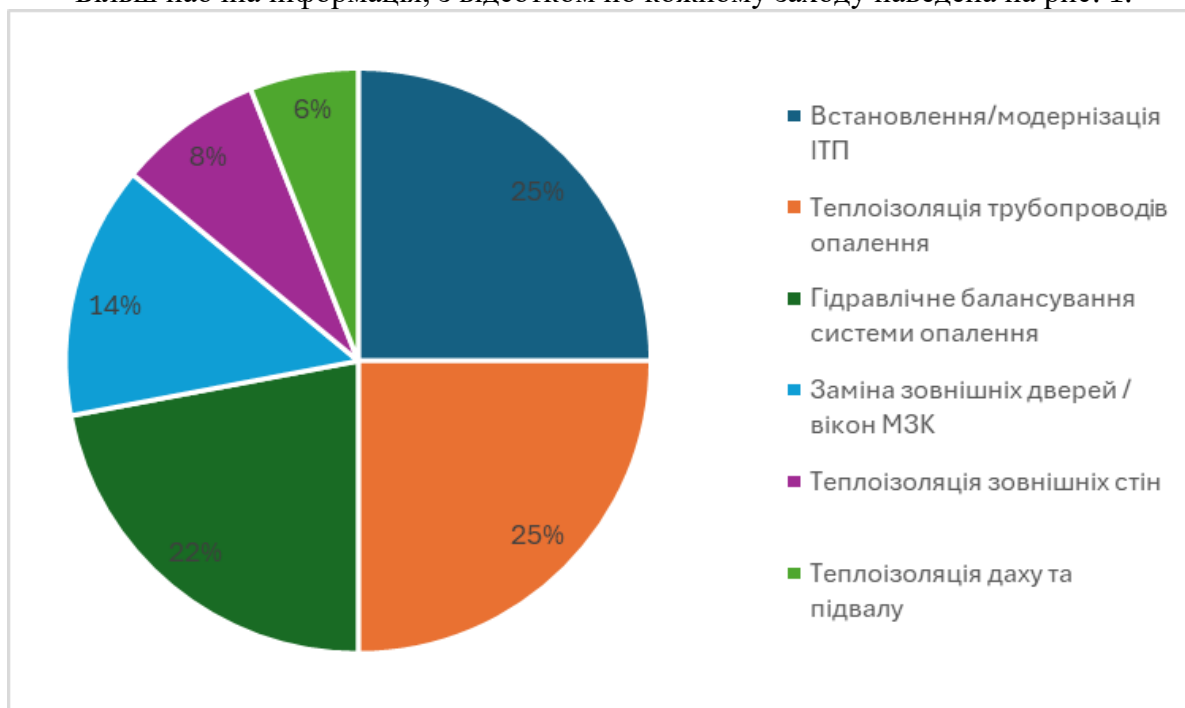


Рисунок 1 – Розподіл заходів за частотою реалізації у верифікованих проектах

Отримані дані свідчать про те, що три заходи є справді універсальними: модернізація ІТП, теплоізоляція трубопроводів та гідравлічне балансування системи опалення – присутні у 80–90 % проектів незалежно від пакету, регіону та типу будинку. Саме вони формують основу пакету «А», забезпечуючи середню економію 27,2 % при відносно невисоких витратах (~ 1,16 млн грн на проєкт) та можуть бути реалізовані без прив'язки до конструктивних особливостей будівлі. Додавання заходів з теплоізоляції огорожувальних конструкцій (пакет «Б») підвищує середній ефект до 35,2 %, проте вартість зростає майже у 7,5 разів (до 8,65 млн грн на проєкт).

Ключовим індикатором ефективності є питома вартість зекономленої енергії: для пакету «А» вона становить 2,5 грн/кВт·год, тоді як для пакету «Б» – 20 грн/кВт·год, тобто у 8 разів більше. Це означає, що кожна гривня, вкладена в базову термомодернізацію (пакет «А»), дає значно більший енергетичний ефект. Вибір між пакетами залежить від технічного стану будинку та наявного фінансування: для відносно нових або вже частково утеплених будівель пакет «А» забезпечує швидке відновлення інвестицій, тоді як для будинків, збудованих до 1970-х рр. із незадовільним станом огорожувальних конструкцій, комплексний пакет «Б» є стратегічно кращим вибором з огляду на довгостроковий економічний ефект.

Загальний обсяг підтвердженої річної економії по 218 проектах становить 98 450 тис. кВт·год/рік зі скороченням викидів CO₂ на 28 710 тонн/рік, що в середньому складає близько 132 т CO₂ на один проєкт і охоплює понад 20 тис. домогосподарств [1]. Цей показник підкреслює не лише економічну, а й кліматичну значимість масштабної термомодернізації. За оцінками МЕА [3], підвищення енергоефективності будівель є одним із найбільш рентабельних інструментів декарбонізації міської інфраструктури – і українські дані програми «Енергодім» підтверджують цю тезу на практиці.

Висновки. На основі аналізу даних проекту програми «Енергодім» ДУ «Фонд енергоефективності» встановлено:

Найбільш універсальними заходами підвищення енергоефективності багатоквартирних будинків є модернізація ІТП, теплоізоляція трубопроводів та гідравлічне балансування системи опалення – вони присутні у 80–90 % реалізованих проектів, формуючи основну частину пакету «А». Середній підтверджений рівень економії енергії у

завершених проектах становить 31,8 %: для пакету «А» – 27,2 %, для пакету «Б» – 35,2 %. З економічної точки зору розширений пакет «А» є ефективнішим: питома вартість зекономленої енергії (~ 2,5 грн/кВт·год) майже у 8 разів нижча, ніж для пакету «Б» (~ 20 грн/кВт·год).

Отримані результати можуть бути використані для обґрунтування першочергових заходів при розробці регіональних програм термомодернізації житлового фонду України.

Перелік посилань:

1. EEFUND. Звіт 2024 рік. URL: <https://eefund.org.ua/wp-content/uploads/2025/02/zvit-2024-rik.pdf> (дата звернення: 04.03.2026).

2. Eefund. Statusy proektiv: pershi lastivky - status. URL: https://eefund.org.ua/wp-content/uploads/2023/07/statusy-proektiv_pershi-lastivky_-status.pdf (дата звернення: 04.03.2026).

3. Agency I. E. Buildings – Energy System. Paris : IEA, 2023. URL: <https://www.iea.org/energy-system/buildings> (дата звернення: 04.03.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Москаленко Ю. В.

¹ Ст.викл., к.т.н. Буяк Н. А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ РІВНЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ТЕПЛОВОГО КОМФОРТУ БУДІВЛІ ГОТЕЛЮ «СІКОРСЬКИЙ»

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасному світі питання енергоефективності стають одними з ключових у багатьох галузях, включаючи будівництво готелів. Зростання витрат на енергетичні ресурси, підвищені екологічні вимоги та посилення конкуренції на ринку стимулюють підприємства до пошуку нових рішень, які б дозволили знизити енергетичні витрати, покращити екологічні показники та підвищити комфорт для гостей і персоналу [1]. Підвищення енергоефективності будівель та впровадження відновлюваних джерел енергії є одним із ключових напрямів забезпечення енергетичної безпеки України. Висока енергоємність будівельного сектору та значна залежність від викопних енергоносіїв зумовлюють необхідність модернізації існуючого фонду будівель і активного впровадження сонячних та вітрових енергетичних установок. Використання енергоефективних технологій дозволяє зменшити споживання первинної енергії та скоротити викиди парникових газів [2].

Аналіз останніх досліджень. Відновлювані джерела енергії відіграють ключову роль у підвищенні енергоефективності будівель та зменшенні залежності від традиційних енергоресурсів. Гетун і Кошева відзначають, що розвиток сонячної, вітрової та біоенергетики дозволяє економічно доцільно скоротити споживання первинної енергії, підвищити екологічність будівель та знизити негативний вплив на довкілля [3]. Дослідження Козачука і Петренка показують, що впровадження альтернативної енергетики у різних секторах економіки сприяє підвищенню енергетичної ефективності, зменшенню залежності від імпортованих ресурсів і досягненню кліматичних цілей України [4].

Формулювання мети. Аналіз енергоефективності готельного комплексу з метою підвищення енергоефективності з одночасним забезпеченням високого рівня теплового комфорту, що обумовлено функціональним призначенням даної будівлі.

Основна частина. Об'єктом дослідження є гостьовий будинок, розташований у місті Києві, на проспекті Берестейському, 37 Б. Будівля зведена у 1907 році, має три поверхи. У будівлі встановлено централізовану систему опалення без авторегулювання. Оцінювання енергетичної ефективності готельної будівлі виконано відповідно до чинної методики розрахунку питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні. За результатами розрахунків готель відповідає класу енергетичної ефективності «В». Отримані результати свідчать про задовільний рівень енергоефективності будівлі, водночас існує потенціал для її подальшого підвищення шляхом впровадження сучасних інженерних рішень [5]. За результатами моделювання в GeoT*SOL для системи опалення обрано ґрунтовий тепловий насос Dimplex SI 70 TUR номінально $\approx 69,8$ кВт, оскільки він має вищий сезонний коефіцієнт ефективності, споживає менше електроенергії та забезпечує нижчі річні експлуатаційні витрати порівняно з повітряним варіантом. Попри більші початкові інвестиції, таке рішення є економічно доцільнішим у довгостроковій перспективі та дозволяє зменшити залежність від електронагрівачів у пікові періоди. На рис. 1 приведено результати моделювання ґрунтового теплового насосу. Моделювання системи гарячого водопостачання із сонячними колекторами здійснювалось в програмному середовищі T*Sol. Була обрана система із вакуумним сонячним колектором Vitosol 200-T SD2 2m² зі ступенем заміщення 60 %.

Simulation Results

Seasonal Heat Performance Factor (SPF) Energies

Energy generated / Year

Supplied by heat pump:	88 968 kWh (83 %)
Supplied by boiler:	--- kWh
Supplied by solar system:	--- kWh
Supplied by elec. heating rod:	18 289 kWh (17 %)

Utilized energy / Year

Space Heating:	108 076 kWh (100 %)
Domestic hot water:	--- kWh

Power consumption / Year

Heat pump:	19 735 kWh (52 %)
Heating element:	18 289 kWh (48 %)
Auxiliary energy:	12 kWh (0 %)
Solar loop pump:	--- kWh
Boiler (fuel):	--- kWh

Losses / Year

Tank losses:	--- kWh
...fraction of solar tank losses:	--- kWh
DHW recirculation loop:	--- kWh
Solar loop piping indoors:	--- kWh
Solar loop piping outdoors:	--- kWh

Solar loop

Solar fraction:	--- %
Solar fraction DHW:	--- %
Efficiency of solar system:	--- %
Irradiation onto active solar surface:	--- kWh
Energy delivered by collectors:	--- kWh

Рисунок 1 – Енергетичні показники ефективності

На рис. 2 графічно показано частку, яку покриває сонячна енергія від загальної потреби у нагріванні води.

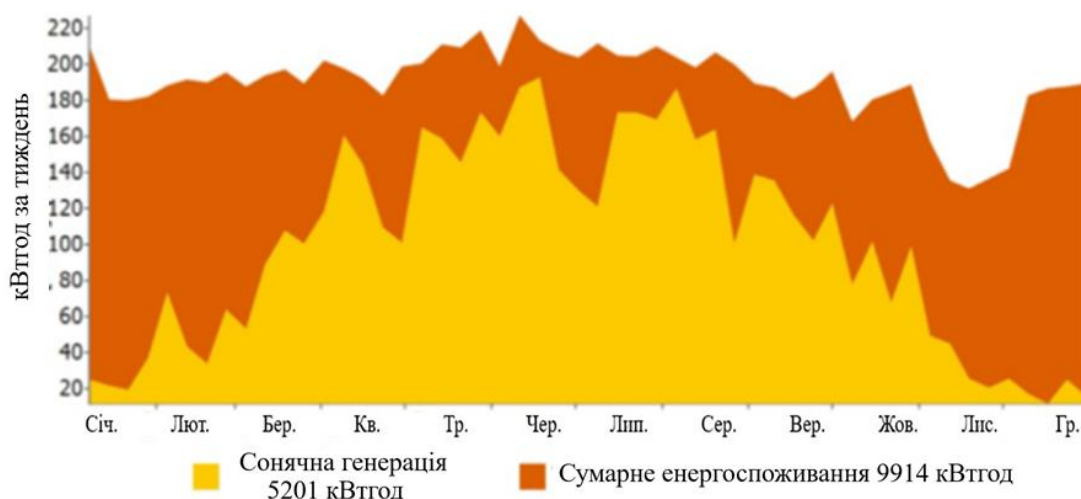


Рисунок 2 – Характеристика системи гарячого водопостачання з використанням вакуумного сонячного колектора

На графіку видно, що система з вакуумними сонячними колекторами забезпечує стабільне покриття значної частини потреб гарячого водопостачання протягом року. У теплий період сонячна енергія максимально використовується для нагріву води, тоді як у холодні місяці зростає роль допоміжного джерела тепла. Урахування втрат під час передачі та зберігання тепла підтверджує реальну ефективність системи в експлуатаційних умовах. Загалом впровадження сонячних колекторів дозволяє зменшити потребу в тепловій енергії від традиційного джерела приблизно в 2 рази, що підвищує енергоефективність будівлі та скорочує споживання традиційних енергоресурсів.

Моделювання дахової сонячної електростанції виконано в програмному комплексі PV*SOL premium. У даному випадку використовуються фотомодулі виробника JA Solar Holdings Co., модель JAM 72S20-450/MR. Результати показали, що станція забезпечує часткове покриття потреб будівлі: основна генерація припадає на весняно-літній період, коли можливий надлишок електроенергії, тоді як узимку переважає споживання з мережі.

Отже, існуюча потужність системи не забезпечує повної енергетичної автономності та потребує подальшої оптимізації. На рис. 3 наведено результати моделювання сонячних панелей на даху готелю.

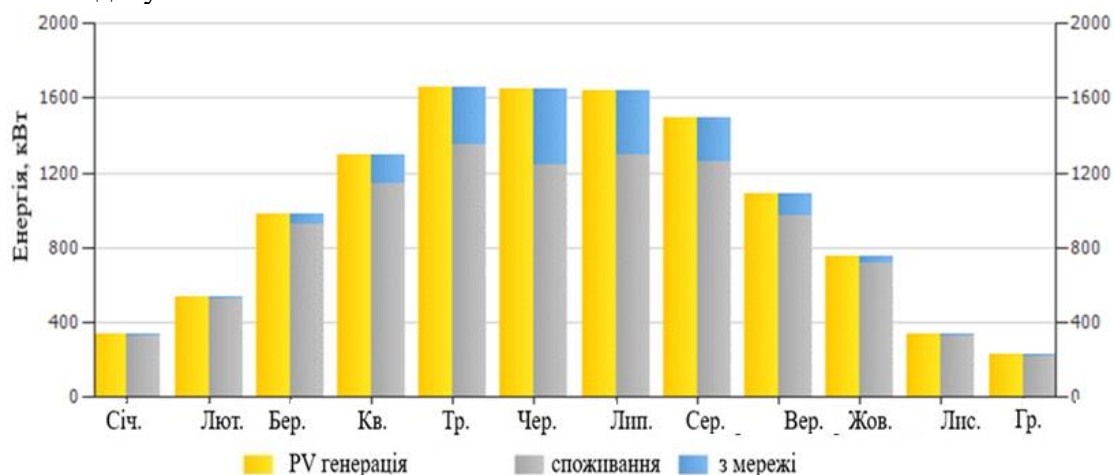


Рисунок 3 – Використання електроенергії та її розподіл

Отримані результати свідчать, що встановлена потужність фотоелектричної системи забезпечує лише часткове покриття навантаження та потребує оптимізації для підвищення рівня енергетичної автономності будівлі. У подальшій роботі планується застосування сучасних методик оцінки рівня теплового комфорту та впровадження систем управління мікрокліматом для забезпечення оптимальних умов перебування в будівлі. За допомогою програмного забезпечення RETScreen проведено комплексний аналіз впровадження енергоефективних заходів для готелю. Результати моделювання показали, що зниження інтенсивності повітрообміну та встановлення системи рекуперації з ефективністю близько 60 % сприяють суттєвому зменшенню тепловтрат, що, у свою чергу, знижує загальне енергоспоживання будівлі. Проведена термомодернізація дозволила скоротити споживання енергії більш ніж на 90 %, що забезпечує значну економію витрат.

Висновки. Підсумовуючи, впровадження альтернативних джерел енергії суттєво скорочує споживання традиційних енергоресурсів і підвищує енергоефективність будівлі. Водночас через сезонні та погодні коливання інтенсивності сонячного випромінювання такі системи не можуть повністю забезпечити потреби в електроенергії, опаленні та гарячому водопостачанні протягом усього року. Тому найбільш доцільним є їх використання в поєднанні з традиційними або резервними джерелами енергії. Комплексний підхід дозволяє досягти оптимального балансу між економічною ефективністю, надійністю енергопостачання та зменшенням негативного впливу на довкілля.

Перелік посилань:

1. Енергоефективність у проектуванні та будівництві готельних та ресторанних об'єктів / Погребняк А. В. та ін. *Systems and Technologies*. 2025. Т. 69, № 1. С. 294–299. URL: <https://doi.org/10.32782/2521-6643-2025-1-69.35> (дата звернення: 05.03.2026).
2. Кудря С. О., Репкін О. М. Розвиток відновлюваної енергетики в Україні та підвищення енергоефективності будівель. *Відновлювана енергетика*. 2021. № 3. 5–12.
3. Гетун Г., Кошева В. Актуальність використання відновлювальних джерел енергії у будівельному секторі в умовах України. *Енергоефективність в будівництві та архітектурі* : наук.-техн. зб. Київ, 2017. С. 44–48.
4. Козачук І., Петренко О. Перспективи розвитку відновлюваних джерел енергії в Україні та їх вплив на енергетичну ефективність секторів економіки. *Економіка та енергетика*. 2024. № 15. С. 45–52.
5. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. №169. *Офіційний вісник України*. 2018. № 55. С. 301.

¹ Аспірант 1 курсу Точинський Я. Р.

¹ Доц., к.т.н. Білоус І. Ю.

<https://scholar.google.com/citations?user=USpfruwAAAAJ&hl=uk&oi=ao>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

SMART ENERGY SYSTEM ДЛЯ УКРАЇНИ В УМОВАХ ВІЙНИ ТА НЕСТАБІЛЬНОЇ ГЕНЕРАЦІЇ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ Й ТЕПЛА

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах повномасштабної війни для України різко зросла значущість стійкості енергопостачання на рівні міст і їхніх районів, оскільки ризики фізичних ушкоджень генеруючих об'єктів і мереж поєднуються з обмеженою доступністю маневрових потужностей та коливаннями генерації. За узагальненими оцінками International Energy Agency, енергосистема зазнала масштабних втрат і пошкоджень, що підсилює потребу у швидко розгортаних, модульних рішеннях, здатних підтримувати електро- і теплопостачання під час відключень [1].

Аналіз останніх досліджень. Концепція SES, розвинута Х. Лундом, доводить переваги міжсекторальної інтеграції та теплових мереж 4-го покоління над суто електричними Smart Grids. В Україні Денисюк С. та Белоха Г. дослідили моделі «Energy Smart Community» та трансактивного управління споживачами [2, 3].

Формулювання мети. Метою роботи є систематизація наукових підходів до створення інтегрованих систем енергозабезпечення міських районів на базі розосередженої генерації.

Основна частина. Сучасна концепція розумних енергетичних систем (Smart Energy Systems – SES), на відміну від вузькосекторальних інтелектуальних мереж (Smart Grids), базується на принципі цілісності та міжсекторальної синергії. Основною ідеєю SES є глибока інтеграція електричного, теплового, газового секторів та транспортної інфраструктури для досягнення максимальної ефективності та гнучкості системи. У розрізі міських громад створення такої системи передбачає перехід до моделі «енергетичної комірки» району, яка здатна функціонувати в автономному режимі у разі виникнення критичних пошкоджень магістральних мереж [2, 4].

Фундаментальним принципом побудови SES є роль активного споживача – суб'єкта, який одночасно споживає та генерує енергію. Розумна система керування не лише максимізує власне споживання з відновлюваних джерел енергії, а й здійснює автоматизований продаж надлишків у локальну мережу за принципом трансактивної енергетики. Технологічно це реалізується через розгортання «Інтернету енергії» (IoE), де кожен енергетичний вузол має свій програмний агент, що взаємодіє з іншими через блокчейн-платформи для автоматизації розрахунків у реальному часі [5].

Впровадження SES в Україні стикається з комплексом безпрецедентних викликів, зумовлених як технічними чинниками, так і наслідками збройної агресії. По-перше, енергетична інфраструктура міст, що була спроектована як суворо централізована радянська модель, виявилася вкрай вразливою до точкових ударів: руйнування великої ТЕЦ призводить до одночасного припинення подачі електроенергії, тепла та води для сотень тисяч мешканців. Прямі збитки сектору на кінець 2024 року оцінюються у 24,8 млрд доларів, що робить повне відновлення за старим принципом економічно недоцільним.

Технічна складова проблеми полягає в якості електроенергії. Масове впровадження інверторної генерації (сонячних та вітрових станцій) призводить до зниження інерції системи та появи високих гармонічних спотворень (THD). Це створює загрозу для чутливої побутової та медичної техніки мешканців району. Крім того, існує проблема балансування теплового та електричного навантаження: в періоди пікової генерації ВДЕ виникає значний

надлишок енергії, який традиційні мережі не здатні акумулювати або передати через обмеження пропускної здатності. Економічні бар'єри включають дефіцит приватних інвестицій через високі військові ризики та відсутність законодавчо врегульованих механізмів торгівлі енергією на рівні громад [3].

Для подолання зазначених бар'єрів найбільш перспективним є підхід, що передбачає децентралізацію генерації та впровадження технологій Power-to-Heat (P2H) [6]. Доведено, що використання електричних котлів у системах централізованого опалення як маневрених потужностей є дешевшим за теплові насоси для швидкої утилізації надлишків енергії ВДЕ. Це дозволяє перетворювати «зайву» електрику в дешеве тепло для громади [6].

Для демонстрації переваг переходу до SES порівняно з існуючим станом, нижче наведено порівняльну характеристику систем енергозабезпечення міських районів.

Таблиця 1 – Порівняльна характеристика моделей енергозабезпечення міських районів

Параметр порівняння	Централізована система	Розумна система громади
Архітектура	Односпрямована, ієрархічна	Двоспрямована, коміркова (ІоЕ)
Джерела енергії	Великі ТЕС/ГЕС (викопне паливо)	Розосереджена когенерація та ВДЕ
Стійкість до атак	Низька (каскадні відключення)	Висока (автономність вузлів)
Роль споживача	Пасивний абонент	Активний просюмер/торговець
Утилізація надлишків	Обмеження генерації (втрати)	Power-to-Heat та акумуляція
Управління	Ручне/диспетчерське	Інтелектуальне (PSO/GA) + Блокчейн

Перспективи розвитку SES в Україні пов'язані з гармонізацією законодавства з Енергопакетом ЄС та залученням міжнародних грантів (UNDP, GIZ) для створення пілотних «енергопозитивних» районів. Використання системного моделювання в EnergyPLAN [7] дозволяє громадам вже зараз розробляти сценарії 100% переходу на ВДЕ до 2050 року, враховуючи специфіку локальних ресурсів – від біогазу до скидної теплоти промисловості. Таким чином, Smart Energy System стає інструментом не лише енергоефективності, а й національної витривалості та швидкої післявоєнної модернізації міського середовища.

Висновки. Створення Smart Energy Communities в Україні є не лише екологічним трендом, а стратегічною відповіддю на військові загрози. Поєднання розосередженої генерації, технологій P2H та блокчейн-платформ для управління дозволяє громадам досягти високого рівня автономії. Майбутні дослідження мають бути спрямовані на вдосконалення алгоритмів кіберзахисту таких систем у межах концепції «Інтернету енергії».

Перелік посилань:

1. International Energy Agency. Ukraine's Energy Security and the Coming Winter. Paris: IEA, 2024. URL: <https://www.iea.org/reports/ukraines-energy-security-and-the-coming-winter> (дата звернення: 03.03.2026).

2. Lund H. Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of Fully Decarbonized Societies. 3rd ed. San Diego: Elsevier, 2024. 460 p.

3. Денисюк С. П., Белоха Г. С. Децентралізовані електроенергетичні системи як складові реалізації концепції «Розумні мережі». Системні дослідження в енергетиці. 2024. № 4 (80). С. 26–40. URL: <https://doi.org/10.15407/srenergy2024.04.026> (дата звернення: 03.03.2026).
4. Swain A. et al. An Optimized and Decentralized Energy Provision System for Smart Cities. *Energies*. 2021. V. 14, № 5.
5. Khodakivskyi V., Karpenko D., Bilous I., & Savickas R. (2025). Ensuring Energy Security in Ukraine: The Role of Cogeneration and Sustainable Funding for District Heating Systems. *Rocznik Ochrona Srodowiska*, 27, 196–210. <https://doi.org/10.54740/ros.2025.016> (дата звернення: 03.03.2026)
6. Derii O., Nechaieva T., & Zgurovets O. (2024). TECHNOLOGICAL POSSIBILITIES OF INCREASING THE RESILIENCE OF THE POWER AND DISTRICT HEATING SYSTEMS OF UKRAINE. *Energy Technologies & Resource Saving*, 81(4), 5–21. <https://doi.org/10.33070/etars.4.2024.01> (дата звернення: 03.03.2026)
7. EnergyPLAN developers. About EnergyPLAN. URL: <https://energyplan.eu/about-energyplan/> (дата звернення: 03.03.2026)

¹ Магістрант 1 курсу Шутенко А. В.

¹ Доц., к.т.н. Дубровська В. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=UgfWon8AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАОЩАДЖЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ ШЛЯХОМ ВСТАНОВЛЕННЯ ТЕПЛОВОГО НАСОСУ ДЛЯ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ОБ'ЄКТУ

Постановка проблеми та її актуальність. Одним із головних напрямів підвищення енергоефективності житлового фонду України є модернізація систем теплопостачання, зокрема впровадження відновлювальних джерел енергії та зменшення тепловтрат будівлями. З урахуванням високих тарифів на енергоресурси та необхідності зниження енергоспоживання, особливо в умовах централізованого теплопостачання, а також враховуючи складну енергетичну ситуацію в країні у зв'язку з воєнним станом актуальність даної теми зростає з кожним роком.

Аналіз останніх досліджень. Зменшенню енергоспоживання будівлями присвячено багато робіт як в Україні, так і за кордоном. Якість централізованого теплопостачання будівель не відповідає нормативним показникам, а влітку мають місце тривалі відключення гарячої води, що змушує мешканців думати про необхідність термомодернізації будівлі та шукати альтернативні способи теплозабезпечення.

Формулювання мети. Метою роботи є зменшення споживання теплової енергії на опалення та гаряче водопостачання за рахунок термомодернізації зовнішньої оболонки будівлі та використання теплового насоса для ГВП.

Основна частина. Об'єктом дослідження є побудований у 1966 році типовий дев'ятиповерховий цегляний житловий будинок в м. Києві з централізованою системою опалення та ГВП. Теплопостачання у будинку – здійснюється від ТЕЦ 5, теплоносій – вода. Тепловий пункт з елеватором. Автоматичне регулювання відсутнє. Опалювальні прилади у квартирах різного типу.

Будівля збудована з цегли без додаткового утеплення. Стіни мають товщину близько 52 см. Загальна площа будівлі становить 5550 м², об'єм 19867 м³, опалювальна площа 5130 м². Теплоізоляційні властивості матеріалів будівлі не відповідають сучасним нормам. Частина вікон замінена на металопластикові, але є ще й дерев'яні (МП – 88 %, Д – 12 %), що знижує енергоефективність. Потужність системи опалення становить 665 кВт. Рівень енергоефективності будівлі відповідає класу G.

Для зменшення тепловтрат в навколишнє середовище і відповідно споживання теплової енергії запропоновано привести термічний опір оболонки будівлі до сучасних стандартних вимог у відповідності з ДБН [1] і провести розрахунок споживання теплової енергії з використанням кліматичних умов для міста Києва в програмному середовищі RETScreen [2].

В результаті проведених заходів з термомодернізації будинку потужність системи опалення зменшилась до 343 кВт, що дозволило знизити витрати на опалення на 8 млн. грн. при затратах на утеплення зовнішньої оболонки у 40 млн. грн., строк окупності з урахуванням темпу інфляції склав біля 7 років. Рівень енергоефективності будівлі підвищився до класу F.

З огляду на сьогодишню ситуацію з теплопостачанням в місті, а також постійні проблеми з гарячим водопостачанням доцільно встановити тепловий насос для забезпечення мешканців будинку (108 чоловік) гарячою водою. Середнє теплове навантаження на систему ГВП: 32,2 кВт. В роботі розглядалися 2 варіанти встановлення ґрунтового і повітряного насосів.

Грунтовий тепловий насос має більш стабільні показники роботи, але немає земельної ділянки для влаштування свердловин.

Для покриття навантаження обираємо 4 насоси типу повітря – вода [3] спліт системи BEESMART MHCS 045 UBS/NBS загальною потужністю 45 кВт. Технічні характеристики даного ТН: Теплова потужність – 11,6 кВт; COP – 4,3; Діапазон зовнішньої температури в режимі нагріву: мінус 25...+45 °С; Максимальна температура подачі +55 °С.

Зовнішні блоки ТН займають мало місця та розміщуються на невеликій ділянці біля будівлі. Встановлення повітряних теплових насосів не вимагає спеціальних дозволів або земляних робіт, але треба враховувати збільшення електричної потужності з мережі.

Для зберігання та нагрівання води пропонуються два типи баків:

1) 2 баки-акумулятори типу TA2.800 NEUS 800 л з додатковим джерелом теплоти від теплової мережі;

2) 4 комбіновані баки – бойлери MT 100/300 HP по 400 л, в яких додатковим джерелом є електричний ТЕН.

Ціна одного теплового насосу приблизно 325 тис. грн.

Ціна баку-акумулятору приблизно 41 тис. грн.

Ціна комбінованого баку приблизно 82 тис. грн.

Річна витрата теплової енергії на ГВП становить 319 Гкал.

Річна витрата електричної енергії з врахуванням середнього COP = 4,3 буде 86397 кВт·год = 74 Гкал.

З урахуванням, що ціна монтажу 4-ох теплових насосів і 2-ох баків – 1658 тис. грн., а базова ціна теплової енергії для формування тарифів становить 1654,41 грн. термін окупності складе 4–5 років.

Для підвищення ефективності системи ГВП в подальшому буде розглядатися можливість встановлення на даху будівлі електричної системи з сонячними модулями для забезпечення роботи ТН.

Висновки. Після утеплення будівлі споживання теплоти знижуються до 343 кВт. Це підтверджує високу ефективність утеплення та відповідність термічних опорів огорожувальних конструкцій будівлі сучасним будівельним стандартам.

Вартість модернізації – 40 млн. гривень, при цьому річна економія – 8 млн. гривень. Термін окупності – 7 років.

Такий термін окупності є прийнятним для проєктів з енергоефективності в житловому секторі, особливо з огляду на зростання тарифів на енергоносії.

Для модернізації системи гарячого водопостачання пропонується встановлення 4 теплових насосів BEESMART MHCS 045 загальною потужністю 45 кВт. Це дозволяє:

- зменшити споживання теплової енергії з централізованої мережі;
- використовувати відновлювану енергію навколишнього середовища;
- забезпечити стабільне ГВП цілий рік.

Додатково пропонуються варіанти акумуляування води:

- баки-акумулятори з підключенням до тепломережі;
- комбіновані баки з електронагрівом – для автономності.

Витрата на систему ГВП з ТН складає 1658 тис. грн., а термін окупності 4–5 років. Збільшена потужність ТН дозволить забезпечити збільшення кількості споживачів гарячої води після закінчення воєнного стану.

Перелік посилань:

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-09-01. Вид. офіц. Київ, 2022. 27 с.

2. RETScreen [Електронний ресурс]. Режим доступу: <https://natural-resources.canada.ca/maps-tools-publications/tools-applications/retscreen>.

3. Калькулятор [Електронний ресурс]. Режим доступу: URL: <https://mctn.aclima.ua/ua/>.

¹ Аспірант 2 курсу Ільченко Д.С.

¹ Доц., к.т.н. Суходуб І.О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=sHVLLBgAAAAJ&hl=uk&oi=ao>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИМІЗАЦІЯ КОНСТРУКТИВНИХ І РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ВЕНТИЛЯЦІЙНИХ СИСТЕМ ОВОЧЕСХОВИЩ З ВИКОРИСТАННЯМ CFD-МОДЕЛЮВАННЯ.

Постановка проблеми та її актуальність. Зберігання овочів в сховищах вимагає стабільного мікроклімату, де вентиляційні системи забезпечують видалення CO₂, вологи та теплоти від респірації. Всередині приміщень зберігання овочів нерівномірний розподіл повітря створює «мертві зони» з градієнтами температур до 6 °C, що підвищує енергоспоживання на 20–40 % через надмірне охолодження чи нагрівання. Актуальність посилюється енергокризою в Україні та вимогами ЄС до енергоефективності, де традиційні методи налаштування вентиляції неефективні без детального аналізу потоків повітря. Робота автора [1] виявила потенціал оптимізації мікроклімату, але потребує CFD-аналізу для конструктивних і режимних змін.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні світові дослідження доводять, що метод обчислювальної гідродинаміки (CFD) є найбільш точним інструментом для аналізу мікроклімату в складних геометричних умовах. Робота авторів [2] підтверджує, що аеродинамічний опір штабеля ящиків суттєво відрізняється від опору насипу. Zhen Q. et al. [3] провели комплексне експериментально-чисельне дослідження розподілу температури та вологості в картоплесховищах, валідували CFD-модель і запропонували рекомендації щодо швидкості подачі повітря.

Аналіз літератури показує, що більшість робіт присвячена або насипному зберіганню, або меншим ящикам (до 0,6 м). Відсутні комплексні дослідження саме для українських стандартних ящиків 1,2×1,2×1,6 м з одночасною оптимізацією конструктивних та режимних параметрів вентиляції.

Формулювання мети. Метою роботи є чисельна оптимізація конструктивних (патерн і зазори штабелювання ящиків, геометрія повітроводів і дифузорів, розташування стелажів) та режимних (швидкість подачі повітря, циклічність роботи вентиляторів, частотне регулювання) параметрів вентиляційних систем картоплесховищ ящикового типу методом CFD-моделювання для зниження енергетичних витрат на підтримання нормативних параметрів мікроклімату без погіршення якості продукції.

Основна частина. Об'єктом дослідження є типове існуюче картоплесховище контейнерного типу зберігання, у якому продукція розміщується в ящиках габаритами 1,2×1,2×1,6 м. Ящики встановлюються рядами з формуванням міжрядних повітряних каналів, що забезпечують циркуляцію повітря через продукцію.

Контейнерний спосіб зберігання має низку переваг (гнучкість логістики, зручність сортування), однак створює складну аеродинамічну структуру внутрішнього об'єму сховища. Наявність великої кількості перешкод у вигляді ящиків призводить до:

- формування локальних зон турбулентності;
- нерівномірного розподілу швидкостей повітря;
- виникнення застійних зон;
- підвищення температури у верхній частині приміщення.

Ці фактори безпосередньо впливають на інтенсивність тепломасообміну між повітрям і продукцією та визначають ефективність роботи вентиляційної і холодильної систем.

Інженерна система мікроклімату досліджуваного овочесховища картоплі ящикового типу складається з двох взаємопов'язаних підсистем: системи механічної примусової вентиляції та холодильної системи.

Для моделювання тепло- і масообміну всередині ящиків застосовується модель пористого середовища Дарсі-Форхгеймера з пористістю $\varepsilon = 0,36\text{--}0,41$ (залежно від сорту та ступеня заповнення) та інерційним коефіцієнтом опору $C_2 = 180\text{--}280 \text{ м}^{-1}$. Моделі пористих середовищ Дарсі-Форхгеймера успішно використовуються для моделювання потоку повітря в охолоджених сипучих, упакованих і укладених в штабелі харчових продуктах (включаючи овочі) [4]. Це дозволяє враховувати опір потоку повітря крізь шар картоплі без необхідності моделювати кожен картоплину окремо. Зазори між ящиками моделюються як вільні об'єми з явним розрахунком турбулентних потоків.

Розрахунок базується на розв'язанні рівнянь збереження маси та імпульсу (рівняння Нав'є-Стокса), доповнених моделлю енергії для врахування теплообміну між повітрям та продукцією. Для турбулентності найкраще себе проявила модель SST k- ω (Shear Stress Transport), яка добре працює в задачах з низькошвидкісними потоками, пристінними ефектами, вільними струменями та відривними течіями – типовими для ящикових сховищ.

Для валідації результатів моделювання проводилися фактичні заміри температури, швидкості повітря та рівня CO_2 у відповідних точках овочесховища.

Висновки. CFD-моделювання є потужним інструментом для оптимізації конструктивних і режимних параметрів вентиляційних систем овочесховищ, що дозволяє детально аналізувати розподіл повітряних потоків, температури та вологості в об'ємі приміщення. Результати моделювання можуть бути використані для практичної реалізації енергоощадних систем вентиляції на овочесховищах різних типів і обсягів, сприяючи підвищенню загальної енергоефективності агропромислових об'єктів. Також дані результати можуть бути безпосередньо впроваджені при проєктуванні нових та модернізації існуючих ящикових сховищ в Україні. Перспективи – інтеграція CFD-моделі з IoT-датчиками та машинним навчанням для створення адаптивної «розумної» системи вентиляції.

Перелік посилань:

1. Towards smart potato storage: using CFD modeling and simulation to realize optimized and efficient ventilation within potato storage buildings / Tegenaw P.D., Windels J., Van linden V., & Pieters J. In *22nd EAPR Triennial conference Book of abstracts: Sustainable Potato production: advances and applications of Potato Research*. 2024. Vol. 10. P. 801 URL: <https://pureportal.ilvo.be/nl/publications/towards-smart-potato-storage-using-cfd-modeling-and-simulation-to/> (date of access: 24.02.2026).
2. Towards integrated performance evaluation of future packaging for fresh produce in the cold chain / Defraeye T. et al. *Trends in Food Science & Technology*. 2015. Vol. 44, no. 2. P. 201–225. URL: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2015.04.008> (date of access: 27.02.2026).
3. Research on the temperature and humidity distribution characteristics in potato storage facilities: experimental analysis and numerical simulation / Zhen Q. et al. *Frontiers in Sustainable Food Systems*. 2025. Vol. 9. URL: <https://doi.org/10.3389/fsufs.2025.1594791> (date of access: 03.03.2026).
4. Modelling transport phenomena in refrigerated food bulks, packages and stacks: basics and advances / Verboven P. et al. *International Journal of Refrigeration*. 2006. Vol. 29, no. 6. P. 985–997. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ijrefrig.2005.12.010> (date of access: 03.03.2026).

¹ Аспірант 2 курсу Лазарев Є. С.

¹ Доц., к.т.н. Суходуб І. О.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=sHVLLBgAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОСОБЛИВОСТІ CFD МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ТЕПЛООБМІНУ В ТЕПЛОВИХ АКУМУЛЯТОРАХ НА ОСНОВІ PCM

Постановка проблеми та її актуальність. На сьогоднішній день однією з найбільш актуальних проблем у сфері енергетики є значний розрив між періодами генерації теплової енергії та часом її споживання, що зумовлює гостру потребу в ефективних системах акумулювання. Системи накопичення теплової енергії на основі матеріалів із фазовим переходом (PCM) мають значну перевагу над системами з чутливою (sensible) теплою завдяки високій щільності зберігання енергії та здатності працювати в квазіізотермічному режимі [1]. Актуальність CFD моделювання у цій сфері обумовлена складністю фізичних явищ, що відбуваються всередині теплового акумулятора. Чисельне моделювання дозволяє не лише візуалізувати динаміку руху фронту плавлення, а й оптимізувати конструкцію теплообмінників (використання оребрення, наночастинок або металевих пін) без проведення дорогих натурних експериментів [2].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження в області CFD моделювання теплових акумуляторів на основі PCM зосереджені на подоланні двох основних викликів: низької теплопровідності матеріалів та високої обчислювальної вартості нестационарних симуляцій. Значну частину досліджень складають приклади симуляції процесів плавлення й затвердіння PCM в акумуляторах типу shell-and-tube. Такі моделі є досить примітивними, але водночас дозволяють дослідити різні методи інтенсифікації теплообміну, покращення конструкції, а також впливу теплофізичних параметрів на процес зміни фаз.

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження особливостей з подальшою систематизацією знань, отриманих під час CFD моделювання теплових акумуляторів на основі PCM за допомогою пакету програмного забезпечення ANSYS Fluent.

Основна частина. В рамках наукової роботи по проектуванню теплового акумулятора з PCM була валідована CFD модель типу shell-and-tube на основі одного з наукових досліджень [3]. Розташування контрольних точок, що використовувались для порівняння результатів моделювання вихідної та побудованої моделей, зображено на рис. 1. Графіки залежності температури від часу наведені на рис. 2.

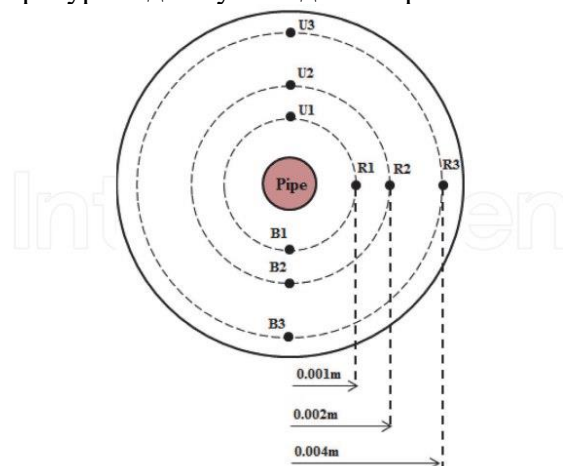


Рисунок 1 – Розташування контрольних точок по перерізу теплового акумулятора [3]

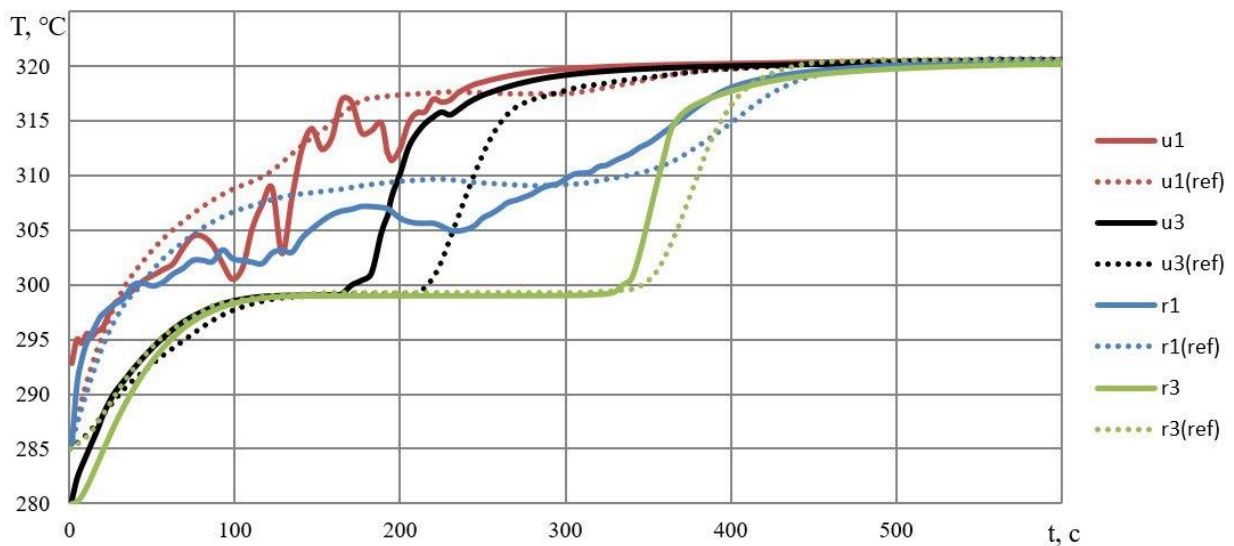


Рисунок 2 – Графік залежності температури від часу для вихідної та побудованої моделі

На основі досвіду, отриманого в рамках CFD моделювання, в даній роботі висвітлено ключові особливості та фактори, що впливають на симуляцію фазового переходу в теплових акумуляторах.

Основним підходом до CFD моделювання теплових акумуляторів є метод ентальпії-пористості (Enthalpy-Porosity method). У цьому методі межа розділу фаз не відстежується явно, а визначається через частку рідкої фази (позначається як β) у кожній розрахунковій комірці [4]. У моделі ентальпії-пористості прихована теплота задається наступним рівнянням:

$$\Delta H = \beta L, \quad (1)$$

де $\beta = 0$ за умови $T < T_{\text{solidus}}$;

$$\beta = \frac{T - T_{\text{solidus}}}{T_{\text{liquidus}} - T_{\text{solidus}}} \text{ за умови } T_{\text{solidus}} < T < T_{\text{liquidus}};$$

$$\beta = 1 \text{ за умови } T > T_{\text{liquidus}}.$$

Отже, значення прихованої теплоти коливається в межах від нуля для твердої фази до величини L для рідкого стану речовини. Застосування цього підходу вимагає ретельного аналізу двох ключових аспектів: зміни густини фазоперехідного матеріалу та особливостей розрахунку швидкості руху твердої фази. Окрім цього, на межі поділу рідкої та твердої фаз може виникати ефект чисельної дифузії, інтенсивність якої безпосередньо залежить від кроку розрахункової сітки. Розв'язати цю проблему можна шляхом інтеграції базової методики з прогресивними обчислювальними алгоритмами, наявними в ANSYS Fluent, зокрема методами адаптивного ущільнення сітки.

Однією з найбільш критичних особливостей є задання так званої константи кашоподібної зони (Mushy Zone Constant, A_{mush}), яка входить у рівняння збереження імпульсу. Вона описує падіння швидкості в зоні, де матеріал знаходиться у напіврідкому стані. Хоча стандартне значення в багатьох пакетах (в тому числі, ANSYS Fluent) становить 10^5 , дослідження показують, що зміна A_{mush} у діапазоні від 10^4 до 10^8 суттєво змінює профіль швидкостей та час плавлення [5]. Результати моделювання свідчать, що параметр A_{mush} відіграє критичну роль у точності моделювання теплопередачі під час фазових переходів. Зокрема, встановлено, що підвищення значень A_{mush} призводить до уповільнення швидкості плавлення, тоді як надто низькі показники цього параметра спричиняють фізично некоректні прогнози щодо формування та просування фронту плавлення.

На відміну від твердофазних моделей, CFD моделювання РСМ повинно враховувати сили плавучості в рідкій фазі. Нехтування конвекцією в CFD моделі призводить до значних похибок (до 50 %), оскільки після розплавлення 15–20 % об'єму матеріалу теплоперенос

починає в значній мірі визначатися рухом рідини, а не теплопровідністю. Для конфігурації залежності щільності PCM від температури зазвичай використовується наближення Буссінеска, яке пов'язує зміну густини зі зміною температури [6]. Основною причиною використання моделі Буссінеска є відносно малі значення зміни об'єму PCM в процесі фазового переходу. Водночас, завдання лінійної або поліноміальної залежності густини від температури є альтернативними підходами та можуть бути використані за умови наявності таблиць із конкретними значеннями, які отримані експериментальним шляхом.

Не менш важливим фактором, який необхідно враховувати під час побудови моделі та на етапі планування безпосередньо процесу моделювання, є дискретизація за часом та сіткою. Через високу нелінійність процесу, CFD моделювання PCM потребує дуже малих кроків за часом (time steps) – часто порядку 0.01...0.1 с – для забезпечення збіжності рівняння енергії на межі розділу фаз. Особливо важливим крок за часом є на початкових етапах моделювання, коли після відносно короткого періоду кондукційного теплообміну по об'єму PCM починається фаза активного плавлення, в результаті чого нев'язки стрибкоподібно змінюються, що може давати значну похибку розрахунку. Також критичною є густина сітки поблизу стінок теплового акумулятора, де градієнти температур є максимальними.

Висновки. В ході аналізу особливостей CFD моделювання процесів теплообміну в акумуляторах на основі PCM було встановлено, що точність прогнозування роботи таких систем залежить від коректного врахування великої кількості факторів. Деякими з них є метод ентальпії-пористості, природної конвекції, завдання кроку по часу та вибору оптимальної щільності сітки, вибір оптимального значення константи кашоподібної зони.

Перелік посилань:

1. Review on thermal energy storage with phase change materials and applications / Sharma A. et al. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2009. Vol. 13, no. 2. P. 318–345. URL: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2007.10.005>.
2. Zivkovic B., Fujii I. An analysis of isothermal phase change of phase change material within rectangular and cylindrical containers. *Solar Energy*. 2001. Vol. 70, no. 1. P. 51–61. URL: [https://doi.org/10.1016/s0038-092x\(00\)00112-2](https://doi.org/10.1016/s0038-092x(00)00112-2).
3. Mohammad Al-Maghalseh M. CFD Model of Shell-and-Tube Latent Heat Thermal Storage Unit Using Paraffin as a PCM. *Paraffin - Thermal Energy Storage Applications [Working Title]*. 2021. URL: <https://doi.org/10.5772/intechopen.95847>.
4. Numerical methods for solid-liquid phase-change problems / Zeneli M. et al. *Ultra-High Temperature Thermal Energy Storage, Transfer and Conversion*. 2021. P. 165–199. URL: <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-819955-8.00007-7>.
5. Kheirabadi A. C., Groulx D. THE EFFECT OF THE MUSHY-ZONE CONSTANT ON SIMULATED PHASE CHANGE HEAT TRANSFER. *Proceedings of CHT-15. 6th International Symposium on ADVANCES IN COMPUTATIONAL HEAT TRANSFER*, May 25-29, 2015, Rutgers University, New Brunswick, NJ, USA, Antalya, Turkey, 13–19 June 2015. Connecticut, 2015. URL: <https://doi.org/10.1615/ichmt.2015.intsympadvcompuheattransf.460>.
6. How to simulate phase change material melting? A critical look at different methods with different levels of accuracy and difficulty / H. Nemati et al. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*. 2023. Vol. 46, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1007/s40430-023-04620-0>.

¹ Аспірант 2 курсу Левицький О. О.

¹ Проф., д.т.н. Дешко В. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=WZNfhfgAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ТЕПЛОТЕХНІЧНИЙ МОНІТОРИНГ РЕЖИМІВ ОХОЛОДЖЕННЯ КОМЕРЦІЙНИХ ПРИМІЩЕНЬ ПРИ ТЕРМОМОДЕРНІЗАЦІЇ: ПІДХІД ТА СТРУКТУРА ДАНИХ

Постановка проблеми та її актуальність. Термомодернізація будівель комерційного призначення спрямована насамперед на зниження тепловтрат через огорожувальні конструкції. Утеплення зовнішніх стін, заміна вікон, герметизація повітропроникних елементів дозволяють скоротити витрати на опалення. Водночас зменшення трансмісійних втрат змінює тепловий баланс будівлі в теплий період року: внутрішні теплопоступлення від обладнання, освітлення та людей, що раніше частково розсіювались через огороження, накопичуються інтенсивніше. Для комерційних об'єктів з високою щільністю теплових джерел це призводить до зростання навантаження на системи охолодження [1, 3]. Аналогічний ефект зафіксовано при аналізі споживання супермаркету у Великобританії: підвищення зовнішньої температури збільшує потребу в електроенергії на охолодження, тоді як витрати на газове опалення знижуються [4]. В Україні, де близько 80 % будівельного фонду має низьку теплоефективність [2, 10], масштабна термомодернізація неминуче актуалізує проблему режимів охолодження.

Аналіз останніх досліджень. Питання прогнозування енергоспоживання будівель активно досліджується із застосуванням як класичних регресійних моделей (множинна регресія, ARIMA, SVR), так і нейромережових підходів (MLP, LSTM, CNN). Огляди [1, 3, 5] підтверджують перевагу data-driven методів для оперативного прогнозування. Гібридні моделі, зокрема ARIMA+LSTM, забезпечують зниження похибки порівняно з окремими підходами [6]. Дослідження [7] продемонструвало, що врахування даних про присутність людей у LSTM-моделі дозволяє досягти похибки прогнозу на рівні 2 %, що значно менше, ніж при використанні ARIMA. Концепція цифрових двійників [9] передбачає інтеграцію фізичних моделей із потоками даних реального часу для моніторингу і оптимізації режимів роботи інженерних систем. Разом із тим, більшість робіт зосереджена на опалювальному періоді або на загальному електроспоживанні. Дослідження, орієнтовані саме на режими охолодження комерційних будівель після термомодернізації, залишаються нечисленними. Суттєвою перешкодою є відсутність якісних датасетів з достатньою дискретністю і повним набором параметрів, що впливають на теплопоступлення.

Формулювання мети. Метою роботи є обґрунтування підходу до теплотехнічного моніторингу режимів охолодження комерційних приміщень при термомодернізації та формування структури даних, придатної для подальшого навчання прогнозних моделей і побудови цифрового двійника будівлі.

Задачі включають: визначення переліку контрольованих параметрів та обґрунтування їх вибору з позиції теплотехніки; розробку вимог до дискретизації, синхронізації та контролю якості часових рядів; аналіз способів отримання непрямих індикаторів заповненості приміщень.

Об'єкт дослідження – комерційна будівля, що пройшла або проходить термомодернізацію огорожувальних конструкцій. **Предмет дослідження** – методологія збору та структурування даних моніторингу для аналізу і прогнозування режимів охолодження.

Основна частина. Перелік контрольованих параметрів визначено виходячи з основних складових теплового балансу приміщення в режимі охолодження. Температура зовнішнього повітря є визначальним фактором для оцінки теплопоступлень через огороження і вентиляцію. Вологість повітря (зовнішня і внутрішня) необхідна для розрахунку повної ентальпії та прихованого теплового навантаження, що має значення для підбору і режимів роботи систем кондиціонування. Температура внутрішнього повітря в контрольних зонах фіксує відхилення від заданих параметрів мікроклімату.

Рівень освітленості використовується як побічний індикатор інтенсивності сонячної радіації, що надходить через засклення, оскільки сонячні теплопоступлення є одним із вагомих компонентів теплового балансу комерційних будівель у літній період. Додатково передбачено реєстрацію стану дверей та вікон для оцінки інфільтраційної складової повітрообміну.

Концентрація CO₂ у внутрішньому повітрі включена до програми моніторингу як непрямий індикатор присутності людей (осцирансу гроху). Дослідження [7] підтвердило, що врахування даних про заповненість приміщень суттєво підвищує точність прогнозування енергоспоживання. Для комерційних об'єктів графік заповнення є нерегулярним і не може бути описаний детермінованою функцією. Концентрація CO₂ корелює з кількістю осіб і, відповідно, з інтенсивністю метаболічних теплопоступлень та теплопоступлень від обладнання, що працює в присутності людей. Такий підхід є менш інвазивним порівняно з відеоспостереженням і не потребує обробки персональних даних. Реєстрація енергоспоживання системи охолодження доповнює картину як результуючий параметр, що підлягає прогнозуванню.

Вимоги до структури даних сформульовано з огляду на потреби навчання рекурентних нейромереж. Інтервал дискретизації прийнято 15 хвилин, що забезпечує фіксацію перехідних процесів при зміні режимів роботи систем охолодження та достатній обсяг спостережень для навчання моделей (96 записів на добу по кожному каналу). Всі канали синхронізуються за єдиною часовою міткою (timestamp). Передбачено процедури попередньої обробки: виявлення та інтерполяція пропусків, фільтрація аномальних значень медіанним фільтром, перевірка стаціонарності рядів. Формат збереження передбачає табличну структуру з уніфікованими ідентифікаторами зон та каналів. Калібрування датчиків проводиться відповідно до паспортних характеристик і додатково контролюється шляхом порівняння дублюючих вимірювань.

Очікувані результати та практична цінність. Сформований масив даних планується використати для навчання гібридних прогнозних моделей, що поєднують статистичний компонент ARIMA з нейромережовим компонентом LSTM. Такий підхід, за даними [6], дозволяє описувати як лінійні тренди, так і нелінійні залежності у часових рядах. На основі результатів моніторингу передбачається побудова цифрового двійника будівлі [9], що забезпечить моделювання реакції теплового стану на зміну зовнішніх умов та внутрішніх навантажень. Інтеграція цифрового двійника із системою керування мікрокліматом створює передумови для реалізації предиктивного керування охолодженням, аналогічного до підходу, що продемонстрував зниження витрат на кондиціонування дата-центрів Google на 40 % [8]. Практична цінність роботи полягає у формуванні методологічної бази для збору даних, що можуть бути використані як еталонний датасет для задач прогнозування і оптимізації режимів охолодження комерційних будівель після термомодернізації.

Висновки. Запропоновано підхід до теплотехнічного моніторингу режимів охолодження комерційних приміщень, що пройшли термомодернізацію. Визначено перелік параметрів, обґрунтований складовими теплового балансу: температура і вологість повітря (зовнішнього та внутрішнього), рівень CO₂ як індикатор заповненості, освітленість як показник сонячних теплопоступлень, стан огорожувальних прорізів та енергоспоживання. Сформульовано вимоги до дискретизації (15 хв), синхронізації та контролю якості часових

рядів. Описана структура даних орієнтована на подальше застосування в задачах навчання гібридних прогнозних моделей та побудову цифрового двійника будівлі.

Перелік посилань:

1. Yin Q., Han C., Li A., Liu X., Liu Y. A Review of Research on Building Energy Consumption Prediction Models Based on Artificial Neural Networks. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 17. P. 7805. DOI: 10.3390/su16177805.
2. Білоус І. Ю. Математичні моделі для підвищення енергоефективності в будівлі як енергетичній системі: дис. канд. техн. наук. НТУУ «КПІ ім. Ігоря Сікорського». Київ, 2018.
3. Liu H., Liang J., Liu Y., Wu H. A Review of Data-Driven Building Energy Prediction. *Buildings*. 2023. Vol. 13, no. 2. P. 532. DOI: 10.3390/buildings13020532.
4. Braun M. R., Altan H., Beck S. B. M. Using regression analysis to predict the future energy consumption of a supermarket in the UK. *Applied Energy*. 2014. Vol. 130. P. 305–313. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.05.062.
5. Mohandes S. R., Zhang X., Mahdiyar A. A comprehensive review on the application of artificial neural networks in building energy analysis. *Neurocomputing*. 2019. Vol. 340. P. 55–75. DOI: 10.1016/j.neucom.2019.02.040.
6. Pierre A. A., Akim S. A., Semenyio A. K., Babiga B. Peak Electrical Energy Consumption Prediction by ARIMA, LSTM, GRU, ARIMA-LSTM and ARIMA-GRU Approaches. *Energies*. 2023. Vol. 16, no. 12. P. 4739. DOI: 10.3390/en16124739.
7. Anan M., Kanaan K., Benhaddou D., Nasser N. Occupant-Aware Energy Consumption Prediction in Smart Buildings Using a LSTM Model and Time Series Data. *Energies*. 2024. Vol. 17, no. 24. P. 6451. DOI: 10.3390/en17246451.
8. Evans R., Gao J. DeepMind AI Reduces Google Data Centre Cooling Bill by 40 %. Google DeepMind Blog, 2016. URL: <https://deepmind.google/discover/blog/deepmind-ai-reduces-google-data-centre-cooling-bill-by-40/>.
9. Arsecularatne B., Rodrigo N., Chang R. Digital Twins for Reducing Energy Consumption in Buildings: A Review. *Sustainability*. 2024. Vol. 16, no. 21. P. 9275. DOI: 10.3390/su16219275.
10. Bilous I., Deshko V., Sukhodub I. Parametric analysis of external and internal factors influence on building energy performance using non-linear multivariate regression models. *Journal of Building Engineering*. 2018. Vol. 20. P. 327–336. DOI: 10.1016/j.jobee.2018.07.021.

¹ Аспірант 2 курсу Політикін М. В.

¹ Викл., к.т.н. Яценко О. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=LRiP-5AAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИКОРИСТАННЯ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА БАГАТОКВАРТИРНОГО ЖИТЛОВОГО БУДИНКУ ДЛЯ ДИНАМІЧНОГО НАЛАШТУВАННЯ СИСТЕМИ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Масове впровадження індивідуальних теплових пунктів (ІТП) в Україні не супроводжується системним динамічним налаштуванням їх роботи. Значна частина ІТП експлуатується без адаптивного налаштування: за даними галузевих експертів, близько 90 % встановлених ІТП в Україні не мають коректного налаштування погодної кривої та гідравлічного балансування. Регулювання зазвичай здійснюється за типовою погодною кривою без урахування теплової інерційності будівлі та фактичного гідравлічного стану системи. Унаслідок цього формується реактивна модель управління – «регулювання за скаргами», що призводить до перетопів, перевитрат теплової енергії та зниження очікуваного економічного ефекту модернізації. Це обумовлює актуальність розроблення адаптивних підходів до налаштування ІТП з урахуванням реальних умов експлуатації. Актуальність дослідження також зумовлена законодавчими змінами щодо обов'язкового встановлення ІТП у будівлях, приєднаних до систем централізованого теплопостачання [1].

Аналіз останніх досліджень. Динамічне енергетичне моделювання будівель активно розвивається у світовій практиці. У роботі [2] підтверджено важливість урахування погодинної зміни параметрів для підвищення точності прогнозування, а автори [3] розглядають цифровий двійник як інструмент аналізу взаємодії «людина–будівля». Водночас питання застосування цифрового двійника для оптимального налаштування ІТП та його масштабування на рівень муніципалітетів залишається недостатньо дослідженим.

Формулювання мети. Метою дослідження є обґрунтування та розроблення методу використання цифрового двійника типового багатоквартирного будинку для динамічного керування системою теплопостачання, що забезпечує усунення вертикального температурного дисбалансу, зниження перевитрат тепла та створення масштабованої платформи для муніципального енергоменеджменту.

Дослідження орієнтоване на 14 типових серій житлових будинків (1–438, 96, КТ, АППС тощо), які охоплюють приблизно половину загального житлового фонду, до 75–85 % міського багатопверхового житла та формують більшість (понад 65 %) споживання теплової енергії у житловому секторі.

Основна частина. Об'єктом дослідження є 16-поверховий житловий будинок 2004 р. (75 квартир, 6574 м²) з однозонною вертикальною двотрубною системою опалення та нижнім підведенням теплоносія. Система енергозабезпечення включає ІТП, тепловий насос «повітря–вода» (25 кВт тепла, 7 кВт електрична), баки–акумулятори 2 м³, сонячну електростанцію 30,6 кВт та акумуляторні батареї 90 кВт·год.

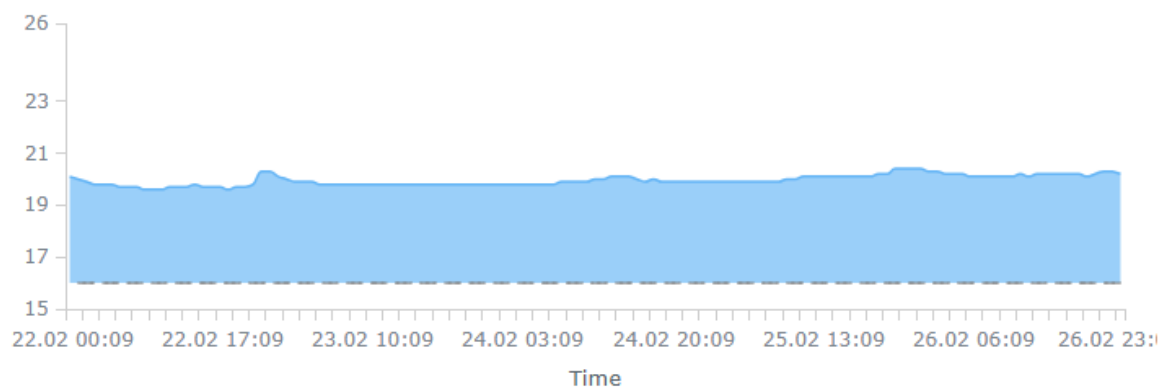
Для дослідження фактичного теплового режиму будівлі було організовано експериментальний моніторинг внутрішніх температур у квартирах. Температурні датчики встановлено на 9-му та 16-му поверхах, що забезпечило контроль у п'яти репрезентативних точках та дозволило оцінити вертикальний розподіл температури й вплив гідравлічного режиму на тепловий комфорт. Розташування датчиків на поверхах представлено на рис. 1.



Рисунок 1 – Точки контролю температури приміщень

Вимірювання проводилися з інтервалом 2–5 хв протягом опалювального періоду. Графіки динаміки зміни внутрішньої температури представлені на рис. 2.

Зміна температури Кв. 36



Зміна температури Кв. 72

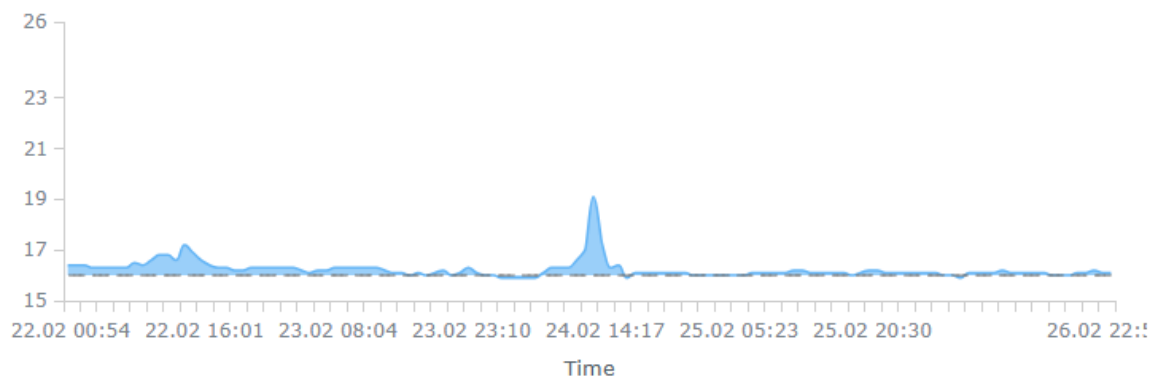


Рисунок 2 – Графіки температури приміщень за вибраний період

Отримані часові ряди дозволили визначити середні температури, добові коливання та характер реакції системи на зміну температури зовнішнього повітря. Середні температури зафіксовані на поверххах представлені на рис. 3.

Виявлено вертикальний температурний дисбаланс до 7 °C: на 2-му поверсі середня температура становила 22,6–23,4 °C, тоді як на 16-му вона становила 16–17 °C. Отримані результати свідчать про суттєве порушення рівномірності теплопостачання по висоті будівлі. Основною причиною дисбалансу є втручання мешканців у систему (демонтаж регулювальної арматури, заміна опалювальних приладів) та порушення проєктного гідравлічного режиму.

Традиційний підхід до вирішення проблеми полягає у тому, що при скаргах верхніх поверхів теплопостачальна організація підвищує температуру подачі на 5–10 °C. Це призводить до того, що верхні поверхи досягають 20–21 °C, тоді як на нижніх поверхах

температура зростає до 24–26 °С. Паралельно спостерігається зростання загального теплоспоживання на 12–18 % та підвищення температури зворотного теплоносія, що свідчить про неефективність такого підходу.

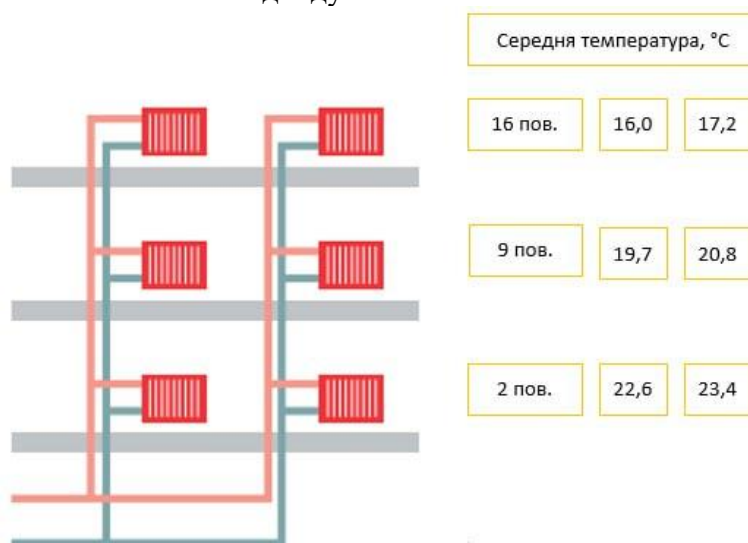


Рисунок 3 – Середні значення температури приміщень на 2, 9 та 16 поверхах

У альтернативному сценарії з цифровим контролем використання цифрового двійника дозволяє оптимізувати погодну криву, обмежувати теплову потужність відповідно до фактичної енергопотреби, мінімізувати перетопи та виконувати M&V–верифікацію досягнутого ефекту. Варто зауважити, що впровадження такого цифрового контролю потребує встановлення датчиків температури в квартирах і є початковою умовою для калібрування моделі. Після визначення параметрів теплової інерційності типових серій будинків модель може застосовуватися без встановлення датчиків у кожній квартирі.

Параметризація цифрових двійників типових серій дасть можливість муніципалітетам автоматизувати розрахунок техніко–економічного обґрунтування, визначати пріоритетність модернізації, прогнозувати бюджет та контролювати досягнення ефекту. Таким чином, цифровий двійник перетворюється з інженерного інструменту на платформу муніципального енергоменеджменту.

Висновки. Запропонований підхід забезпечує перехід від статичного налаштування ІТП до прогнозно–адаптивного управління на основі реальних даних. Показано, що реактивне підвищення параметрів подачі призводить до перевитрат тепла на 12–18 %. Використання цифрового двійника дозволяє мінімізувати вертикальний дисбаланс, забезпечити комфорт без перетопів та реалізувати цифрову верифікацію ефекту.

Створення бібліотеки цифрових двійників типових серій формує основу для масштабного впровадження в межах територіальних громад і цифрової трансформації систем тепlopостачання.

Перелік посилань:

1. Проект Закону про внесення змін до деяких законів України щодо підтримки розвитку ефективного та сталого централізованого тепlopостачання : Законопроект №14067.
2. Evaluation of energy use for heating in residential building under the influence of air exchange modes / V. Deshko et al. *Journal of Building Engineering*. 2021. Vol. 42. P. 103020. URL: <https://doi.org/10.1016/j.jobbe.2021.103020>.
3. Gnecco V. M., Vittori F., Pisello A. L. Digital Twins for decoding human-building interaction in multi-domain test-rooms for environmental comfort and energy saving via Graph Representation. *Energy and Buildings*. 2022. P. 112652. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2022.112652>.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІ РЕЖИМИ РОБОТИ СИСТЕМИ ВЕНТИЛЯЦІЇ ЖИТЛОВОЇ БУДІВЛІ

Постановка проблеми та її актуальність. Системи вентиляції житлових будівель забезпечують прийнятну якість внутрішнього повітря, однак водночас формують значну частку річної енергопотребі будівлі через вентиляційні тепловтрати в опалювальний період та додаткові навантаження на охолодження в теплий період. Перехід до більш герметичних огорожувальних конструкцій підвищує роль керованої вентиляції, а отже актуальним є пошук режимів роботи, які забезпечують заданий рівень CO_2 при мінімальних витратах енергії.

Аналіз останніх досліджень. Одним із найбільш ефективних підходів до зниження енергоспоживання вентиляції є керування за попитом (від Demand controlled ventilation – DCV), зокрема за концентрацією CO_2 як індикатором присутності та інтенсивності повітрообміну. Додатковий потенціал економії забезпечує рекуперація теплоти витяжного повітря, яка зменшує потребу в опаленні без погіршення якості внутрішнього повітря. Практично важливою є кількісна оцінка компромісу між «жорсткістю» порога CO_2 (800–1500 ppm), кратністю повітрообміну та сумарною енергопотребою.

Формулювання мети. Метою роботи є оцінювання енергоефективності режимів роботи вентиляції житлової будівлі з DCV за рівнем CO_2 (рівні 800 / 900 / 1000 / 1500 ppm) та визначення впливу рівня CO_2 та рекуперації теплоти на річну енергопотребу на опалення, охолодження та роботу вентиляторів і насосів.

Основна частина. Дослідження проведені для енергетичної моделі будівлі гуртожитку № 5 КПІ ім. І. Сікорського.

На рис. 1 наведено добові профілі для базового режиму без регулювання рівня CO_2 та сценаріїв DCV. У базовому режимі спостерігається підвищений повітрообмін з вечора до ранку ($n \approx 0,55 \text{ год}^{-1}$) [1] та мінімальний рівень у денний період ($n \approx 0,11 \text{ год}^{-1}$). У режимах DCV характерним є зменшення середньої кратності повітрообміну та адаптація подачі/витяжки до умов, що задаються порогом CO_2 : середньодобова кратність повітрообміну знижується з 0,39 (без регулювання) до 0,2 / 0,17 / 0,14 / 0,11 год^{-1} для рівнів 800 / 900 / 1000 / 1500 ppm, відповідно. Падіння кратності повітрообміну в години з 9:00 до 18:00 пояснюється застосування графіку роботи вентиляції, коли в даний час люди залишають будівлю для навчання або роботи.

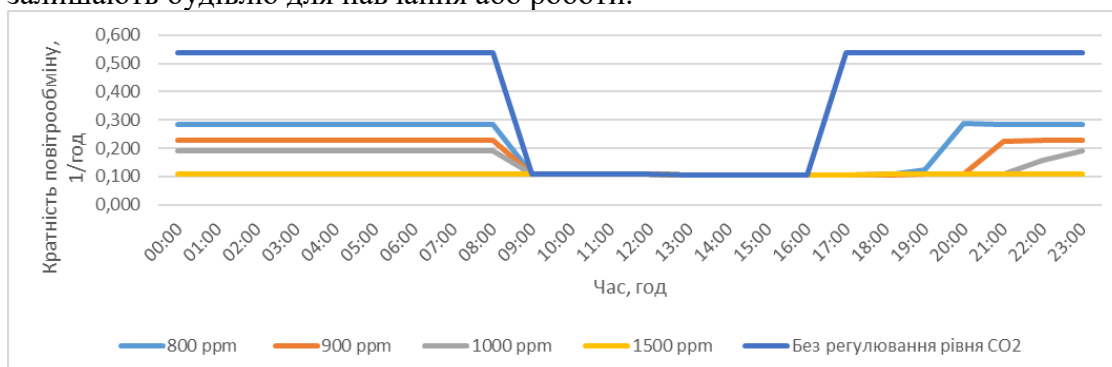


Рисунок 1 – Добові профілі кратності повітрообміну

Енергетичні показники для сценаріїв без рекуперації теплоти наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Річна енергопотреба за різних режимів DCV (без рекуперації теплоти)

Режим	Опалення, кВт·год	Охолодження, кВт·год	Вентилятори і насоси, кВт·год	Разом, кВт·год	Кратність повітрообміну, год ⁻¹
Без регулювання рівня CO ₂	354062,7	9511,9	35223,1	398797,6	0,39
800 ppm	200088,8	16946,7	34893,2	251928,8	0,20
900 ppm	170375	19163,4	34889	224427,4	0,17
1000 ppm	151263,3	20836,93	34892,9	206993,1	0,14
1500 ppm	122092,2	24360,8	34895	181347,9	0,11

Керування вентиляцією за рівнем CO₂ суттєво зменшує середню кратність повітрообміну: з 0,39 до 0,11 год⁻¹, що напряду корелює зі зниженням потреби в опаленні. У сценаріях без рекуперації (табл. 1) сумарна річна енергопотреба зменшується з 398797,6 кВт·год до 181347,9 кВт·год (рівень 1500 ppm), тобто на 54,5 %. Головний внесок дає зниження енергопотреби в опаленні з 354062,7 до 122092,2 кВт·год. В той же час зростають витрати на охолодження (з 16950,8 до 24360,8 кВт·год), що відображає енергетичний компроміс між інтенсивністю вентиляції та літнім тепловим режимом. Енергопотреба вентиляторів і насосів змінюється мало ($\approx 34,8$ – $35,2$ тис. кВт·год/рік), тому сумарна економія визначається переважно тепловою складовою.

Окремо було розглянуто варіант із впровадженням рекуперації теплоти (табл. 2), що дозволяє оцінити додатковий ефект від повернення теплоти витяжного повітря.

Таблиця 2 – Річна енергопотреба: базовий режим із рекуперацією та режими DCV

Режим	Опалення, кВт·год	Охолодження, кВт·год	Вентилятори і насоси, кВт·год	Разом, кВт·год	Кратність повітрообміну, год ⁻¹
Без регулювання рівня CO ₂	354062,7	9511,9	35223,1	398797,6	0,39
Без регулювання рівня CO ₂ з рекуперацією теплоти	193651,4	9512,1	34684,4	237847,8	0,39
800 ppm	146349,7	16950,8	34768,2	198068,6	0,20
900 ppm	137155,5	19169,6	34799,1	191124,2	0,17
1000 ppm	131252,2	20843,5	34825,6	186921,3	0,14
1500 ppm	122092,2	24360,8	34895	181347,9	0,11

Застосування рекуперації теплоти в режимі без регулювання рівня CO₂ зменшує сумарну енергопотребу з 398797,6 до 237847,8 кВт·год (економія 40,4 %) за рахунок зниження енергопотреби на опалення. Додатково DCV забезпечує зменшення сумарної енергопотреби відносно режиму без регулювання рівня CO₂ з рекуперацією ще на 16,7–23,8 % (для 800–1500 ppm).

Висновки. Показано, що енергоефективний режим роботи вентиляції житлової будівлі доцільно реалізовувати як DCV за CO₂ із вибором рівня, який відповідає вимогам до якості внутрішнього повітря. За наданими результатами моделювання зменшення середньої кратності повітрообміну з 0,39 до 0,11 год⁻¹ дозволяє скоротити сумарну річну енергопотребу до 55 % від базового випадку. Рекуперація теплоти забезпечує значну додаткову економію, особливо в опалювальний період, тому комбінація DCV + рекуперація є найбільш перспективною для житлових будівель.

Перелік посилань:

1. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція та кондиціонування PDF [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>.

СЕКЦІЯ №7

Автоматизація енергетичних процесів

¹ Магістрант 1 курсу Бердниченко Р. М.

¹ Доц., к.т.н. Батюк С. Г.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=cWaZ5o4AAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОЄКТНЕ І AD-НОС ІМІТАЦІЙНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ОПЕРАЦІЙНО ЕФЕКТИВНОЇ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ ТЕПЛОВОГО РЕЖИМУ ПРОМИСЛОВОЇ ТОПКИ

Постановка проблеми. Операційно ефективна САР (ОЕСАР) – це САР, розроблена з урахуванням обмежень на реальні умови функціонування автоматизованого технологічного комплексу (АТК = ТОУ + АСУ). ОЕСАР має працювати як можна довше (тобто, має мати відносно малу технічну складність) і в безлюдному режимі (тобто, не має потребувати постійного обслуговування і переналагодження). Це означає, що ОЕСАР має бути лінійною (що забезпечує відтворюваність перехідних процесів) і малочутливою до параметричних збурень (тобто, є пасивно адаптивною за рахунок відносно великого запасу сталості замкненої САР і не потребує періодичної активної адаптації). Найважливішим з вказаних чинників є принципова вимога лінійності САР (лінійність ОУ і регулюючого органу (РО); лінійність регулятора). ОЕСАР мають бути автономні. Ніяких компенсаційних зв'язків між окремими САР не має бути. Взаємні впливи САР розглядаються як шкідливі збурення, які мають бути компенсовані самою САР. Для прискорення швидкодії може бути реалізований принцип «один регульований параметр – дві регульовальні дії» (якщо є така технологічна можливість). Універсальною ОЕСАР є каскадна САР. За необхідності, вона легко може бути редукована до одноконтурної САР. З цієї причини рекомендується використовувати в ПЛК функціональний макроблок каскадної АСР з відповідною логікою вибору алгоритму.

Імітаційне моделювання АТК – це програмно-технічне моделювання контролерної і супервізорної функціональності АСУ з використанням програмних (не фізичних і не математичних) моделей (цифрових двійників) ТОУ. Функціональне імітаційне моделювання динамічної системи – імітаційне моделювання функцій динамічної системи. Структурне імітаційне моделювання динамічної системи – моделювання взаємодії структурних частин динамічної системи. Імітаційне моделювання АТК є ефективним інструментарієм для перевірки роботоздатності і налагодження АСУ за відсутності доступу до реального фізичного ТОУ і неможливості розрахунку динаміки систем автоматичного регулювання з використанням складних математичних моделей ТОУ. Імітаційне моделювання АТК використовується на стадіях проєктування (розробки і програмування), впровадження, тиражування і модернізації АСУ. ТОУ моделюється або в системі комп'ютерної математики (СКМ), або прямо в самому ПЛК. Реалізація людино-машинного інтерфейсу (ЛМІ) – зовнішня SCADA-система або НМІ-панель самого ПЛК. Реалізація ПЛК – хардПЛК (реальний фізичний ПЛК) або софтПЛК (програмно реалізований в комп'ютері ПЛК).

Вирізняють: імітаційне SIL-моделювання АТК (Software-In-the-Loop: софтПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована в СКМ; ЛМІ – зовнішня SCADA-система); імітаційне HIL-моделювання АТК (Hardware-In-the-Loop: хардПЛК в колі зворотного зв'язку; модель ТОУ реалізована прямо в хардПЛК; ЛМІ – НМІ-панель самого хардПЛК); імітаційне VIL-моделювання АТК (Viewer-In-the-Loop: модель ТОУ, ПЛК і ЛМІ реалізовані в НМІ/SCADA-системі).

Ad-нос моделювання (латиною «ad hoc» – «для цього») – імітаційне моделювання «в реальному часі в процесі роботи» – онлайн моделювання на основі HIL/VIL-моделювання

для моделювання САР відповідно в ПЛК і в HMI/SCADA-системі з метою вирішення конкретної унікальної задачі, а не для загального використання або у широкому застосуванні (проектне або офлайн моделювання САР на основі SIL-моделювання) в техно-робочому проектуванні.

Аналіз проблеми. Тепловий режим промислової топки включає температурний режим, режим згоряння палива, гідравлічний (аеродинамічний) режим:

1. Температурний режим топки. Заданий графік температур димових газів за довжиною топки. Для багатозонної топки – уставки температур димових газів в зонах топки. Для однозонної топки – уставка температури димових газів. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати палива через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати палива через пальник зони печі – зміна температури димових газів в зоні печі». САР температурного режиму – зональні САР температур топки;

2. Режим економічності згоряння палива. Заданий графік значень співвідношення повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря за довжиною печі. Для багатозонної топки – уставки співвідношень повітря/паливо або коефіцієнтів надлишку повітря в зонах топки. Для однозонної топки – уставка співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі. Регулююча дія для кожної зони печі – зміна витрати повітря через пальник зони печі. ОУ для кожної зони печі – канал передачі дії «зміна витрати повітря через пальник зони печі – зміна співвідношення повітря/паливо або коефіцієнту надлишку повітря в зоні печі». САР режиму економічності згоряння палива – зональні САР співвідношення повітря/паливо;

3. Гідравлічний режим топки. Задане значення (уставка) розрідження в топці печі (у димовому борові печі). Регулююча дія (загальна для усієї печі) – зміна витрати димових газів з печі (зміна частоти обертання димососу). ОУ – канал передачі дії «зміна частоти обертання димососу – зміна розрідження в димовому борові печі». Основним збуренням (за навантаженням) є зміна витрати повітря, так як його витрата приблизно в 10 разів більше за витрату палива. САР гідравлічного режиму – САР розрідження в топці (в одній точці топки).

САР теплового режиму топки – це САР зональних температур, плюс САР зогнальних співвідношень повітря/паливо, плюс САР розрідження в топці (в одній точці топки). Типовою САР теплового режиму промислової топки є класична одноконтурна САР теплового режиму (САР з 3-ма регуляторами). В умовах збурень зі сторони РО ефективною є класична каскадна САР теплового режиму (САР з 4-ма регуляторами). Сучасні засоби автоматизації (а саме ПЛК) дають можливість реалізувати каскадну САР теплового режиму з паралельною роботою регуляторів (САР з 6-ма регуляторами). САР з 6-ма регуляторами реалізує принцип регулювання «один регульований параметр – декілька (дві плюс) регульовальних дій», що дозволяє синхронізувати перехідні процеси стабілізації регульованих параметрів, що покращує якість стабілізації критичних параметрів (для САР теплового режиму таким є співвідношення повітря/паливо, яке визначає якість згоряння палива в топці).

На кафедрі АЕП розроблений полігон функціонального імітаційного моделювання каскадної САР теплового режиму промислової топки [1]. Змоделювана і досліджена САР теплового режиму. Змодельовані і досліджені одноконтурна САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами, каскадна САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами і каскадну САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Зроблений порівняльний аналіз цих САР. Розроблені рекомендації з використання цих САР для регулювання теплового режиму промислових топко.

Постановка завдання. Практична реалізація каскадних САР теплового режиму топко промислових печей є актуальною задачею промислової автоматизації. Особливо актуальним є аналіз можливостей практичного застосування каскадних САР теплового режиму топки з паралельною роботою регуляторів температури, розрідження і співвідношення повітря/паливо для забезпечення ефективного згоряння палива в топці.

Можливість ефективної практичної реалізації каскадних САР теплового режиму топки має бути перевірена проєктним і ад-хок структурним імітаційним моделюванням каскадних САР теплового режиму топки. Особлива увага має бути надана ад-хок моделюванню каскадної САР теплового режиму в польових умовах впровадження, експлуатації і модифікації розроблених САР теплового режиму топки.

Дослідження і аналіз. Виконане проєктне і ад-хок структурне імітаційне моделювання САР теплового режиму промислової топки: одноконтурної САР теплового режиму топки з 3-ма регуляторами; каскадної САР теплового режиму топки з 4-ма регуляторами; каскадної САР теплового режиму топки з 6-ма регуляторами. Проєктне моделювання виконане в програмно-технічному SIL-симуляторі на платформі Simulink – CoDeSys – WebStudio. Ад-хок моделювання виконане в програмно-технічному HIL-симуляторі на платформі софтПЛК CoDeSys.

Результати і висновки. Практичний досвід проєктного і ад-хок моделювання САР теплового режиму топки на розроблених відповідно SIL-полігоні і HIL-полігоні САР, дослідження змодельованих САР щодо сигнальних збурень і аналіз чутливості змодельованих САР щодо параметричних збурень дає можливість сформулювати наступні результати і висновки (рекомендації):

1. Основною промисловою САР теплового режиму топки, безумовно, є одноконтурна САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, яка включає в себе три одноконтурні САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження. Вона надійно працює, легко реалізується в ПЛК, але має недолік у тому, що не парире збурення зі сторони РО. Проєктне і ад-хок моделювання САР реалізуються ефективно. Рекомендується до використання в малопотужних ПЛК і за умов обмеженого програмістського ресурсу;

2. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 4-ма регуляторами в свою чергу рекомендується до використання, як найбільш оптимальна, тому що вона також легко реалізується як в ПЛК і має суттєву перевагу над одноконтурною САР теплового режиму промислової топки з 3-ма регуляторами, адже вона парире збурення зі сторони РО. Вона складається з каскадної САР температури, одноконтурної САР співвідношення паливо/повітря і одноконтурної САР розрідження в топці в печі. Проєктне і ад-хок моделювання САР реалізуються ефективно. Рекомендується до використання як основна САР теплового режиму топки;

3. Каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами складається з трьох каскадних САР температури, співвідношення паливо/повітря і розрідження в топці печі. Особливістю цієї каскадної САР є її одночасна робота стабілізуючих регуляторів за рахунок паралельної подачі коригуючих сигналів з різними знаками на входи цих стабілізуючих регуляторів. При збуренні зі сторони завдання каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює так само, як і інші САР теплового режиму, але при збуренні зі сторони РО каскадна САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами працює найкраще з усіх. Недоліком каскадної САР теплового режиму промислової топки з 6-ма регуляторами є складна реалізація в ПЛК. Проєктне моделювання САР реалізується ефективно. Ад-хок моделювання САР є проблемним і занадто ресурсовитратним. Рекомендується до використання в потужних ПЛК і для роботи в печах, де потрібно дуже повільно регулювати температуру топки (наприклад, в скловарних печах).

Перелік посилань:

1. Батюк С. Г., Семенов А. Д. Каскадна система автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки*. Том 35 (74), № 2, 2024, Частина 1. С. 34-43. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2024.2/05>

¹ Магістрант 1 курсу Бугай Д. І.

¹ Проф., д.т.н. Волошук В. А.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26533723900>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОРТАТИВНИЙ ЛАБОРАТОРНИЙ СТЕНД ДЛЯ НАВЧАЛЬНОГО ПРОЦЕСУ В СФЕРІ АВТОМАТИКИ ТА АВТОМАТИЗАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. В теперішній час навчальний процес підготовки студентів із інженерних спеціальностей, зокрема спеціальності G7 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка», стикнувся із новими викликами через обмежений доступ до університетських лабораторій. Спочатку це було пов'язано із дистанційним режимом навчання під час пандемії SARS-CoV2, а зараз це спричинено умовами воєнного стану. Крім того, часу проведеного в лабораторіях, може бути недостатньо для того, щоб студенти повністю закріпили свої знання. Тому недорогі портативні лабораторні стенди, які можна використовувати як у лабораторії, так і поза нею, можуть відігравати вирішальну роль у засвоєнні студентами теоретичних знань, покращенні практичних навичок, а також проведенні наукових досліджень.

Аналіз останніх досліджень. В роботі [1] представлено результати проекту, фінансованого Міжнародною федерацією з автоматичного керування (IFAC), щодо впровадження у навчальний процес портативних лабораторних стендів. Проект реалізовувався в Португалії з січня 2021 року до кінця червня 2021 року під час пандемії SARS-CoV2. Загальною метою цього проекту було заохотити учнів до вступу на спеціальності у сфері автоматики та автоматизації, показавши та продемонструвавши, що прості практичні експерименти можна легко проводити за допомогою портативних лабораторій.

Автори [2] представили пристрій Temperature Control Lab (TCLab) як зручний та доступний програмно-апаратний комплекс на базі Arduino, що дає можливість порівнювати ефективність методів моделювання (фізичних, емпіричних, нейромережевих) та керування (PID, MPC) на реальному фізичному об'єкті з урахуванням шуму, затримок, прийнятих припущень і неточностей моделей.

В роботі [3] проаналізовано переваги впровадження недорогих домашніх лабораторних стендів, таких як вбудований блок керування, емулятор вертольоту та комплект TCLab, як альтернативи традиційним лабораторіям, що дає можливість студентам ефективно опановувати практичні навички моделювання та автоматичного керування у зручний для них час.

Формулювання мети. Мета роботи полягає у розробленні та реалізації мобільного та портативного лабораторного стенда для науково-дослідної роботи студентів зі спеціальності G7 Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка.

Основна частина. Установка створена за аналогією з [4] і складається з декількох ключових елементів (рис. 1): мікроконтролер на базі Arduino (4), що виконує роль зв'язкової ланки між комп'ютером та апаратними компонентами; нагрівальні елементи у вигляді двох транзисторів (2), до яких приєднанні радіатори (3) для їх охолодження та датчики температур (1) нагрівачів і навколишнього повітря. На нагрівальні елементи подається сигнал напруги із використанням широтно-імпульсної модуляції, що викликає ступінь їх нагрівання, що у свою чергу фіксується датчиками і передається на комп'ютер. Програмне забезпечення базується на використанні мов Python, C/C++.

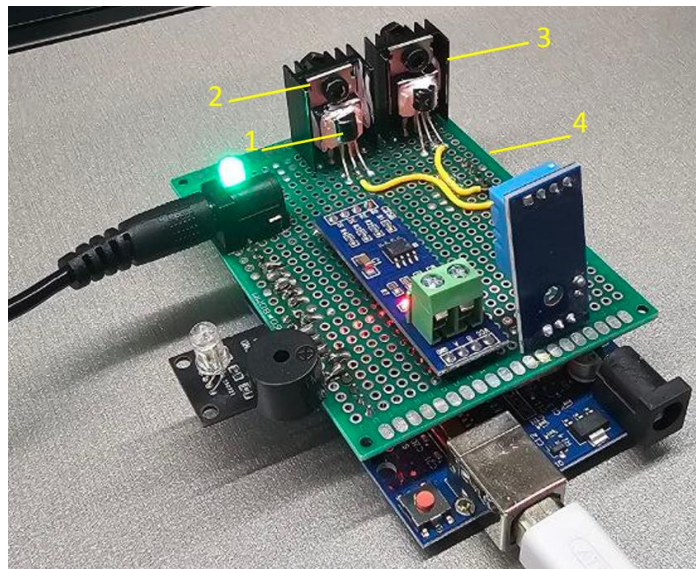


Рисунок 1 – Загальний вигляд портативного станду

На даний момент розроблено наступні функціональні можливості даного станду:

- **збір та обробка даних у реальному часі:** система забезпечує зчитування сигналів з датчиків температур об'єкта через 10-бітний аналого-цифровий перетворювач мікроконтролера.
- **динамічне керування виконавчими механізмами:** розроблено алгоритми для керування температурами об'єкта шляхом регулювання потужності нагрівачів за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).
- **моделювання та ідентифікація:** розроблено та реалізовано різні типи моделей, зокрема аналітичної (physical based), експериментальної моделі першого порядку із запізненням (FOPDT), а також неймережевої (ANN).
- **реалізація систем керування:** розроблено та реалізовано програмне середовище, що забезпечує роботу класичних ПІД-регуляторів та сучасних систем керування на основі прогнозних моделей (Model Predictive Control).
- **візуалізація та аналіз:** розроблено інтерфейс для побудови графіків динамічних процесів, що дає можливість візуально оцінювати режими роботи об'єкта.
- **оптимізація параметрів:** розроблено та реалізовано алгоритми для автоматичного підбору коефіцієнтів регуляторів, тощо.

Висновки. В роботі розроблено та практично реалізовано портативний програмно-апаратний комплекс для дослідження систем автоматичного керування, який поєднує доступне апаратне забезпечення (на базі Arduino) та програмне забезпечення на мов Python та C/C++. Дана розробка є доволі універсальним навчально-дослідним стандом для поєднання теоретичних знань з практичними навичками роботи з реальним обладнанням, в тому числі і в умовах дистанційного навчання.

Перелік посилань:

1. Oliveira P. B. D. M.; Soares F.; Cardoso A. Pocket-Sized Portable Labs: Control Engineering Practice Made Easy in Covid-19 Pandemic Times. IFAC-PapersOnLine 2022, 55, 150–155, doi:10.1016/j.ifacol.2022.09.272.
2. Park J.; Martin R. A.; Kelly J. D.; Hedengren, J. D. Benchmark Temperature Microcontroller for Process Dynamics and Control. Computers & Chemical Engineering 2020, 135, 106736, doi:10.1016/j.compchemeng.2020.106736.
3. Rossiter J. A.; Pope S. A.; Jones B. Ll.; Hedengren, J. D. Evaluation and Demonstration of Take Home Laboratory Kit. IFAC-PapersOnLine 2019, 52, 56–61, doi:10.1016/j.ifacol.2019.08.124.
4. TCLab C - Parameter Estimation. <https://apmonitor.com/do/index.php/Main/TCLabC> (дата звернення 24.02.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Бугай Д. І.; ¹ Мол. вчений Никифорович О. Є.

¹ Проф., д.т.н. Волошук В. А.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26533723900>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА КЕРУВАННЯ В РАМКАХ ТЕХНОЛОГІЇ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА

Постановка проблеми та її актуальність. В теперішній час технологія цифрового двійника (ЦД) є одним із актуальних напрямків четвертої промислової революції. ЦД, цифрова тінь і цифрова модель – це три пов'язані між собою поняття, що використовуються в кібер-фізичних системах. Разом з тим, вони відрізняються між собою щодо застосування, призначення та зв'язку із фізичними системами. Основна відмінність між цими поняттями полягає в рівні автоматизації обміну даних між цифровими та фізичними об'єктами. У той час як цифрова модель від'єднана від фізичного об'єкта і потребує ручного втручання (зокрема, внесення даних), цифрова тінь передбачає односторонній автоматичний потік даних від фізичного об'єкта до цифрової моделі. ЦД передбачає повністю автоматизований потік даних між фізичним об'єктом та його цифровою моделлю [1].

Аналіз останніх досліджень. В роботі [2] запропоновано та реалізовано повторне налаштування (re-tuning) PID-контролерів за допомогою технології ЦД. Із використанням пакету динамічної оптимізації GEKKO [3] на основі історичних даних про зміну уставок та збурення навантаження, було ідентифіковано модель процесу (другого порядку із запізненням), яку потім успішно протестовано на реальному обладнанні.

Автори [4] розглядають моделювання, зворотний зв'язок та оптимізацію в об'єктах керування через технологію ЦД, що імітує фізичну систему та динамічно оновлює дані для прийняття рішень.

Формулювання мети. Метою роботи є розроблення та реалізація програмно-апаратного комплексу для ідентифікації параметрів об'єкта керування в рамках технології цифрового двійника.

Основна частина. Установка складається з декількох ключових елементів (рис. 1): мікроконтролер на базі Arduino (4), що виконує роль зв'язкової ланки між комп'ютером та апаратними компонентами; нагрівальні елементи у вигляді двох транзисторів (2), до яких приєднанні радіатори (3) для їх охолодження та датчики температур (1) нагрівачів і навколишнього повітря. На нагрівальні елементи подається сигнал напруги із використанням широтно-імпульсної модуляції, що викликає ступінь їх нагрівання, що у свою чергу фіксується датчиками і передаються на комп'ютер. Програмне забезпечення базується на використанні мов Python, C/C++.

Математична модель досліджуваного об'єкта має вигляд:

$$\begin{aligned}
 m_1 c_{p,1} \frac{dT_1}{dt} &= \alpha \cdot A \cdot (T_1 - T_{air}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_{air}^4) - \\
 &\quad - \alpha \cdot A_{1-2} \cdot (T_1 - T_2) - \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{1-2} \cdot (T_1^4 - T_2^4) + k \cdot P \\
 m_2 c_{p,2} \frac{dT_2}{dt} &= \alpha \cdot A \cdot (T_2 - T_{air}) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_2^4 - T_{air}^4) + \\
 &\quad + \alpha \cdot A_{1-2} \cdot (T_1 - T_2) + \varepsilon \cdot \sigma \cdot A_{1-2} \cdot (T_1^4 - T_2^4),
 \end{aligned} \tag{1}$$

де m_1 , m_2 – маси нагрівальних елементів, кг; $c_{p,1}$, $c_{p,2}$ – теплоємності нагрівальних елементів, Дж/(кг·К); T_1 , T_2 – температури нагрівальних елементів, К; T_{air} – температура навколишнього повітря, К; α – коефіцієнт тепловіддачі між радіатором нагрівального

елементу та навколишнім повітрям, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; A – площа поверхні теплообміну радіатора нагрівального елемента, яка охолоджується навколишнім повітрям, м^2 ; A_{1-2} – площа поверхні теплообміну радіатора нагрівального елемента, яка охолоджується навколишнім повітрям, що знаходиться між радіаторами двох нагрівальних елементів, м^2 ; ε – степінь чорноти радіатора нагрівального елемента; σ – стала Больцмана, $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8} \text{ Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К}^4)$; P – потужність сигналу напруги, що подається до нагрівального елемента, %; k – коефіцієнт пропорційності між сигналом напруги P та тепловим потоком, що підводиться до нагрівального елемента електричним струмом, $\text{Вт}/\%$.

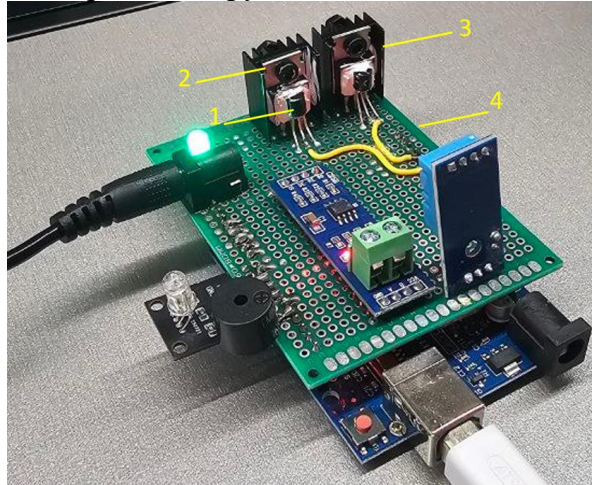


Рисунок 1 – Експериментальний стенд

В даній моделі невідомими вважалися коефіцієнт тепловіддачі α між радіатором нагрівального елемента та навколишнім повітрям та коефіцієнт пропорційності k . Всі інші параметри вважаються відомими і визначалися або шляхом геометричних вимірювань, зважувань, або брались із аналогічних прикладів [5]. Саме оцінюванню коефіцієнтів α та k на основі використання вимірних в режимі реального часу даних щодо динаміки зміни температур T_1 , T_2 , T_{air} , а також потужності P і присвячена дана робота. Це рішення, у свою чергу, може використовуватися як складова частина ЦД такої установки. Відпрацьовану технологію можна масштабувати і для інших варіантів розроблення та реалізації ЦД.

Для оцінювання коефіцієнтів α та k використано розширений фільтр Калмана (Extended Kalman Filter) [6]. Експерименти показали, що у випадку підводу електричного струму тільки до одного нагрівального елемента, внаслідок передачі теплоти, нагрівається і другий елемент. В процесі проведення експерименту мінялася потужність сигналу напруги P (рис. 2). Бачимо, що спочатку потужність поступово ступеневим чином зменшувалася від 30 % до 10 %, потім (приблизно на 1500 с.) з 10 % до 20 %, а потім, в момент часу приблизно 2500 с. – поступово до 50 %. В момент часу приблизно 3500 с. потужність була знижена до 20 %. На рис. 3 показана динаміка зміни коефіцієнта тепловіддачі α , яка була кількісно ідентифікована за допомогою запропонованого методу та розробленого програмного забезпечення. Тут можна відмітити, що в момент часу 2500 с. коефіцієнт α зріс від 6 до 50 $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$ (в середньому). Саме в момент часу 2500 с, під час проведення експерименту, на нагрівник був направлений потік повітря від вентилятора, що і стало причиною збільшення коефіцієнта тепловіддачі.

Як видно із рис. 4 коефіцієнт пропорційності k практично не змінювався і дорівнював, в основному 0,02.

Отже, на основі даних на рис. 3 та 4 можна кількісно ідентифікувати динамічну зміну коефіцієнтів α та k , що у свою чергу дає можливість стверджувати про зміну умов експлуатації об'єкту (наприклад, збільшення швидкості руху навколишнього повітря, тощо) та уточнювати модель об'єкту з метою подальшого її використання (що і є однією із задач ЦД).

На рис. 5 наведено дані щодо динаміки зміни вимірних температур нагрівників та розрахованих за моделлю із ідентифікованими на основі запропонованого програмного забезпечення коефіцієнтами α та k . Бачимо, що експериментальні та розраховані дані досить добре співпадають між собою.

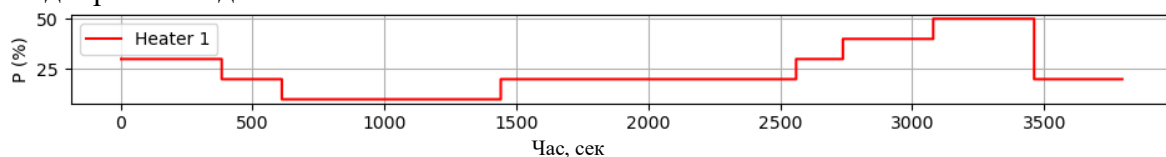


Рисунок 2 – Динаміка зміни потужності сигналу напруги P



Рисунок 3 – Динаміка зміни ідентифікованого коефіцієнта теплопровідності α

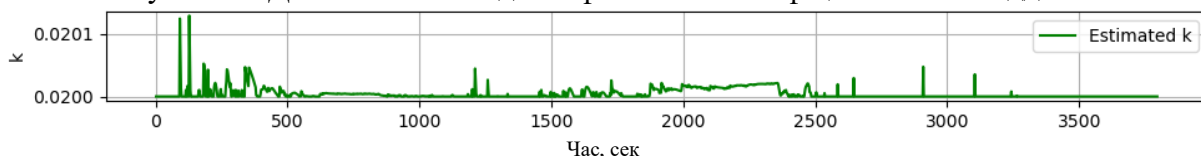


Рисунок 4 – Динаміка зміни ідентифікованого коефіцієнта пропорційності k

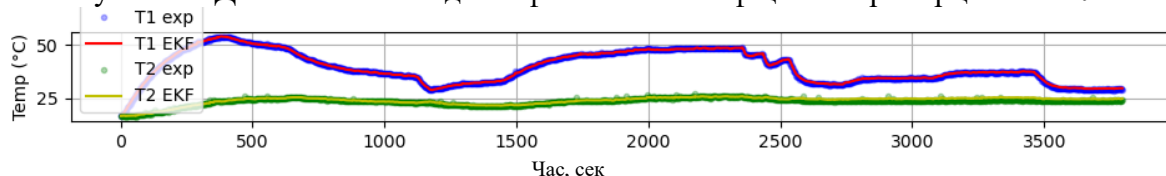


Рисунок 5 – Динаміка зміни вимірних температур ($T_{1,exp}$, $T_{2,exp}$) нагрівників та розрахованих за моделлю ($T_{1,EKF}$, $T_{2,EKF}$) із ідентифікованими коефіцієнтами α та k

Висновки. В роботі для реального фізичного об'єкту запропоновано та реалізовано програмно-апаратний комплекс для визначення його параметрів в режимі реального часу. Реалізація моделі із використанням визначених параметрів показала достатню точність у порівнянні із реальною динамікою зміни температур об'єкту. Дане рішення може розглядатися як складова частина ЦД в частині отримання цифрової моделі об'єкту, яка б відображала його властивості в режимі реального часу. Подальша робота може бути спрямована на удосконалення методів ідентифікації параметрів та інтеграцію запропонованого рішення в технологію ЦД.

Перелік посилань:

1. Zakharchenko A.; Stepanets O. Digital twin value in intelligent building development. A.I.S. 2023, 7, 75–86, doi:10.20998/2522-9052.2023.2.11.
2. Park J.; Patterson C.; Kell J.; Hedengren J. D. Closed-Loop PID Re-Tuning in a Digital Twin by Re-Playing Past Setpoint and Load Disturbance Data. In Proceedings of the AIChE Spring Meeting, New Orleans, LA, USA, 31 March–4 April 2019.
3. Beal L. D. R.; Hill D. C.; Martin R. A.; Hedengren J.D. GEKKO Optimization Suite. Processes 2018, 6, 106, doi:10.3390/pr6080106.
4. Dowling A. W.; Dougher M.; Watson M. J.; Lynch H. G.; Lu Z.; Laky D. J. Teaching Digital Twins in Process Control Using the Temperature Control Lab.; Ghent, Belgium, July 1 2025; pp. 2215–2221.
5. TCLab C - Parameter Estimation. <https://apmonitor.com/do/index.php/Main/TCLabC> (дата звернення 24.02.2026).
6. Docimo D. J.; Ghanaatpishe M.; Mamun A. Extended Kalman Filtering to Estimate Temperature and Irradiation for Maximum Power Point Tracking of a Photovoltaic Module. Energy 2017, 120, 47–57, doi:10.1016/j.energy.2016.12.089.

¹ Аспірант 1 курсу Веремчук О. Ю.

¹ Проф., д.т.н. Волощук В. А.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26533723900>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГНОЗИ В СИСТЕМІ КЕРУВАННЯ СОНЯЧНИМИ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЯМИ З УСТАНОВКАМИ ЗБЕРІГАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах розвитку енергетики України важливим завданням є підвищення гнучкості та керованості електроенергетичної системи. Значне зростання частки генерації з відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), зокрема сонячних та вітрових електростанцій, призводить до підвищення варіативності виробництва електроенергії, оскільки їх робота значною мірою залежить від погодних умов.

У таких умовах особливої актуальності набуває використання установок зберігання електричної енергії, які дозволяють згладжувати коливання генерації, зменшувати небаланси та забезпечувати більш ефективне використання електроенергії.

Разом з тим, ефективне керування такими об'єктами потребує використання прогнозів різних типів: прогнозів генерації електроенергії, цін на ринку електроенергії, споживання та режимів роботи накопичувачів.

Аналіз останніх досліджень. Останніми роками значна кількість досліджень присвячена проблемам прогнозування генерації електроенергії з відновлюваних джерел та оптимізації роботи енергетичних систем з накопичувачами енергії. У роботі [2] запропоновано підхід до прогнозування генерації фотоелектричних систем на основі метеорологічних даних та історичних показників виробництва електроенергії. Автори відзначають, що використання алгоритмів машинного навчання дозволяє суттєво підвищити точність короткострокових прогнозів.

У дослідженні [3] розглянуто використання методів глибокого навчання для прогнозування виробництва електроенергії сонячними електростанціями з урахуванням погодних факторів. Показано, що поєднання метеорологічних прогнозів з історичними даними генерації дозволяє отримати більш точні результати у порівнянні з традиційними статистичними методами.

У роботі [4] досліджено інтеграцію систем накопичення енергії з відновлюваними джерелами генерації та використання прогнозів для оптимізації режимів заряджання та розряджання акумуляторів. За результатами дослідження, використання прогностичних моделей дозволяє зменшити небаланси та підвищити економічну ефективність роботи енергетичних об'єктів.

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження підходів до формування прогнозів генерації електроенергії та інших ключових параметрів, необхідних для ефективного керування електростанціями з ВДЕ, оснащених установками зберігання електричної енергії.

Основна частина. У роботі розглядається електростанція на базі сонячної генерації, оснащена установкою зберігання електричної енергії. Основною задачею системи керування є визначення оптимальних режимів роботи накопичувачів з урахуванням прогнозів генерації, ринкових цін на електроенергію та стану енергосистеми.

Однією з ключових задач є прогноз виробництва електроенергії сонячною електростанцією. Наявні відкриті прогнози часто мають недостатню точність, що призводить до відхилень між запланованими та фактичними обсягами генерації. Для

підвищення точності використовується агрегування метеорологічних даних приблизно від десяти провайдерів прогнозу погоди.

Прогноз генерації можна подати як функцію основних метеорологічних параметрів

$$P_{pv}(t) = f(G(t), C(t), T(t)),$$

де $P_{pv}(t)$ – прогнозована потужність генерації, $G(t)$ – сонячне випромінювання, $C(t)$ – хмарність, $T(t)$ – температура навколишнього середовища.

Окрім прогнозу генерації, важливою задачею є прогнозування цін на електроенергію. Для електростанцій з потужністю понад 5 МВт заявки на продаж електроенергії подаються на ринку «на добу наперед» до моменту формування ринкових цін. У зв'язку з цим оператор електростанції змушений прогнозувати ціни, використовуючи різноманітні фактори, зокрема погодні умови, очікувану генерацію відновлюваних джерел, прогноз споживання електроенергії та кількість працюючих енергоблоків атомних електростанцій.

Додатково здійснюється прогнозування власного споживання систем накопичення енергії, яке пов'язане з роботою допоміжних систем, зокрема систем охолодження або підігріву акумуляторів. Таке споживання може досягати близько 3 % від ємності системи та залежить від температурних умов і режимів заряджання та розряджання батарей.

У випадках, коли накопичувачі використовуються не лише для участі в ринку електроенергії, але й для оптимізації енергоспоживання промислових об'єктів, формується також прогноз споживання виробництва.

Для підвищення точності планування режимів роботи електростанції також здійснюється врахування втрат електроенергії, що виникають під час її перетворення та зберігання. Енергетичний баланс системи можна представити у вигляді

$$E_{out} = E_{in} \cdot \pi,$$

де E_{in} – енергія, що надходить до системи, E_{out} – енергія, що відпускається в мережу, π – коефіцієнт ефективності перетворення енергії.

Висновки. Генерування прогнозів є одним із ключових елементів ефективного керування електростанціями з ВДЕ, оснащеними установками зберігання електричної енергії. Використання прогностичних моделей дозволяє підвищити точність планування режимів роботи електростанції, зменшити небаланси та підвищити економічну ефективність експлуатації енергетичних об'єктів.

Подальші дослідження доцільно спрямувати на вдосконалення алгоритмів прогнозування та інтеграцію таких систем у сучасні платформи управління енергетичними об'єктами, що дозволить підвищити ефективність використання ВДЕ та сприятиме забезпеченню стабільності електроенергетичних систем.

Перелік посилань:

1. https://interfax.com.ua/news/economic/1050700.html?utm_source=chatgpt.com (Дата доступу: 10.03.2025).
2. https://www.reuters.com/world/europe/ukraine-faces-6-gw-power-supply-shortfall-this-winter-iea-says-2024-09-19/?utm_source=chatgpt.com (Дата доступу: 10.03.2025)
3. Felez R., Felez J. Advanced Energy Management for Residential Buildings Optimizing Costs and Efficiency Through Thermal Energy Storage and Predictive Control. Applied Sciences. 2025. Vol. 15, no. 2. P. 880. URL: <https://doi.org/10.3390/app15020880>.
4. Energy management and demand response with intelligent learning for multi-thermal-zone buildings / Y. Gao et al. Energy. 2020. Vol. 210. P. 118411. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.118411>.
5. Efficient Deep Reinforcement Learning for Smart Buildings: Integrating Energy Storage Systems Through Advanced Energy Management Strategies / A. Farhana et al. International Journal of Advanced Computer Science and Applications. 2023. Vol. 14, no. 12. URL: <https://doi.org/10.14569/ijacsa.2023.0141257>.

¹ Магістрант 1 курсу Гажа М. В.

¹ Доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.

<https://scholar.google.com/citations?user=7H2DiesAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ВЕНТИЛЯЦІЙНОЮ УСТАНОВКОЮ З РЕЦИРКУЛЯЦІЄЮ

Постановка проблеми та її актуальність. Розробка автоматизованої системи керування вентиляційною установкою з рециркуляцією є важливою для підвищення енергоефективності та забезпечення комфортного мікроклімату.

У наукових публікаціях розглядаються автоматизовані системи керування вентиляційними установками з рециркуляцією, орієнтовані на регулювання температури та витрати повітря з урахуванням змін зовнішніх умов. Застосування таких систем підвищує енергоефективність і забезпечує комфортний мікроклімат завдяки використанню сучасних датчиків і регуляторів [1].

Аналіз останніх досліджень. Вентиляційна система з рециркуляцією передбачає змішування частини витяжного повітря зі свіжим припливним для передачі тепла та повторної подачі в приміщення [2]. Така система застосовується за відсутності шкідливих домішок у повітрі та дозволяє зменшити навантаження на опалювальне й охолоджувальне обладнання, підвищуючи енергоефективність вентиляційної установки [1]. Кількість свіжого зовнішнього повітря має бути не меншою ніж 10 % від загальної продуктивності припливної вентиляційної системи. Концентрація шкідливих речовин у повітрі, що подається в приміщення, повинна становити не більше 30 % від гранично допустимого рівня. Суттєвою перевагою систем із рециркуляцією є підвищення їх енергоефективності, оскільки до 70–80 % видаленого повітря повторно використовується у вентиляційному процесі, що забезпечує значну економію енергоресурсів.

Рециркуляція повітря не допускається у приміщеннях із шкідливими або токсичними речовинами, підвищеною концентрацією патогенів, вибухо- та пожежонебезпечних зонах, лабораторіях із небезпечними газами, парами або аерозолями, а також у локальних витяжних системах для видалення шкідливих домішок.

Формулювання мети. Мета роботи полягає у дослідженні автоматизованої системи керування вентиляційною установкою з рециркуляцією та оцінці ефективності її роботи щодо забезпечення нормативних параметрів мікроклімату й енергоефективності.

Основна частина.

Контроль і регулювання температури та витрати припливного й витяжного повітря забезпечують стабільний, енергоефективний мікроклімат, баланс системи та ефективність рециркуляції. Основні контури регулювання.

1. Зміна зовнішньої температури. Зміна зовнішньої температури є повільним збуренням через теплову інерцію будівлі. При її зниженні зростають теплові втрати, що фіксується датчиками та компенсується інтенсивнішою роботою системи опалення [3].

2. Коливання теплових навантажень. Додаткове тепло від обладнання компенсується збільшенням потужності кондиціонування.

3. Відкривання дверей. Це різке збурення, яке швидко змінює температуру, тиск і вологість через прямий обмін повітря (наприклад, протяг у коридорі). Система керування реагує складно, але сучасні датчики можуть заздалегідь підготувати компенсацію змін.

4. Зміна кількості людей у приміщенні. Люди виділяють тепло і вологу, тому вентиляція підвищує подачу свіжого повітря, а кондиціонер регулює температуру [2].

Таблиця 1 – Параметри системи

№	Назва	Діапазон зміни
1	Температура припливного повітря	-20...40°C
2	Температура повітря на виході з калорифера	15...30°C
3	Температура витяжного повітря	20...70°C
4	Витрата приточного повітря	0-1500 м ³ /год
5	Витрата витяжного повітря	0-1500 м ³ /год

З економічної точки зору рециркуляція повітря значно знижує витрати на опалення та кондиціювання (до 40–70 %) за рахунок повторного використання тепла відпрацьованого повітря. Незважаючи на додаткові змішувальні вузли та автоматику, вона дозволяє зменшити потужність основного обладнання та скоротити експлуатаційні витрати, з окупністю 1–3 сезони. Використання датчиків CO₂ підвищує ефективність і економію, роблячи будівлю енергонезалежнішою та більш привабливою [3].

Під час експлуатації вентиляційної установки з рециркуляцією можливе виникнення аварійних режимів, що можуть призвести до порушення мікроклімату, перевитрати енергії або пошкодження обладнання. Тому автоматизована система керування повинна забезпечувати своєчасне виявлення несправностей і перехід у безпечний режим роботи.

Однією з найпоширеніших проблем є відмова датчика температури або обрив вимірювального сигналу. У такому випадку контролер отримує некоректні дані або втрачає зворотний зв'язок, що може спричинити перегрів чи переохолодження повітря. Для запобігання цьому система автоматично вимикає нагрівальні елементи або фіксує їх у безпечному положенні та подає сигнал тривоги оператору.

Небезпечним режимом є перегрів калорифера, який може виникнути через зниження витрати повітря, засмічення фільтрів або несправність вентилятора. У такій ситуації спрацьовує температурний захист із блокуванням повторного увімкнення до усунення причини.

За низьких зовнішніх температур існує ризик обмерзання теплообмінника. Для його запобігання застосовується контроль температури, зменшення частки рециркуляції або тимчасове зниження продуктивності установки. Реалізація зазначених заходів підвищує надійність, безпеку та довговічність вентиляційної системи.

Висновок. У роботі розглянуто принцип функціонування автоматизованої системи керування вентиляційною установкою з рециркуляцією повітря та проаналізовано вплив температури й витрати повітря на формування мікроклімату. Визначено значення рециркуляції у зменшенні енергоспоживання, умови її безпечного застосування та особливості взаємодії датчиків, регуляторів і виконавчих механізмів у структурі системи.

Крім того, проведено аналіз можливих аварійних режимів і способів реагування системи на відмови та небезпечні ситуації. Отримані результати підтвердили переваги автоматизованого керування порівняно з ручним за показниками точності, надійності та енергоефективності.

Перелік посилань:

1. Янченков О. С., Магістерська дисертація, 2015. с. №40-50, URL: [https://atep.kpi.ua/files/pdf/poyasnuvalna_zapiska,_yanchenkov_\(ta31m\)_1433840794.pdf](https://atep.kpi.ua/files/pdf/poyasnuvalna_zapiska,_yanchenkov_(ta31m)_1433840794.pdf) (дата звернення 25.02.2025).
2. David W. Bearg Air Quality and HVAC Systems – p. 83 (дата звернення 25.02.2025).
3. American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers ASHRAE Handbook – HVAC Systems and Equipment – p. 14 (дата звернення 25.02.2025).

¹ Магістрант 1 курсу Іщенко І. В.

¹ Доц., к.т.н. Бунке О. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=l0I2Mk0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИЙ ОПЕРАТОР-ПОМІЧНИК(AI OPERATOR ASSISTANT)

Постановка проблеми та актуальність

У сучасних системах автоматизації технологічних процесів (АСУТП) оператор відіграє ключову роль у забезпеченні безпечної, стабільної та економічно ефективної експлуатації виробничих об'єктів. Незважаючи на високий рівень автоматизації, саме людина приймає остаточні рішення в умовах невизначеності, аварійних ситуацій або складних перехідних режимів.

З розвитком цифрових технологій та впровадженням концепції Industry 4.0 обсяг даних, що надходить від датчиків, ПЛК, SCADA та систем історіанів, постійно зростає. Це створює значне когнітивне навантаження на оператора, підвищує ризик помилок та збільшує час реагування на критичні події.

Традиційні SCADA-системи забезпечують:

- відображення параметрів у реальному часі;
- формування тривожних повідомлень;
- архівування даних.

Проте вони не здійснюють глибокого семантичного аналізу причинно-наслідкових зв'язків між подіями та не формують інтелектуальних рекомендацій.

У зв'язку з цим актуальним є створення інтелектуального оператор-помічника (AI Operator Assistant) на основі великих мовних моделей (LLM), який виконує функції аналізу, інтерпретації та підтримки прийняття рішень.

Аналіз сучасних досліджень

Сучасні LLM (GPT-подібні архітектури, трансформери) демонструють високу ефективність у:

- обробці великих текстових корпусів;
- аналізі журналів подій;
- генерації рекомендацій;
- побудові натурально-мовного інтерфейсу до складних систем.

У промисловості формується підхід до інтеграції LLM із системами моніторингу через механізм Retrieval-Augmented Generation (RAG), що поєднує пошук релевантної інформації у базі знань із генерацією контекстно-залежної відповіді.

Однак питання інтеграції LLM в АСУТП з урахуванням вимог до безпеки, детермінованості та пояснюваності залишаються відкритими та потребують подальших досліджень.

Формалізація задачі

Нехай технологічний процес описується множиною параметрів:

$$X(t)=\{x_1(t),x_2(t),...,x_n(t)\}, \quad (1)$$

де $x_i(t)$ – значення i -го технологічного параметра (тиск, температура, витрата тощо).

Журнал подій визначається як:

$$E=\{e_1,e_2,...,e_m\}, \quad (2)$$

де e_j – подія (тривога, зміна стану, відмова обладнання).

Функція інтелектуального помічника:

$$R=f(X(t),E,K), \quad (3)$$

де K – база знань (інструкції, регламенти, історичні сценарії),

R – сформовані рекомендації оператору.

Таким чином, система виконує:

1. аналіз часових рядів;
2. семантичну інтерпретацію подій;
3. генерацію пояснення;
4. формування рекомендації.

Архітектура системи

SCADA → База даних → Модуль аналізу (Python, pandas) → LLM (RAG) → Інтерфейс оператора (рис. 1).



Рисунок 1 – Архітектура системи AI Operator Assistant

Основні компоненти:

- модуль збору даних (OPC UA / Modbus);
- база історичних даних;
- модуль попереднього аналізу (виявлення аномалій);
- LLM-ядро;
- інтерфейс взаємодії (чат-вікно).

Експериментальне моделювання

Для оцінки ефективності системи проведено моделювання аварійних сценаріїв. Отримані результати показали, що система здатна формувати рекомендації в режимі, наближеному до реального часу.

Переваги впровадження:

- скорочення часу аналізу аварій на 30–40 %;
- зниження когнітивного навантаження;

- підвищення рівня безпеки;
- підтримка навчання персоналу;
- можливість масштабування;
- інтеграція без зміни апаратної частини.

Таблиця 1 – Приклади тестових сценаріїв

№	Подія	Відхилення	Рекомендація(AI)	Час формування
1	Перевищення тиску	+15%	Перевірити клапан скидання	1.2 с
2	Зниження температури	-10%	Перевірити нагрівач	1.1 с
3	Відмова насоса	0 витрати	Перевести на резервний	1.4 с

До основних обмежень належать:

- залежність від якості бази знань;
- необхідність контролю галюцинацій LLM;
- вимоги до кібербезпеки;
- необхідність пояснюваності рішень (Explainable AI).

Подальші дослідження передбачають:

- впровадження механізмів валідації відповідей;
- використання локальних LLM-моделей;
- тестування на реальних виробничих даних;
- розробку метрик довіри до рекомендацій.

Висновки

Запропоновано концепцію інтелектуального оператор-помічника для АСУТП на основі великих мовних моделей. Розроблена формалізація задачі та архітектура системи дозволяють інтегрувати LLM у виробниче середовище. Моделювання показало перспективність застосування підходу для підвищення ефективності та безпеки технологічних процесів.

Подальші дослідження передбачають розширення бази знань, впровадження механізмів пояснюваності (Explainable AI) та оцінку на реальних виробничих даних.

Перелік посилань

1. Russell S., Norvig P. Artificial Intelligence: A Modern Approach. – Pearson, 2020.
2. Vaswani A. et al. Attention is All You Need. – NeurIPS, 2017.
3. Goodfellow I. Deep Learning. – MIT Press, 2016.
4. Boyes H. Industrial Control Systems Security. – IET, 2015.
5. Zhang Y. Applications of Large Language Models in Industrial Systems. – 2023.

¹ Магістрант 1 курсу Кісіль В. В.

¹ Доц., к.т.н. Новіков П. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=58PUgu8AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СУЧАСНІ ЕФЕКТИВНІ ТЕХНОЛОГІЇ ОПАЛЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. На тлі енергетичної кризи та проблем з теплозабезпеченням в Україні актуальним стає пошук та впровадження сучасних ефективних технологій опалення. Такі рішення мають не лише забезпечити достатню кількість тепла, а й мінімізувати питоме споживання енергії на одиницю площі будинку та зменшити забруднення навколишнього середовища.

Аналіз останніх досліджень. Згідно з останніми звітами Міжнародного енергетичного агентства [1–3], в наступні роки однією із зростаючих технологій опалення буде тепловий насос. прогнозується, що до 2030 року частка тепла, вироблена тепловими насосами, сягне 20 % [3]. Відповідно до джерела [2], теплові насоси є основним інструментом стратегії декарбонізації будівель у поєднанні з підвищенням стандартів енергоефективності та переходом на відновлювані джерела енергії. У науковій статті [4] також досліджено ефективність поєднання теплового насоса з різними типами систем розподілу тепла – водяною теплою підлогою та радіаторним опаленням, а також наведено порівняльний аналіз цих комбінацій.

Формулювання мети. Метою є порівняльний огляд сучасних технологій опалення (теплових насосів, газових конденсаційних котлів та теплої підлоги), аналіз переваг їх гібридного поєднання, а також визначення ролі засобів автоматизації та інтелектуального керування в оптимізації роботи цих систем.

Основна частина. Тепловий насос – це система, що базується на зворотному циклі Карно. Холодоагент, що знаходиться всередині труби зовнішнього блоку, «забирає» тепло з навколишнього середовища, стискається компресором, через що холодоагент нагрівається, і через теплообмінник передає тепло іншому середовищу (повітрю чи воді). Далі холодоагент повертається, проходячи через розширювальний клапан, від чого його тиск і температура падають. Після цього цикл починається знову. Головна відмінність теплових насосів між собою – середовище, з якого вони беруть тепло і якому середовищу вони передають тепло. Ефективність роботи такої системи залежить від засобів автоматизації. Використання інверторного керування компресором та погодозалежних алгоритмів дозволяє підтримувати максимальний COP у широкому діапазоні зовнішніх температур, мінімізуючи кількість циклів пуску та зносу обладнання

До переваг таких систем можна віднести:

- високий показник трансформації тепла (COP), який може сягати 3,0–5,0, що значно більше, ніж енергія, витрачена на роботу компресора;
- відсутність викидів продуктів згоряння безпосередньо в місці експлуатації;
- можливість роботи на охолодження в літній період або роботи на підігрів води для ГВП;
- низька вартість експлуатації, оскільки електрика витрачається лише на перенесення тепла.

Недоліки:

- ефективність залежить від температури навколишнього середовища, що суттєво знижується при температурі нижче -10...-15 °C;
- вартість обладнання і монтажу перевищує традиційні аналоги.

Газовий конденсаційний котел разом з теплотою від спалювання газу використовує приховану енергію конденсації водяної пари з продуктів згоряння. У спеціальному теплообміннику димові гази охолоджуються нижче «точки роси» (приблизно 55 °C), що дозволяє отримати додаткову енергію та досягти ККД до 107–109 %. Цей процес повністю керується вбудованою автоматикою, яка за допомогою глибокої модуляції пальника та погодного регулювання підтримує оптимальне співвідношення газ-повітря. Це гарантує стабільну роботу системи в низькотемпературному режимі, що важливо для підтримання постійного процесу конденсації та максимальної енергоефективності.

Переваги:

- менше споживання палива (на 15–20 %) порівняно з традиційними котлами за рахунок використання вторинного тепла;
- продуктивність котла не залежить від температури зовнішнього повітря;
- мінімізація викидів шкідливих речовин (NO_x та CO) завдяки стабілізації процесу горіння та точному електронному регулюванню складу суміші.

Недоліки:

- максимальний ефект досягається лише в низькотемпературних контурах, де температура зворотної води не перевищує 45–50 °C;
- необхідність облаштування системи відведення або нейтралізації слабкокислотного конденсату, що утворюється під час роботи;
- використання викопного ресурсу (природного газу) та чутливість до зміни його вартості.

Водяна тепла підлога – це низькотемпературна система опалення, у якій теплоносій циркулює по трубах, що вмонтовані в бетонну стяжку підлоги. Основний обмін енергією відбувається шляхом випромінювання від усієї поверхні підлоги, що забезпечує рівномірний розподіл температури по висоті приміщення. Через високу термічну інерцію бетонної плити керування такою системою потребує автоматизації з використанням погодної компенсації та кімнатних термостатів. Це дозволяє заздалегідь коригувати температуру теплоносія на основі змін зовнішнього повітря, компенсуючи затримку в нагріванні та охолодженні масивної конструкції підлоги.

Переваги:

- через мінімальну конвекцію та передачу тепла через випромінювання, стає можливим досягнення комфорту при нижчій температурі, ніж при використанні радіаторного опалення. Це дозволяє знизити енерговитрати будівлі на 10–12% без втрати відчуття тепла;
- найтепліше повітря зосереджене в зоні ніг, а на рівні голови воно залишається свіжим, що є оптимальним для самопочуття людини;
- масивна стяжка діє як накопичувач енергії, повільно віддаючи тепло навіть після вимкнення джерела нагріву, що стабілізує мікроклімат у приміщенні;
- відсутність відкритих радіаторів та низька швидкість руху повітря мінімізують переміщення пилу в кімнаті.

Недоліки:

- через значну масу бетону система повільно прогрівається і так само повільно остигає. Це ускладнює швидке регулювання температури та потребує автоматики з функцією прогнозування змін погоди;
- встановлення потребує значних підготовчих робіт, підняття рівня підлоги та зазвичай можливе лише на етапі будівництва чи капітального ремонту;
- ефективність системи залежить від матеріалів із низьким термічним опором (керамічна плитка, камінь), оскільки килими чи дерево перекривають вихід тепла;
- має високу вартість та складність монтажних робіт.

Поєднання теплового насоса з водяною теплою підлогою є ефективним рішенням завдяки термодинамічній сумісності обох технологій. Оскільки показник трансформації

тепла (COP) залежить від різниці температур між джерелом енергії та системою опалення, низькотемпературний режим підлоги (30-35 °C) забезпечує сприятливі умови для роботи обладнання. Керування такою системою базується на погодному регулюванні, яке дозволяє враховувати інерційність бетонної стяжки. Автоматика аналізує зміну зовнішніх умов і заздалегідь змінює параметри роботи насоса, що дає змогу використовувати підлогу як тепловий акумулятор, наприклад, для накопичення енергії під час дії нічного тарифу на електроенергію.

Переваги:

- робота в низькотемпературному діапазоні дозволяє тепловому насосу споживати менше електрики при стабільному виході тепла;
- велика теплова маса підлоги стабілізує роботу системи, зменшуючи кількість циклів увімкнення компресора, що подовжує термін його експлуатації;
- можливість перенесення основного навантаження на нічні години для використання пільгових тарифів без помітної втрати комфорту вдень;
- поєднання інерційної підлоги та засобів автоматизації дозволяє підтримувати задані параметри мікроклімату без різких коливань.

Недоліки:

- сумарна вартість обладнання та облаштування теплої підлоги є високою порівняно з іншими варіантами як комбінованих, так і простих систем;
- система потребує точного розрахунку та професійного програмування засобів автоматизації для коректної роботи;
- через масивність конструкції прогрів будівлі після тривалого простою може зайняти багато часу.

Висновки. При виборі сучасної технології опалення немає єдиного універсального рішення, оскільки кожна система має власні технічні переваги та обмеження, що вимагає врахування специфіки об'єкта, будь то новобудова чи реновація існуючої споруди. Огляд існуючих систем дозволяє зробити висновок, що найбільш енергоефективними є низькотемпературні системи. При цьому ключовим фактором ефективності цих систем є впровадження засобів автоматизації, які надають можливість досягнути стабільного мікроклімату.

Перелік посилань:

1. Renewable heat – Renewables 2025 – Analysis. International Energy Agency (IEA). 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/renewables-2025/renewable-heat> (дата звернення: 01.03.2026).
2. Energy Efficiency 2025 – Executive summary. International Energy Agency (IEA). 2025. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2025/executive-summary> (дата звернення: 01.03.2026).
3. The Future of Heat Pumps – Executive summary. International Energy Agency (IEA). 2022. URL: <https://www.iea.org/reports/the-future-of-heat-pumps/executive-summary> (дата звернення: 01.03.2026).
4. Performance Evaluation of Radiator and Radiant Floor Heating Systems for an Office Room Connected to a Ground-Coupled Heat Pump. MDPI Energies. 2016. URL: <https://doi.org/10.3390/en9040228> (дата звернення: 01.03.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Мавроді В. В.¹ Доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.<https://scholar.google.com/citations?user=7H2DiesAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

НАЛАШТУВАННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРА СИСТЕМИ ОХОЛОДЖЕННЯ ПРОЦЕСОРА ЗАЛЕЖНО ВІД ПОТУЖНОСТІ

Постановка проблеми та її актуальність. У дослідженні системи керування швидкістю вентилятора комп'ютера залежно від потужності процесора необхідно враховувати, що об'єкт регулювання є суттєво нестаціонарним і його параметри змінюються разом із режимом роботи процесора. Електрична потужність, яку споживає сучасний процесор, практично повністю перетворюється на тепло. Однак характер цього тепловиділення не є сталим: у режимі простою температура змінюється повільно та в невеликих межах, тоді як у режимах динамічного розгону можливі швидкі стрибки навантаження та імпульсні зміни теплового потоку. Унаслідок цього при апроксимації системи в різних робочих точках будуть отримані різні математичні моделі.

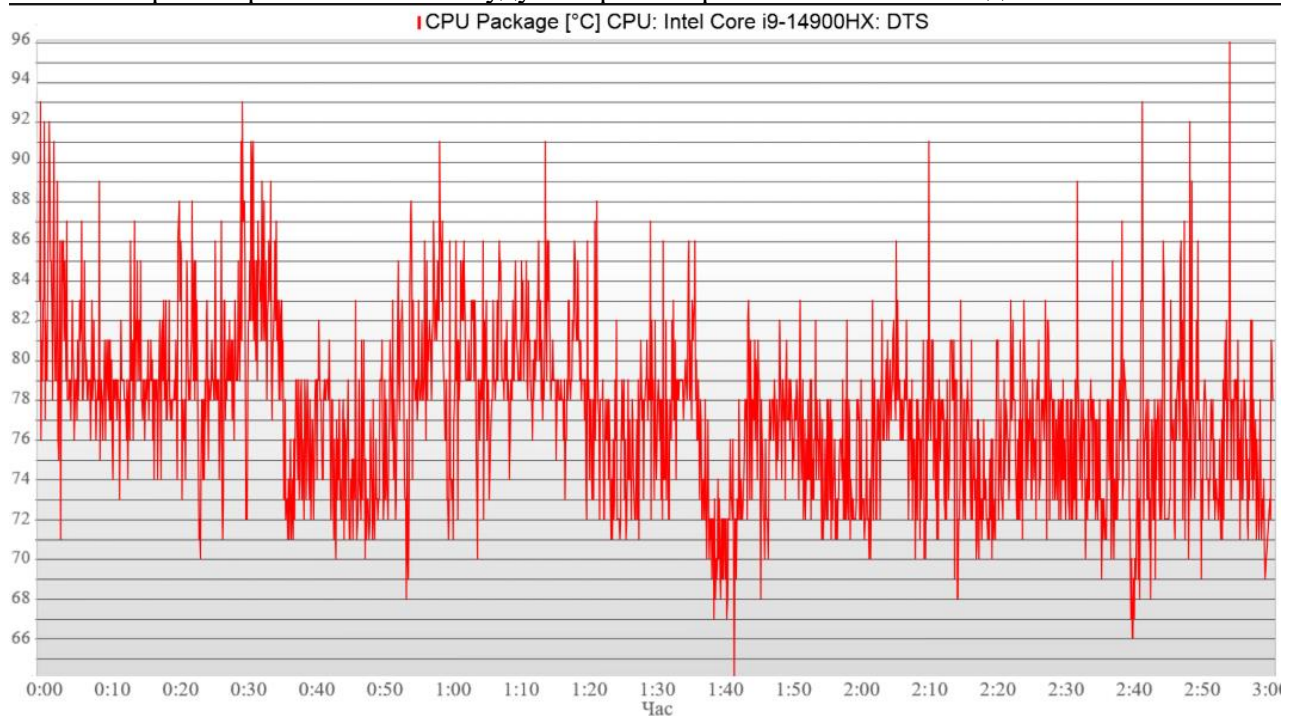


Рисунок 1 – Графік зміни температури процесора в звичайних умовах

Основна частина. Якщо виконувати ідентифікацію об'єкта за експериментальними даними (подаючи ступінчасту зміну навантаження та фіксуючи перехідну характеристику температури), то в області малих потужностей система добре описується аперіодичною ланкою першого порядку з великою сталою часу. Температура змінюється повільно, а коефіцієнт підсилення (градуси на ват) є відносно стабільним. Проте при середніх навантаженнях уже проявляється транспортна затримка, пов'язана з тепловою інерцією матеріалів і алгоритмами фільтрації датчиків температури. У цьому випадку адекватнішою стає модель першого порядку із запізненням. У режимах високої потужності вентилятор починає крутитися з максимальною швидкістю обертання, можливий тепловий тротлінг процесора, а також змінюється ефективність теплопередачі через залежність коефіцієнта

тепловіддачі від швидкості повітряного потоку. Тому апроксимація в різних точках дає різні значення коефіцієнта підсилення, сталої часу та запізнення, що фактично означає наявність сімейства моделей замість однієї універсальної [1].

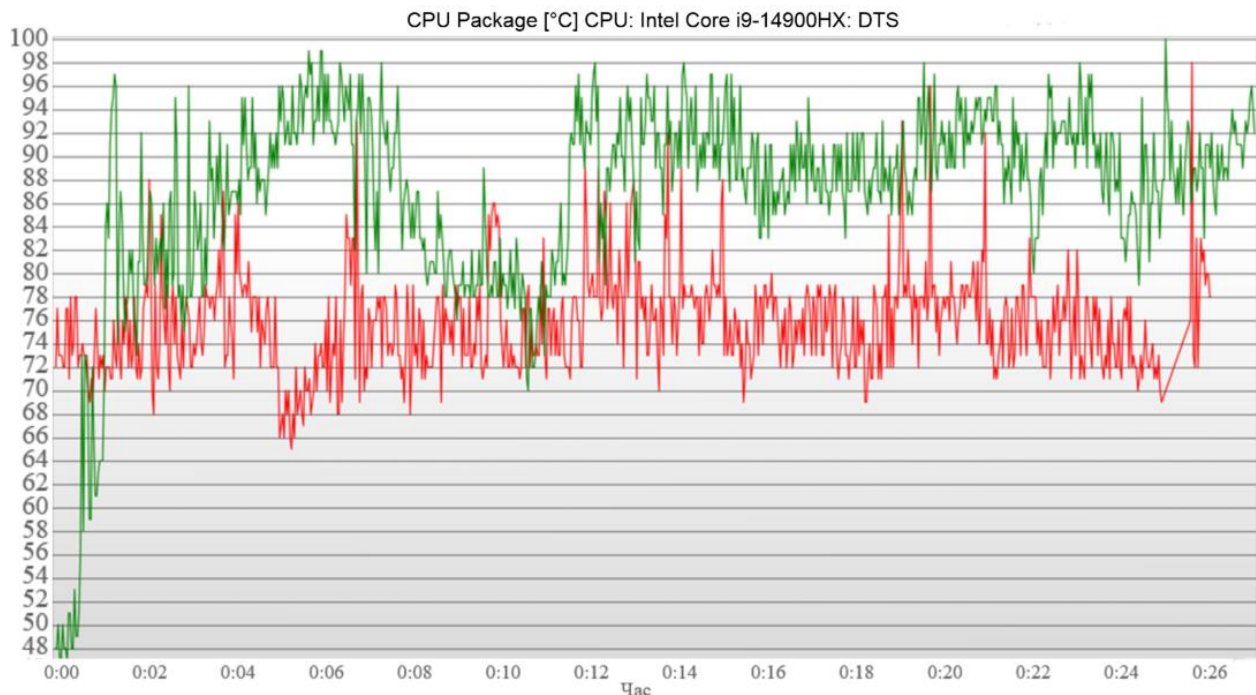


Рисунок 2 – Порівняння температури процесора на підвищеній потужності (червона лінія – працюючі вентилятори, зелена лінія – вимкнені вентилятори)

Таким чином, система керування вентилятором є параметрично змінною. Якщо виконати лінеаризацію в околі окремої робочої точки, отримаємо локально адекватну модель, але її параметри будуть відрізнятися для режимів низької, середньої та високої потужності. Це важливо для синтезу ПД-регулятора, оскільки коефіцієнти, підібрані для інерційної повільної системи, можуть спричинити коливання або перерегулювання при швидких теплових переходах, і навпаки – налаштування для агресивного режиму можуть бути надмірними в зоні малого навантаження.

Для побудови регулятора спочатку проведемо експериментальну ідентифікацію. Подамо ступінчасту зміну навантаження процесора (перехід із 20 % до 80 % використання), зафіксуємо криву температури та визначимо основні параметри: коефіцієнт підсилення K як відношення зміни температури до зміни потужності, сталу часу T як інтервал до досягнення $2/3$ усталеного приросту температури, а також запізнення τ , як час між прикладанням збурення та початком помітної реакції температури. На основі цих даних об'єкт можна апроксимувати передавальною функцією:

$$\frac{Ke^{-\tau s}}{Ts+1} \quad (1)$$

Саме ця модель найчастіше використовується для теплових систем із затримкою.

Початкові параметри ПД-регулятора можна визначити за аналітичними співвідношеннями для об'єкта першого порядку із запізненням. Пропорційний коефіцієнт вибирається пропорційно відношенню сталої часу до добутку коефіцієнта підсилення і запізнення, інтегральна складова задається з періодом інтегрування, кратним запізненню, а диференціальна – пропорційною його частці. Після цього коефіцієнти перераховуються до стандартної форми K_p , K_i та K_d . Таке налаштування забезпечує компроміс між швидкістю реакції та стійкістю.

У подальшій корекції слід враховувати режим роботи. Для низьких потужностей доцільно зменшити пропорційну та інтегральну складові, щоб уникнути зайвих змін швидкості вентилятора і знизити шум. Для середнього режиму можна використовувати номінальні розраховані коефіцієнти. Для високих навантажень бажано зменшити інтегральну складову, щоб запобігти накопиченню помилки при насиченні вентилятора, і дещо підсилити диференціальну складову для компенсації швидких теплових змін [2].

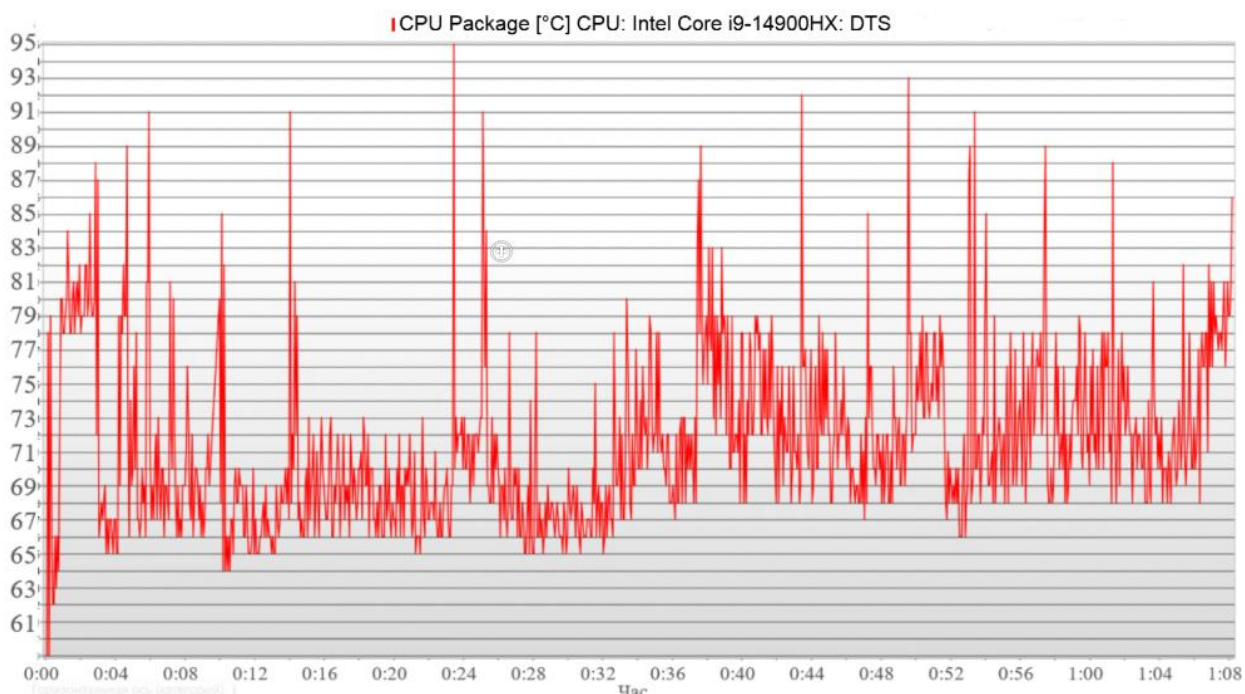


Рисунок 3 – Графік температури процесора при максимальній потужності вентилятора

Додатково необхідно реалізувати умовне інтегрування для усунення проблеми інтегрального насичення, оскільки вентилятор має обмеження максимальної швидкості. Доцільною є також фільтрація вимірної температури цифровим фільтром низьких частот для зменшення впливу шуму вимірювань, а також обмеження швидкості зміни ШІМ-сигналу з метою зменшення акустичних коливань [3].

Висновки. При дослідженні та налаштуванні ПІД-регулятора системи охолодження процесора необхідно враховувати, що апроксимація об'єкта в різних робочих точках призводить до отримання різних моделей із різними параметрами. Це обґрунтовує застосування або компромісного налаштування, або адаптивного підходу, який змінює коефіцієнти регулятора залежно від поточної потужності процесора.

Перелік посилань:

1. Temperature-aware computer systems: opportunities and challenges / К. Skadron та ін. *IEEE Micro*. 2003. Т. 23, № 6. С. 52–61. URL: <https://doi.org/10.1109/mm.2003.1261387> (дата звернення: 05.03.2026).
2. Stephen LEE. PID Control for CPU Temperature of Raspberry Pi. *Instructables*. URL: <https://www.instructables.com/PID-Control-for-CPU-Temperature-of-Raspberry-Pi/> (дата звернення: 05.03.2026).
3. On Estimating Optimal Performance of CPU Dynamic Thermal Management / A. Cohen та ін. *IEEE Computer Architecture Letters*. 2003. Т. 2, № 1. С. 6. URL: <https://doi.org/10.1109/l-ca.2003.5>

¹ Аспірант 1 курсу Марюхін М. О.

¹ Доц., к.т.н. Новіков П. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=58PUgu8AAAAJ>

¹ КПП ім. Ігоря Сікорського

РІШЕННЯ З ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ДЛЯ ДОСЯГНЕННЯ NZEB ДЛЯ ІСТОРИЧНИХ БУДІВЕЛЬ

Постановка проблеми та її актуальність. Впровадження стандартів nZEB в Україні є важливою задачею для відповідності директивам Європейського Союзу щодо енергетичної ефективності. Особливу увагу варто приділити історичним будівлям, які стикаються з специфічними проблемами, пов'язаними з: обмеженнями на зовнішнє утеплення фасадів, високими внутрішніми стелями, великими скляними площами та зношеними інженерними системами. Актуальність полягає у пошуку балансу між енергоефективністю та збереженням архітектурного вигляду.

Аналіз останніх досліджень. Більшість сучасних досліджень, зокрема тих, що пов'язані з проєктами програми Horizon 2020, підкреслюють необхідність цілісного вирішення цієї проблеми, яке включає два елементи: застосування паропроникних внутрішніх теплоізоляційних матеріалів та модернізацію систем опалення й використання відновлюваних джерел енергії. Важливим є досвід ревіталізації університетських кампусів Європи, де застосовуються «невидимі» технології енергозбереження. В роботі [1] наведено дослідження досягнення nZEB з використанням цифрового двійника.

Формулювання мети. Мета полягає в огляді комплексів технічних рішень для підвищення енергоефективності історичного навчального корпусу КПП до рівня nZEB без порушення його архітектурної цілісності.

Основна частина. Досягнення стандарту будівель з майже нульовим енергоспоживанням для історичних об'єктів, таких як корпуси КПП ім. Ігоря Сікорського, є складним завданням через суворі обмеження щодо втручання в їхню архітектуру. Зокрема, для таких споруд, як правило, неможливо застосувати зовнішнє утеплення фасадів, оскільки вони мають культурну та історичну цінність [2]. Відповідно, підвищення енергоефективності оболонки вимагає застосування альтернативних методів, а саме внутрішнього утеплення стін та заміни зовнішнього скління на сучасні енергоефективні рішення зі збереженням оригінального вигляду [2, 3].

Оскільки фізичне втручання в конструкцію є обмеженим, важливу роль у досягненні nZEB відіграють передові інформаційні технології управління. В цій ситуації високий потенціал для проєктування та експлуатації енергоефективних систем має впровадження концепції цифрових двійників (Digital Twin) [3]. Цифровий двійник дозволяє створити динамічну віртуальну версію інфраструктури будівлі, за допомогою якої можна оптимізувати роботу інженерних систем фізичного об'єкта. На рис. 1 зображена технологічна архітектура цифрового двійника [3].

Створення Цифрового двійника для управління експлуатацією nZEB спирається на глибоку інтеграцію технологій інформаційного моделювання будівель (BIM) та Інтернету речей (IoT) [1]. Поєднання моделей BIM та BEM (Building Energy Modeling) забезпечує потужний комп'ютеризований підхід для точного моделювання теплової поведінки будівлі, що є особливо затребуваним при розробці проєктів енергетичної модернізації існуючої забудови [4].

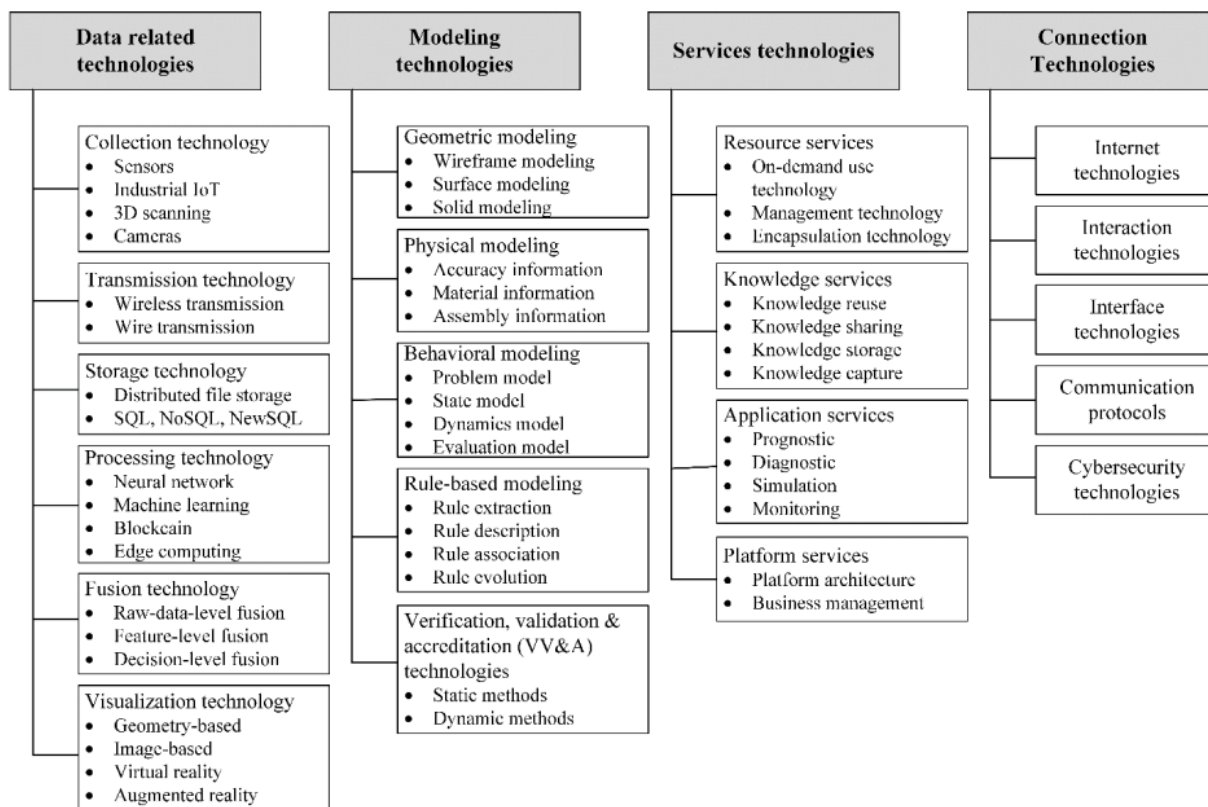


Рисунок 1 – Технологічна архітектура цифрового двійника

Водночас, датчики IoT мережі в режимі реального часу збирають динамічні параметри внутрішнього середовища (температуру, вологість, рівень освітленості та CO₂) і передають їх до систем автоматизації будівель [1]. Автоматизація роботи систем клімат-контролю (HVAC) на основі цих даних дозволяє істотно знизити енергоспоживання, зберігаючи при цьому комфортні умови для студентів та викладачів.

Висновки. Досягнення рівня nZEB історичних будівель можливе через використання пасивних методів (утеплення зсередини) та активних технологій (теплові насоси, відновлювальні джерела енергії). Важливим фактором у досягненні та підтриманні енергоефективності є розробка цифрового двійника. Завдяки такій цифровізації, історичні будівлі мають змогу досягти балансу між збереженням архітектурної спадщини та виконанням жорстких сучасних вимог до нульового енергоспоживання.

Перелік посилань:

1. Liu Z., Li M. та Ji W., “Development and application of a digital twin model for Net zero energy building operation and maintenance utilizing BIM-IoT integration”, *Energy & Buildings*, вип. 328, с. 2–5, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.115170>
2. Garlik B., “Energy Centers in a Smart City as a Platform for the Application of Artificial Intelligence and the Internet of Things”, *Applied Sciences*, вип. 12, № 7, с. 33–24, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/app12073386>
3. Zakharchenko A. та Stepanets O., “Digital Twin Value in Intelligent Building Development”, *Advanced Information Systems (Сучасні інформаційні системи)*, вип. 7, № 2, с. 77–82, 2023. DOI: <https://doi.org/10.20998/2522-9052.2023.2.11>
4. Kurucu A. T. та S. Arslan Selçuk, “Integration of BIM (Building Information Modeling) with BEM (Building Energy Modeling) software for energy efficient building design: A bibliometric analysis”, у *10. Uluslararası Mühendislik Mimarlık ve Tasarım Kongresi (10th International Congress on Engineering, Architecture and Design)*, Стамбул, 2022, с. 1–5

¹ Бакалаврант 1 курсу Омецинський С. О.; ¹ Бакалаврант 1 курсу Січковський М. А.

¹ Асист. Захарченко А. С.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=RpOI6DoAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ РУХОМ КРОКУЮЧИХ РОБОТОТЕХНІЧНИХ ПЛАТФОРМ ТА СУЧАСНІ МЕТОДИ ЇХ АДАПТАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Одним із основоположних елементів в створенні автономних роботів для виконання різноманітних задач є система руху, яка забезпечуватиме необхідну стабільність, швидкість, прохідність і маневреність. Найпоширенішим рішенням в цій галузі є використання коліс та гусениць, що обумовлюється простотою конструкції та прогнозованістю результатів руху. Проте ефективність колісних та гусеничних платформ суттєво знижується зі зростанням складності рельєфу, збільшенням кута нахилу поверхні та зміною її текстури.

Ефективною альтернативою для подолання складних перешкод є використання багатноніжкових роботизованих систем (гексаподів, октоподів) та багатоважільних кінематичних конструкцій (наприклад, механізмів Тео Янсена). За умови коректного проектування, розрахунків і реалізації алгоритмів керування мають істотні переваги як у прохідності, так і в маневреності.

В умовах повномасштабної війни та ліквідації надзвичайних ситуацій часто виникає потреба в подоланні складних рельєфів – завалів будівель, місцевості непристосованої для коліс, доступі в небезпечні або складно доступні місця для виконання різного роду робіт – рятувальних, розвідувальних, логістичних та дослідницьких операцій. Таким чином, проблема створення ефективних адаптивних систем руху для автономних роботів є надзвичайно актуальною в сучасних умовах.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика сучасних досліджень охоплює як суто технічні аспекти – вибір конструкції та алгоритмів керування рухом, так і їхню практичну адаптацію до екстремальних середовищ. Дослідження алгоритмів руху крокуючих та гібридних механізмів відкриває нові горизонти для робототехніки, дозволяючи долати складні рельєфи та виконувати завдання, недоступні для традиційних рішень. Це робить дослідження алгоритмів руху не лише науково значущими, а й необхідними. У перспективі такі роботи можуть стати ключовим інструментом у сфері безпеки, порятунку, досліджень і мікрологістики, особливо за умови розширення базових алгоритмів руху технологіями машинного бачення для превентивної оцінки рельєфу.

Останні дослідження зосереджені на оптимізації ходи гексаподних (шестиногих) роботів та підвищенні їхньої стабільності на складних рельєфах. Квадрупедна хода є значно швидшою та стабільнішою за триподну. В обох видах ходи по 3 стадії без контакту ноги з поверхнею, тільки у триподній стадії руху загалом 6, а у квадрупедній 9 що створює відчутну різницю стабільності. 50 % проти 33,33 % без контакту ноги з поверхнею. А також 2 стадії активного поштовху з 9 у квадрупетній проти 1 з 6 в триподній [1]. Важливу роль у забезпеченні стабільності відіграє і конструкція самих кінцівок, де використання еластичних матеріалів та спеціальних протекторів суттєво покращує зчеплення з поверхнею [1].

Для підвищення маневреності та енергоефективності гексаподів активно розробляються комплексні системи оптимізації траєкторій, так званої «розумної ходи» (Smart Gait), що включають модулі розрахунку траєкторії руху ніг, періоду та послідовності кроків [2]. В умовах змінного рельєфу високу ефективність демонструють адаптивні алгоритми на базі методів глобальної оптимізації (наприклад, TGPSo). Такі системи

використовують датчики на ногах робота, що зчитують рівень їхнього занурення в ґрунт, пісок або ґравій, і на основі цих даних динамічно коригують подальшу поведінку механізму [3].

Окремим перспективним напрямком розширення можливостей крокуючих роботів є реалізація стрибкових маневрів, натхненні біологічною поведінкою павуків-стрибунів. Використання механічних ніг із чотирма ступенями вільності (4DoF) дає змогу таким роботам успішно виконувати стрибки відразу в трьох просторових осях [4].

Формулювання мети. Незважаючи на значну кількість існуючих досліджень у сфері крокуючих механізмів, створення ефективної платформи потребує комплексного підходу до вибору системи локомоції. Метою роботи є аналіз існуючих алгоритмів ходи для формування оптимальної стратегії керування розроблюваним власним гексаподом, а також обґрунтування технологій (таких як машинне бачення), що дозволять у майбутньому адаптувати його до складних і непередбачуваних умов середовища.

Основна частина. Розробка власної експериментальної моделі гексапода вимагає комплексного підходу до побудови системи керування рухом. Фундаментом для будь-якого крокуючого механізму є розв'язання задач кінематики. Для точного позиціонування кожної кінцівки в тривимірному просторі мікроконтролер має в реальному часі перераховувати цільові координати (X , Y , Z) стопи у відповідні кути повороту сервоприводів.

На базі математичної моделі формується програмна архітектура, що реалізує різні патерни ходи. Для забезпечення універсальності розроблюваної платформи можлива реалізація модульної системи руху, яка дозволить динамічно перемикатися між різними режимами:

1. триподною ходою: для досягнення максимальної швидкості на рівних і твердих поверхнях.
2. квадрупедною ходою: для забезпечення максимальної стабільності на складному рельєфі (коли одночасно в повітрі перебуває мінімальна кількість ніг).
3. спеціальними маневрами та стрибками: зміна кліренсу (висоти корпусу) та нахил робота для підготовки до долання перешкоди.

Сам процес стрибка гексапода є складним маневром і зазвичай складається з трьох основних фаз:

1. зліт (*take-off*): найважливіша стадія, що включає згинання ніг для накопичення енергії та їхнє різке випрямлення (удар об землю) для створення прискорення;
2. політ (*flying*): фаза, де робот коригує свою позу в повітрі;
3. приземлення (*touchdown*): стадія м'якого контакту з поверхнею для збереження стабільності.

Для здійснення стрибка в різних напрямках змінюється орієнтація корпусу: наприклад, при стрибку вперед задається початковий кут тангажу (*pitch*), а при боковому – кут крену (*roll*). Це дозволяє роботу швидко долати перешкоди, що у кілька разів перевищують розмір його тіла, не змінюючи початкового розташування [4].

Крім того, сучасні підходи активно інтегрують методи машинного навчання, де глибоке навчання та симуляційні середовища значно прискорили розвиток алгоритмів для роботів із ногами, дозволяючи створювати більш універсальні та адаптивні системи [5]. Крім того, методи імітаційного навчання вже дозволяють роботам відтворювати складні рухові політики [6].

Перспективним доповненням до керування ходьбою є використання методів комп'ютерного зору для аналізу навколишнього середовища. З цією метою може застосовуватися бібліотека OpenCV (Open Source Computer Vision), яка надає інструменти для обробки зображень та відеопотоку з камер, встановлених на роботі.

Використання засобів комп'ютерного зору дозволяє вирішувати такі допоміжні задачі, що безпосередньо впливають на якість пересування гексапода:

1. виявлення та відстеження об'єктів і перешкод у реальному часі;
2. оцінювання простору та елементів оточення;

3. корекція напрямку руху та вибір більш безпечної траєкторії;
4. утримання об'єкта або цілі в полі зору під час руху.

Для відстеження об'єктів можуть застосовуватися алгоритми KCF, CSRT, MIL та MOSSE, які забезпечують супровід цілей у відеопотоці та можуть використовуватися для адаптації швидкості і напрямку руху робота.

Інтеграція OpenCV із нейронними мережами через модуль DNN дає змогу виконувати автоматичне розпізнавання об'єктів і типів перешкод. Підтримується імпорт моделей, навчених у TensorFlow, PyTorch та Darknet (зокрема YOLO), що дозволяє класифікувати об'єкти сцени, визначати характер перешкод, розпізнавати людей, техніку або спеціальні маркери, підвищувати рівень безпеки під час пересування.

Таким чином, комп'ютерний зір розглядається як інструмент, що підсилює можливості алгоритмів локомоції гексаподного робота.

Висновки. Гексаподні роботи дедалі активніше застосовуються в сучасній робототехніці та демонструють високі показники прохідності й стійкості в умовах, де колісні або гусеничні платформи є малоефективними. Основу їх функціонування становлять алгоритми керування ходьбою, координації ніг та забезпечення стабільності під час руху. Також використання методів комп'ютерного зору як доповнення до системи керування дозволяє підвищити ефективність гексаподного робота за рахунок аналізу навколишнього середовища, розпізнавання перешкод і корекції траєкторії руху. Поєднання алгоритмів керування ходюю з візуальним сприйняттям середовища створює потужну базу для робота, ніж використовувати ці можливості по одиці.

Перелік посилань:

1. Zhang S., Zhang X., Sun L. Gait Analysis and Stability Evaluation of a Hexapod Robot. *Conference on Intelligent Industry*. 2025. P. 160–168. DOI:10.54097/s3zkw273.
2. Babu N., Sujatha S., Narayanan S., Balamurugan V. Novel Hybrid Leg-Track Locomotion Robot and its Stability Analysis Using a Unified Methodology. *Procedia Computer Science*. 2018. Vol. 133. P. 486–493. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procs.2018.07.061>.
3. Bai G., Chen W., Du J., Liu Y., Luo Y., Qin H. TGPSO: An Adaptive Gait Optimization Algorithm for Hexapod Robots in Multi-Terrain Environments. *Robotics*. 2025. Vol. 14, no. 10. Art. no. 139. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics14100139>.
4. Zhu Y., Chen L., Liu Q., Qin R., Jin B. Omnidirectional Jump of a Legged Robot Based on the Behavior Mechanism of a Jumping Spider. *Applied Sciences*. 2018. Vol. 8, no. 1. Art. no. 51. DOI: <https://doi.org/10.3390/app8010051>.
5. Sehoon Ha, Joonho Lee et al. Learning-based legged locomotion; state of the art and future perspectives. *The International Journal of Robotics Research* 2025, Vol. 44(8) 1396–1427. DOI: 10.1177/02783649241312698.
6. Mirza K. Z., Singh S. Imitation learning for legged robot locomotion: a survey. *Frontiers in Robotics and AI*. 2025. Vol. 12. Art. no. 1678567. DOI: 10.3389/frobt.2025.1678567.

¹ Аспірант 2 курсу Зінченко Д. Д.

¹ Доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=7H2DiesAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІДЕНТИФІКАЦІЯ ЗАЛЕЖНОСТІ ПРОДУКТИВНОСТІ СИСТЕМИ НА КРИСТАЛІ ВІД ХАРАКТЕРИСТИК ОБЧИСЛЮВАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні мобільні платформи є високопродуктивними обчислювальними системами, що функціонують в умовах жорстких теплових лімітів. Ці обмеження є критичними для гетерогенних систем на кристалі (SoC), які інтегрують в собі різноманітні обчислювальні компоненти (CPU, GPU, NPU). Забезпечення оптимальної продуктивності в таких умовах вимагає застосування стратегій керування, що здатні ефективно розподіляти енергетичні ресурси. Провідним класом методів у цій галузі є алгоритми розподілу потужності (Power Allocation), зокрема технологія Intelligent Power Allocation (IPA) [1], яка динамічно розподіляє доступний тепловий бюджет між активними компонентами SoC.

Фундаментальним недоліком існуючих реалізацій є використання споживаної потужності як універсальної метрики керування. Вона одночасно слугує мірою тепловиділення та сурогатним показником (проксі-змінною) обчислювального навантаження, фактично підміняючи собою прямі вимоги до продуктивності. Хоча існують дослідження, спрямовані на прецизійне моделювання енергоспоживання на основі даних апаратних лічильників продуктивності (Performance Monitoring Unit – PMU) [2], вони вирішують лише задачу точного дотримання теплового бюджету, залишаючи проблему оцінки реальної швидкодії відкритою.

Ключовим обмеженням використання потужності як еквіваленту продуктивності є нелінійний характер залежності між енергоспоживанням та корисною роботою. Зокрема, для задач, обмежених пропускну здатністю пам'яті, підвищення тактової частоти призводить до значного зростання тепловиділення без суттєвого приросту швидкодії виконання інструкцій [3]. У таких сценаріях традиційні алгоритми неефективно витрачають обмежений енергетичний бюджет, що призводить до невиправданого тротлінгу та зниження якості обслуговування (QoS). Ефективним вирішенням цієї проблеми є інтеграція у контур керування прямої моделі оцінки продуктивності.

Мета. Метою роботи є розробка та ідентифікація математичної моделі, здатної прогнозувати відносну зміну загальної продуктивності пристрою в залежності від зміни робочої частоти та характеристик поточного навантаження, для подальшої інтеграції у контур керування потужністю.

Основна частина. В основу дослідження покладено гіпотезу про те, що мікроархітектурний стан процесора, зафіксований через лічильники PMU, містить достатньо інформації для прогнозування масштабованості продуктивності.

Дослідження базувалося на реалізації повнофакторного експериментального плану, метою якого було дослідження впливу динамічної зміни частоти (DVFS) на продуктивність мобільної платформи в умовах гетерогенного обчислювального навантаження. Простір станів експерименту формувався шляхом комбінації робочих частот для трьох ключових апаратних доменів: продуктивного кластера центрального процесора, середнього кластера та графічного прискорювача. Для кожного домену було визначено набір із трьох фіксованих дискретних рівнів частоти (низький, середній, високий), що дозволило охопити повний спектр режимів енергоспоживання пристрою. Експериментальні дослідження виконано на

базі мобільної платформи Redmagic 7S Pro, оснащеної системою на кристалі Qualcomm Snapdragon 8+ Gen 1.

У ролі обчислювального навантаження було обрано стандартизований мобільний бенчмарк PCMark [4]. Вибір даного інструменту зумовлений наявністю чіткої вихідної кількісної метрики продуктивності, а також, його високою повторюваністю від запуску до запуску, що є критично необхідною умовою для забезпечення достовірності попарного порівняння результатів. Процедура тестування передбачала розбиття цього бенчмарку на десять рівних часових сегментів. Експеримент проводився ітеративно: під час кожного запуску конфігурація частот апаратних доменів змінювалася виключно для одного цільового часового сегмента, тоді як решта виконувалася на базових частотах. Такий підхід забезпечив ізоляцію впливу зміни частоти на конкретні фази навантаження. Для нівелювання систематичних похибок, порядок перебору комбінацій частот та цільових сегментів було повністю рандомізовано.

Синхронно з виконанням навантаження здійснювався моніторинг апаратних лічильників. Для кожного сегмента фіксувався широкий спектр покластерних мікроархітектурних метрик. Для повноцінного опису мікроархітектурного стану системи було сформовано розширений набір похідних метрик інтенсивності. Зокрема, було досліджено всі комбінації відношень зібраних апаратних подій до тактів системної шини, тактів ядра процесора та загальної кількості виконаних інструкцій. Для усунення ефекту простою ці відношення обчислювалися на основі попередньо агрегованих сумарних значень базових подій за весь сегмент. Це дозволило нівелювати вплив короточасних мікростанів бездіяльності та отримати фізично обґрунтовані характеристики виключно для активної фази роботи ядер.

Вхідний простір ознак формувався гібридним способом, поєднуючи поточну та цільову частоти з абсолютними значеннями лічильників і зазначеним розширеним набором нормалізованих похідних метрик. Такий підхід надав моделі здатність комплексно враховувати поточну специфіку навантаження та контекст зміни частоти.

Як цільову змінну моделі було обрано відносну різницю вихідної метрики продуктивності бенчмарку між експериментальним та еталонним прогонами.

З метою зменшення розмірності вхідного вектора та виокремлення найбільш значущих метрик було застосовано алгоритм рекурсивного виключення ознак (RFE) [5]. У результаті первинний простір з 137 метрик було зменшено до 23 компонент (частоти та 17 найінформативніших метрик PMU). Це суттєво підвищило стійкість моделі до шуму, мінімізувало ризик перенавчання та знизило обчислювальні витрати.

У ході дослідження було протестовано чотири класи моделей машинного навчання: лінійну та поліноміальну регресії, градієнтний бустинг (GBR) та багатошаровий перцептрон (MLP). У випадку останніх двох, визначення архітектури моделі було виконано за принципом максимального покращення точності на тестовій вибірці даних. Для об'єктивного оцінювання якості прогнозування та наочності результатів навчання як головну метрику точності моделі було обрано коефіцієнт детермінації R^2 (1), що описує відношення абсолютної квадратичної точності моделі до загальної дисперсії даних. Іншими словами, він показує, наскільки модель здатна пояснити цю дисперсію:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=0}^n (y_{p,i} - y_{t,i})^2}{\sum_{i=0}^n (y_{t,i} - \bar{y}_t)^2}, \quad (1)$$

де $i \in [0, n]$ – індекс елементу у вибірці,

$y_{p,i}$ – розраховане моделлю значення,

$y_{t,i}$ – експериментальне значення,

$\bar{y}_t$ – середнє експериментальних значень.

Обрані моделі показали такі результати:

- Лінійна регресія: $R^2 = 0,172$
- Поліноміальна регресія: $R^2 = 0,414$

- Градієнтний бустинг з 400 дерев глибиною у 5 шарів: $R^2 = 0,741$
- Багатошаровий перцептрон з структурою шарів [64,32,16]: $R^2 = 0,736$.

Низька точність лінійної та поліноміальної регресії підтверджує складну нелінійну природу досліджуваного процесу. Залишки неописаної дисперсії моделей GBR та MLP можна пояснити природною варіативністю експерименту на реальному пристрої, а також похибками при паралельному вимірюванні великої кількості апаратних лічильників.

Хоча градієнтний бустинг показав дещо кращий результат з точки зору точності, критично важливим фактором вибору є обмеження обчислювальної складності на мобільній системі. Оскільки розрахунки моделі виконуються на тому самому чипі, що й основне корисне навантаження, занадто складна модель підвищуватиме енергоспоживання самого кристала та конкуруватиме за ресурси із застосунками. Тому для фінальної реалізації було обрано нейронну мережу. Вона займає значно менше оперативної пам'яті, ніж GBR (~15 КБ проти ~260 КБ), та потребує менше обчислювальних операцій для розрахунку (~8 тис. проти ~14 тис.). Важливою перевагою є також те, що щільні матричні операції нейромережі ефективно векторизуються на архітектурі ARM, а її вихідна функція є неперервною та гладкою. Остання властивість є принципово необхідною для забезпечення математичної стійкості алгоритмів автоматичного керування при замиканні контуру регулювання.

Висновки. У роботі обґрунтовано необхідність використання прямої моделі продуктивності замість сурогатних оцінок на основі потужності. Розроблена та ідентифікована модель на базі нейронної мережі дозволяє з достатньою точністю прогнозувати реакцію швидкодії системи на зміну керуючих впливів. В подальших дослідженнях: отримана модель буде інтегрована в алгоритми розподілу потужності, дозволяючи максимізувати реальну швидкодію пристрою замість максимізації споживання енергії в межах теплового ліміту

Перелік посилань:

1. Wang X. Intelligent power allocation: maximize performance in the thermal envelope. ARM Limited, 2017.
2. OS-Level PMC-Based Runtime Thermal Control for ARM Mobile CPUs / N. Che et al. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2024. P. 1. URL: <https://doi.org/10.1109/tcad.2024.3360319>.
3. Fine-grained dynamic voltage and frequency scaling for precise energy and performance tradeoff based on the ratio of off-chip access to on-chip computation times. *IEEE Transactions on Computer-Aided Design of Integrated Circuits and Systems*. 2005. Vol. 24, no. 1. P. 18–28. URL: <https://doi.org/10.1109/tcad.2004.839485>.
4. PCMark for Android Technical Guide. UL Benchmarks. URL: <https://benchmarks.ul.com/pcmark-android>.
5. Chandrashekar G., Sahin F. A survey on feature selection methods. *Computers & Electrical Engineering*. 2014. Vol. 40, no. 1. P. 16–28. URL: <https://doi.org/10.1016/j.compeleceng.2013.11.024>.

¹ Аспірант 2 курсу Кучинська К. А.¹ Доц., к.т.н. Новіков П. В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=58PUgu8AAAAJ&hl=en>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ З ФІЗИЧНИМ ПІДКРІПЛЕННЯМ (PINNS) ДЛЯ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ФІЗИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ ОБ'ЄКТА

Постановка проблеми та її актуальність. Розвиток концепції Індустрії 4.0 та 5.0 висуває нові вимоги до систем автоматизації, де ключову роль відіграють цифрові двійники (Digital Twins). У сфері інтелектуального теплопостачання будівель, зокрема при експлуатації модульних конденсаційних котлів, створення адекватних цифрових копій ускладнюється динамічною зміною параметрів обладнання через деградацію, зміну зовнішніх умов та нелінійність теплофізичних процесів. Традиційні методи ідентифікації параметрів часто виявляються недостатньо гнучкими, а класичні нейронні мережі (NN), попри свою потужність, працюють як «чорна скринька». Вони можуть генерувати фізично некоректні прогнози (наприклад, миттєві стрибки температури або від'ємні значення) поза межами навчальної вибірки, що є критичним для безпеки та ефективності автоматизованих систем.

Вирішенням цієї проблеми є застосування нейронних мереж на базі фізичного підкріплення (Physics-Informed Neural Networks, PINNs). Це прогресивний клас моделей, у яких процес навчання здійснюється з явним урахуванням фундаментальних фізичних законів. На відміну від стандартних методів глибокого навчання, PINNs поєднують гнучкість нейронних мереж із математичним описом динаміки об'єкта у формі диференціальних рівнянь. Ключова перевага такого підходу полягає в інтеграції фізичних закономірностей безпосередньо у функцію втрат, що дозволяє моделі мінімізувати не лише похибку апроксимації даних, а й нев'язку фізичних рівнянь.

Актуальність даного дослідження зумовлена необхідністю розробки надійних інструментів для ідентифікації параметрів теплових процесів. На даному етапі робота фокусується на застосуванні PINNs для визначення теплофізичних характеристик експериментального об'єкта (системи транзисторів), де один елемент є активним джерелом тепла, а інший перебуває під впливом конвективного та радіаційного теплообміну. Ідентифікація таких параметрів, як маса (m), питома теплоємність (C_p), коефіцієнт тепловіддачі (U), площа охолодження (A) та коефіцієнт випромінювання (ϵ), є необхідним кроком для подальшого масштабування методу на складні теплотехнічні об'єкти, такі як модульні конденсаційні котли, та їх інтеграції в інтелектуальні системи керування.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукової літератури свідчить, що впровадження підходу PINN, запропонованого М. Раїссі та Г. Карніадакісом [1], стало проривним рішенням для ідентифікації параметрів динамічних систем шляхом інтеграції диференціальних рівнянь безпосередньо у функцію втрат нейронної мережі. Сучасні дослідження у галузі фізично-інформованого машинного навчання (PIML) [2] підтверджують, що таке поєднання глибокого навчання з фундаментальними законами фізики дозволяє створювати стійкі до шуму моделі, які забезпечують фізичну коректність прогнозів навіть за обмеженого обсягу експериментальних даних. Зокрема, комплексні огляди останніх років акцентують увагу на ефективності використання PINN як інтелектуального ядра цифрових двійників, що завдяки механізмам автоматичного диференціювання та високій обчислювальній гнучкості відкриває нові можливості для адаптивного керування та точної ідентифікації характеристик складних об'єктів у режимі реального часу.

Формулювання мети. Розробка та експериментальне відпрацювання методики ідентифікації теплофізичних параметрів об'єктів автоматизації на основі нейронних мереж із фізичним підкріпленням (PINN). Дослідження спрямоване на розв'язання зворотної задачі теплообміну шляхом інтеграції нелінійних диференціальних рівнянь у функцію втрат моделі, що дозволяє забезпечити фізичну коректність цифрових двійників та їхню адаптивність до динамічних змін характеристик теплотехнічного обладнання.

Основна частина. На відміну від класичних нейронних мереж, архітектура Physics-Informed Neural Networks (PINNs) базується на багатошаровому перцептроні (MLP), де процес навчання регулюється не лише експериментальними даними, а й фундаментальними фізичними законами. Механізм автоматичного диференціювання (Automatic Differentiation, AD) дозволяє обчислювати точні значення похідних виходу мережі за вхідними параметрами (наприклад, $\frac{dT}{dt}$), що дає змогу будувати комбіновану функцію втрат:

$$L_{\text{total}} = \omega_{\text{data}} L_{\text{data}} + \omega_{\text{phys}} L_{\text{physics}}, \quad (1)$$

де L_{data} мінімізує середньоквадратичну помилку (MSE) між прогнозом та вимірюваннями, L_{physics} штрафує модель за порушення нев'язки диференціального рівняння, а ω_{data} та ω_{phys} – вагові коефіцієнти.

Для апробації методу було обрано модель теплової взаємодії двох транзисторів. Активний транзистор генерує тепло Q_1 , яке розсіюється у довкілля та передається сусідньому пасивному елементу. Тепловий баланс системи описується рівнянням, що враховує складну комбінацію конвективного та радіаційного теплообміну:

$$m C_p \frac{dT_1}{dt} = UA(T_{\infty} - T_1) + \varepsilon \sigma A(T_{\infty}^4 - T_1^4) + UA_s(T_2 - T_1) + \varepsilon \sigma A_s(T_2^4 - T_1^4) + Q_1, \quad (2)$$

де T_1 – температура досліджуваного транзистора, К; T_2 – температура другого транзистора (контактної поверхні), К; T_{∞} – температура навколишнього середовища, К; m – маса транзистора, кг; C_p – питома теплоємність матеріалу, Дж/(кг·К); U – коефіцієнт тепловіддачі (конвекції), Вт/(м²·К); A – площа теплообміну з навколишнім середовищем, м²; A_s – площа контакту між тілами, м²; ε – коефіцієнт випромінювання поверхні, безрозмірна величина; σ – стала Стефана–Больцмана, $\sigma = 5.67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м²·К⁴); Q_1 – внутрішня потужність тепловиділення в тілі, Вт.

Механізм параметричної ідентифікації в межах даного підходу базується на розв'язанні зворотної задачі математичної фізики. Ключовою відмінністю реалізованого підходу від класичного машинного навчання є те, що шукані фізичні коефіцієнти вводяться в обчислювальний граф нейронної мережі як вільні навчальні параметри, нарівні з вагами (ω) та зміщеннями (b) нейронів. Процес ідентифікації базується на принципі зворотного поширення помилки через фізичне рівняння.

Для забезпечення фізичної адекватності ідентифікованих значень застосовано сигмоїдну трансформацію:

$$\lambda_{\text{phys}} = \sigma(\lambda_{\text{raw}}) \cdot (\lambda_{\text{max}} - \lambda_{\text{min}}) + \lambda_{\text{min}}, \quad (3)$$

що гарантує перебування параметрів у заданих інженерних межах. Процес ідентифікації реалізується через спільну оптимізацію ваг мережі та фізичних констант, де градієнти помилки поширюються через диференціальне рівняння завдяки механізму автоматичного диференціювання. Це дозволяє системі самостійно підбирати такі значення маси, теплоємності та площі, за яких енергетичний баланс виконується з мінімальною нев'язкою в кожній точці часового ряду.

Для навчання та верифікації моделі PINN було використано масив даних, отриманих у ході серії лабораторних експериментів. Загальна вибірка включає 9 наборів даних, кожен з яких описує повний цикл нагріву та охолодження системи під впливом ступеневих змін керуючого сигналу u_1 . Вимірювання включали часові ряди температури активного транзистора (T_1), пасивного транзистора (T_2) та температури навколишнього середовища (T_{∞}). Керуючий вплив u_1 подавався у вигляді послідовності імпульсів різної амплітуди (від 10% до 50% номінальної потужності), що забезпечило збурення системи в

широкому динамічному діапазоні та дозволило моделі PINN ідентифікувати параметри об'єкта в різних теплових режимах.

На основі проведення 25 000 епох навчання на експериментальних даних було успішно ідентифіковано ключові фізичні характеристики досліджуваного об'єкта. Зокрема, коефіцієнт тепловіддачі $U = 4,4476$ Вт/(м²·К), маса об'єкта $m = 0,003816$ кг, а питома теплоємність $C_p = 483,32$ Дж/(кг·К). Площа охолодження A була визначена на рівні 0,000972 м², площа контакту $A_s = 0,000169$ м², а коефіцієнт випромінювання поверхні ε склав 0,6702. Верифікація отриманих параметрів шляхом порівняння прогнозу PINN із реальними замірами показала високу точність ідентифікації: середня абсолютна помилка у відсотках (MAPE) для активного транзистора склала лише 0,93 %, а середня MSE – 0,397 °С (рис. 1). Такі показники підтверджують стійкість методу до шумів вимірювальної системи та здатність PINN виділяти реальні фізичні закономірності.

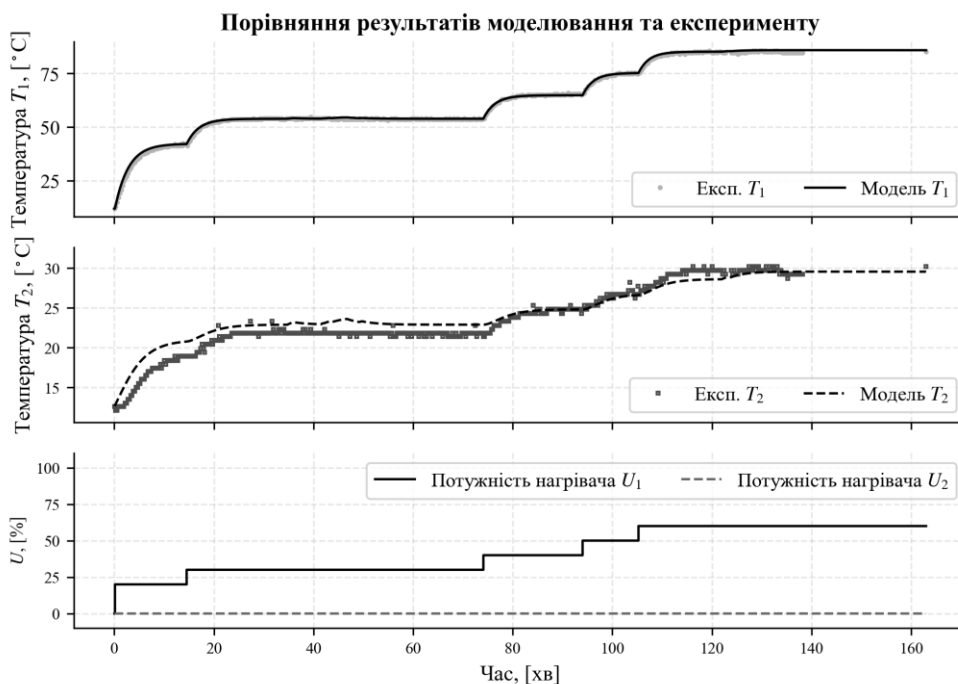


Рисунок 1 – Порівняння результатів моделювання та експерименту

Висновки. Проведене дослідження підтверджує ефективність застосування нейронних мереж на базі фізичного підкріплення для ідентифікації параметрів теплових процесів у задачах автоматизації. Доведено, що інтеграція диференціальних рівнянь у функцію втрат нейронної мережі дозволяє отримувати фізично коректні цифрові моделі з високою прогностичною здатністю навіть за обмеженого обсягу навчальних даних. Успішна апробація методу на системі транзисторів створює підґрунтя для його впровадження у складніші теплотехнічні системи. Перспективою подальших досліджень є використання розробленого інструментарію PINN для створення адаптивних цифрових двійників модульних конденсаційних котлів, що дозволить інтелектуальним системам керування будівлями автоматично підлаштовуватися під зміну експлуатаційних характеристик обладнання, забезпечуючи оптимальні режими теплопостачання та енергозбереження.

Перелік посилань:

1. Interface PINNs (I-PINNs): A physics-informed neural networks framework for interface problems / A. K. Sarma et al. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2024. Vol. 429. P. 117135. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cma.2024.117135>.
2. Physics-informed machine learning / G. E. Karniadakis et al. *Nature Reviews Physics*. 2021. URL: <https://doi.org/10.1038/s42254-021-00314-5>.

¹ Бакалаврант 2 курсу Туранський С. К.; ¹ Бакалаврант 2 курсу Шваб М. І.

¹ Асист. Захарченко А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=RpOI6DoAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОГРАМНО-ТЕХНІЧНИЙ КОМПЛЕКС КОЛАБОРАТИВНОГО МАНІПУЛЯТОРА МҮСОВОТ 280 ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ КОМП'ЮТЕРНОГО ЗОРУ НА БАЗІ ЦИФРОВОГО ДВІЙНИКА.

Постановка проблеми та її актуальність. Незважаючи на стійку тенденцію до автоматизації технологічних процесів, у багатьох підприємств та виробничих ділянках зберігається висока частка рутинної ручної праці, що призводить до варіативності результатів, зниження продуктивності та підвищення операційних витрат. Особливо актуальною є автоматизація процесів у середовищах з підвищеним рівнем небезпеки або високими вимогами до точності виконання операцій. Впровадження роботизованих систем дозволяє забезпечити детермінованість процесів та знизити виробничі ризики. Проте ефективне функціонування таких систем потребує належного програмного налаштування, технічного обслуговування та інтеграції із системами комп'ютерного зору.

Аналіз досліджень. Сучасна концепція Industry 4.0 передбачає інтеграцію робототехнічних систем, штучного інтелекту та цифрових технологій у виробничі процеси. Окремого розвитку набули колаборативні роботи (коботи), які характеризуються компактністю, гнучкістю налаштування та можливістю безпечної взаємодії з оператором [1]. Однак їх інтеграція із системами комп'ютерного зору на фізичному обладнанні потребує значних витрат часу на формування навчальних вибірок, налагодження алгоритмів розпізнавання та тестування програмного забезпечення у реальних умовах [1], [2]. У зв'язку з цим актуальним напрямом є створення цифрових двійників робототехнічних систем та генерація синтетичних датасетів для навчання алгоритмів машинного зору.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка елементів цифрового двійника роботизованої маніпуляційної системи з модулем комп'ютерного зору для генерації синтетичних датасетів та оптимізації навчання алгоритмів розпізнавання без використання фізичного обладнання.

Основна частина. Розроблений програмний комплекс об'єднує графічний інтерфейс користувача, 3D-симуляцію (Unity) та консольний Python-модуль. Програмний комплекс має простий та зрозумілий інтерфейс для ПК (рисунк 1), в якому відображено основні функції. Функціонал реалізовано через такі підсистеми:

- Генерація та навчання: автоматизоване формування датасетів для задачі сортування за кольором із налаштуванням параметрів, таких як базові значення шуму, яскравості, розміру, та їх допустимої варіації. Процес налаштування передбачає вибір якості зображення, їх кількості, кольорів, що розпізнає система, а також конфігурацію гіперпараметрів навчання нейромережі (виділені ресурси системи, розмір батчу, якість зображення на яке розрахована мережа, поріг валідації тощо) [2, 3].
- Кінематика і візуалізація: програмна частина, що відповідає за розрахунок кутів поворотів сервоприводів в автоматичному/ручному режимах та налаштування положень елементів робочого столу в вигляді сховищ для сортування тощо. 3D візуалізація в Unity дозволяє в режимі реального часу виконувати моніторинг поведінки маніпулятора включно з відображенням координат кінця маніпулятора для аналізу його роботоздатності, з можливістю зміни положення віртуальної камери або ручним заданням кутів для відладки та експериментів (рис. 1) [1].

- Моніторинг та інтеграція: реалізація включає механізм логування із детальною інформацією про стан системи та події, що відбуваються в системі. Автономний консольний Python-скрипт завантажує та валідує бінарні ваги навченої моделі, оптимізуючи системні ресурси.

Програмна частина на Python реалізує керування через консоль для оптимізації, що має забезпечити в майбутньому основу для безперебійної роботи без потреби втручання в процес окремого оператора в робочому режимі після налаштування та запуску. Ця частина відповідає за завантаження готових вагів нейромережі, отриманих в результаті роботи тренувальної складової розробленого програмного забезпечення, в якій інформація передається та зберігається у бінарному форматі з чіткою структурою для забезпечення можливості зручно їх завантажувати та перевіряти, що може бути актуальним в процесі пуско-налагоджувальних робіт.

Реалізований функціонал інтегрується з готовим програмним забезпеченням колаборативного робота MyCobot, утворюючи програмний комплекс, готовий до тестування і безпосередньої роботи на фізичному обладнанні. Для тестування запропонованого програмного забезпечення було виконано виконання навчання який передбачає сортування кубів по чотирьох сховищах за кольором.

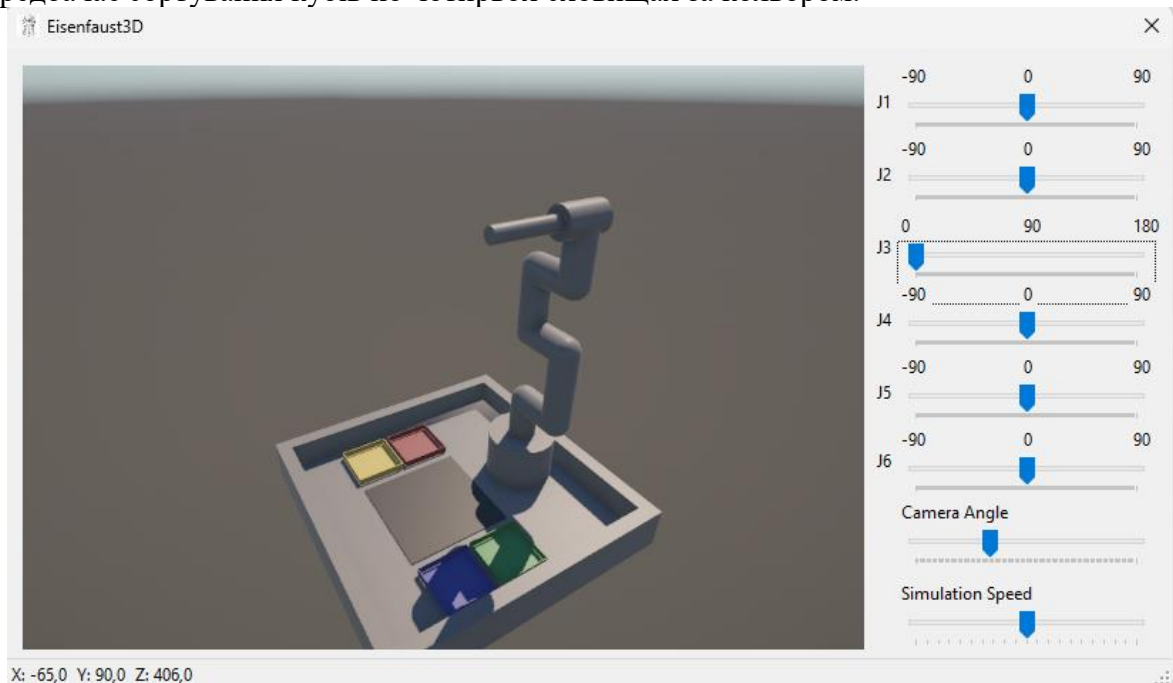


Рисунок 1 – Демонстрація вікна 3D візуалізації

Висновки. Розроблено цифрову модель роботизованого маніпулятора, що відтворює кінематичні характеристики фізичного прототипу. Реалізовано механізм автоматизованої генерації синтетичного датасету для задач комп'ютерного зору. Доведено можливість використання синтетичних даних для попереднього навчання алгоритмів розпізнавання з подальшим донавчанням на обмеженій кількості реальних зразків. Використання цифрового двійника дозволяє зменшити часові та ресурсні витрати на етапі налагодження роботизованої системи.

Перелік посилань:

1. Quigley M. et al. ROS: an open-source Robot Operating System // ICRA workshop on open source software. – 2009. – Vol. 3, No. 3.2.
2. Tremblay J. et al. Training Deep Networks with Synthetic Data: Bridging the Reality Gap by Domain Randomization // CVPR Workshops. – 2018.
3. Goodfellow I., Bengio Y., Courville A. Deep Learning. – MIT Press, 2016. – 800 p.

¹ Аспірант 3 курсу Здольник М. О.

¹ Доц., к.т.н. Степанець О. В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=Kq9ce50AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОТОКОЛ КООРДИНАЦІЇ МУЛЬТИАГЕНТНОЇ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИМ ТЕПЛОВИМ ПУНКТОМ

Постановка проблеми та її актуальність

Індивідуальні теплові пункти (ІТП) житлових будинків потребують одночасного задоволення кількох суперечливих критеріїв: забезпечення комфортної температури в приміщеннях, мінімізації енерговитрат з урахуванням тарифної сітки та підтримки ресурсу обладнання (насоси, клапани). Класичний ПІД-регулятор ефективно стабілізує температуру подачі, проте оперує єдиним критерієм - відхиленням від уставки - і не здатний самостійно балансувати між комфортом та економією або враховувати прогноз погоди [1]. Мультиагентні системи (МАС) дозволяють розподілити ці критерії між спеціалізованими агентами, однак ключовою проблемою залишається протокол координації, який гарантує безпечне та передбачуване прийняття колективних рішень [2]. Актуальність роботи полягає у відсутності простого, верифікованого протоколу координації МАС для типових задач теплоенергетики.

Аналіз останніх досліджень

Фогель-Гойзер та ін. [2] показали, що МАС є перспективним підходом для розподіленого керування в рамках Industry 4.0, але зазначають слабе промислове впровадження через відсутність стандартних протоколів взаємодії. Серед відомих механізмів координації: протокол Contract Net [3] передбачає торги між агентами і підходить для задач розподілу ресурсів, проте не забезпечує пріоритетного захисту критичних обмежень (безпека, ресурс обладнання). Аукціонні механізми потребують явного визначення функцій корисності для кожного агента. Зважене голосування усуває конфлікти, але не дозволяє гарантувати дотримання жорстких обмежень [4]. Навчання з підкріпленням (RL) демонструє потенціал для автономного керування [5], але потребує тривалого навчання та ускладнює верифікацію рішень. Таким чином, існує потреба у протоколі, який поєднує прозорість прийняття рішень із гарантованим дотриманням обмежень різного пріоритету.

Формулювання мети

Метою дослідження є розробка та верифікація протоколу координації мультиагентної системи керування ІТП, який забезпечує пріоритетне вирішення конфліктів між агентами та перевірку рішень на імітаційній моделі контуру регулювання перед застосуванням до об'єкта.

Основна частина

Запропоновано архітектуру МАС, яка працює як надбудова над класичним контуром ПІД-регулювання. ПІД-регулятор виконує безперервне керування температурою подачі теплоносія, а МАС періодично (кожні 15 секунд) коригує уставку регулятора, враховуючи критерії комфорту мешканців, енергоефективності з урахуванням тарифної сітки та відповідності температурному графіку. Об'єкт керування - контур температури подачі теплоносія ІТП - описується передавальною функцією:

$$W(s) = \frac{K}{(T_1s+1)(T_2s+1)} \cdot e^{-\tau s}, \quad (1)$$

де $K = 0,58$ – коефіцієнт передачі, $T_1 = 20$ с, $T_2 = 18$ с – сталі часу, $\tau = 16$ с – транспортне запізнення.

Система складається з шести спеціалізованих агентів, кожен з яких відповідає за окремий критерій:

1. агент погодозалежного керування (пріоритет COMFORT) - розраховує бажану уставку за температурним графіком $SP=30 + 1,0 * \max(0; 20 - T_{зовн})$;
2. агент опалення (SAFETY) - контролює відхилення температури подачі від уставки та захищає від аварійних ситуацій;
3. агент комфорту (COMFORT) - відстежує температуру в приміщенні та індекс комфорту;
4. агент енергоефективності (EFFICIENCY) - мінімізує витрати з урахуванням тарифної сітки;
5. агент насосів (AVAILABILITY) - контролює мотогодини та ініціює перемикання між основним і резервним насосами;
6. предиктивний агент (COMFORT) - на основі Ridge-регресії прогнозує температуру в приміщенні на горизонт 45 с і пропонує випереджувальну корекцію уставки.

Запропонований протокол координації реалізує три етапи прийняття рішень: збір та ранжування пропозицій, голосування з правом вето, верифікація на імітаційній моделі.

Результати моделювання (рис.1) показують, що протокол забезпечує: (а) автоматичну адаптацію уставки при зміні зовнішньої температури з витримкою температурного графіку; (б) захист комфорту – агент комфорту блокує зниження уставки при дискомфорті через вето, яке не може бути подолане агентом з нижчим пріоритетом; (в) економію енергії – агент ефективності знижує уставку при перегріві або під час дорогого тарифу, але лише з дозволу інших агентів; (г) верифікацію безпеки – імітаційна модель відсікає рішення, що призводять до нестабільності контуру регулювання.

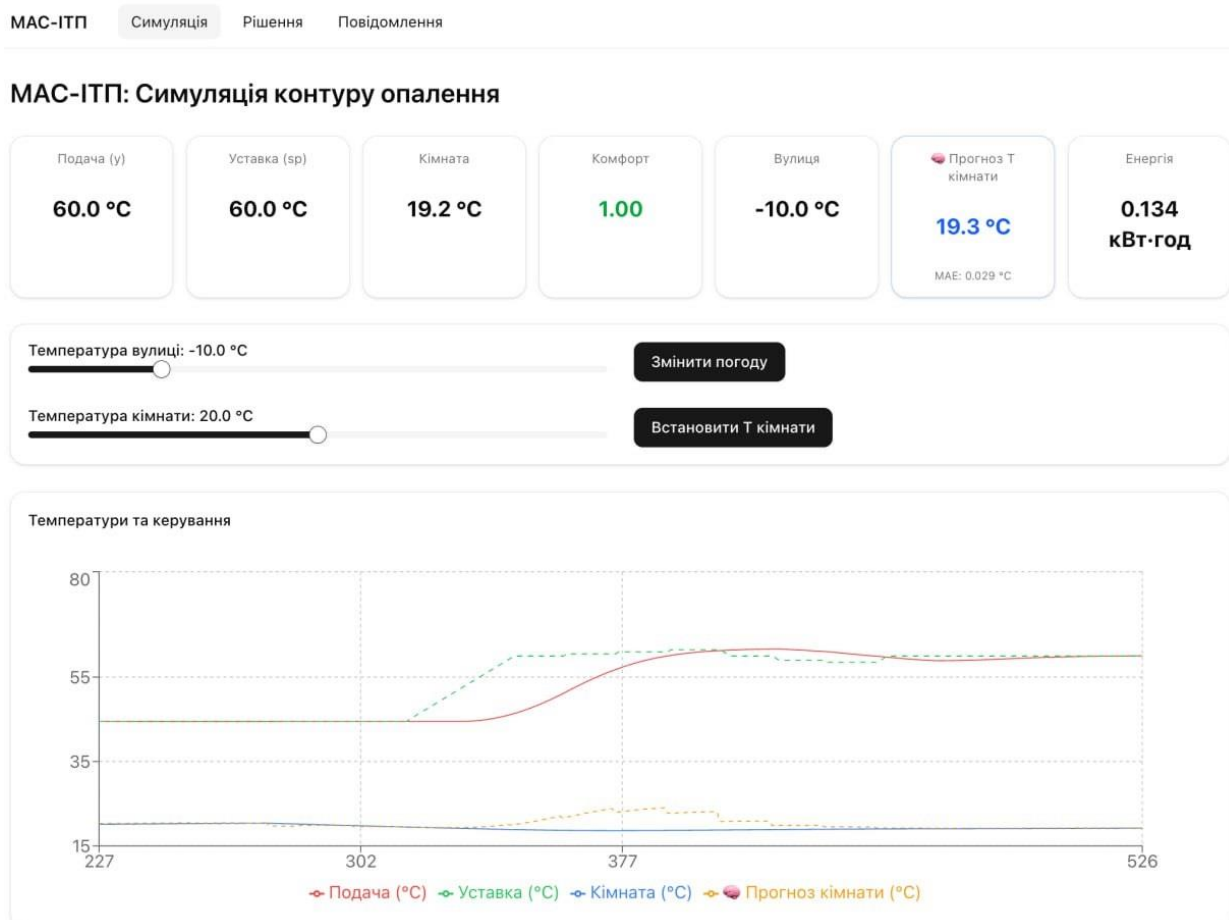


Рисунок 1 – Результат імітаційного моделювання

Етап 1 – Збір та ранжування пропозицій. Кожен агент аналізує поточний стан та, за наявності потреби, формує пропозицію - дію з описом, прогнозованими КРІ та рівнем пріоритету. Пропозиції сортуються за пріоритетом: SAFETY (4) > AVAILABILITY (3) > COMFORT (2) > EFFICIENCY (1).

Етап 2 – Голосування з правом вето. Для кожної пропозиції (починаючи з найвищого пріоритету) решта агентів голосують: «approve», «veto» або «abstain». Вето від агента з рівним або вищим пріоритетом блокує рішення. Наприклад, агент комфорту може заблокувати пропозицію агента енергоефективності про зниження уставки, якщо індекс комфорту вже нижче порогового значення 0,6.

Етап 3 – Верифікація на імітаційній моделі. Якщо пропозиція пройшла голосування, координатор запускає імітацію на копії моделі об'єкта (1) з поточними параметрами ПІД-регулятора на горизонт 120 кроків. Рішення приймається, якщо модель підтверджує стабілізацію (потрапляння в зону ± 1 °C від нової уставки) та перерегулювання менше 15 %.

Додатково реалізовано механізм ескалації: якщо протягом трьох послідовних раундів жодне рішення не прийнято (deadlock), координатор бере пропозицію з найвищим пріоритетом і перевіряє її лише на імітаційній моделі, без голосування.

Прототип реалізовано як веб-систему (Next.js, TypeScript), що дозволяє в реальному часі спостерігати за роботою МАС: пропозиції агентів, голосування, результати верифікації та прийняті рішення. Імітаційна модель включає контур ПІД-регулювання, спрощену модель кімнатної температури та добовий цикл тарифів.

Висновки

Запропоновано протокол координації МАС для керування ІТП, який поєднує голосування з пріоритетним правом вето та верифікацію на імітаційній моделі контуру. Наукова новизна полягає у комбінації трьох механізмів - пріоритетного вето, модельної верифікації та ескалації при deadlock - в єдиному протоколі для задачі теплопостачання. Протокол забезпечує прозорість прийняття рішень, гарантоване дотримання обмежень безпеки та комфорту, а також запобігає нестабільним рішенням через перевірку на моделі. Подальші дослідження передбачають кількісне порівняння трьох режимів (ПІД, реактивна МАС, МАС з предиктивним агентом) та перехід до динамічних пріоритетів агентів.

Перелік посилань:

1. Advanced PID control / ed. By T. Hägglund. Research Triangle Park, NC : ISA-The Instrumentation, Systems, and Automation Society, 2006. 460 p.
2. Multi-agent systems to enable Industry 4.0 / B. Vogel-Heuser et al. at - Automatisierungstechnik. 2020. Vol. 68, no. 6. P. 445–458. URL: <https://doi.org/10.1515/auto-2020-0004> (date of access: 27.02.2026).
3. Smith. The Contract Net Protocol: High-Level Communication and Control in a Distributed Problem Solver. *IEEE Transactions on Computers*. 1980. Vol. C-29, no. 12. P. 1104–1113. URL: <https://doi.org/10.1109/tc.1980.1675516> (date of access: 27.02.2026).
4. Wooldridge M. An introduction to multiagent systems. Chichester, England : J. Wiley, 2002. 348 p.
5. Reinforcement Learning for Autonomous Process Control in Industry 4.0: Advantages and Challenges / N. Nievas et al. *Applied Artificial Intelligence*. 2024. Vol. 38, no. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/08839514.2024.2383101> (date of access: 27.02.2026).

¹ Бакалаврант 3 курсу Олійник Д. А.; ¹ Бакалаврант 3 курсу Климюк А. С.;

¹ Бакалаврант 3 курсу Чмихало Б. О.

¹ Асист. Захарченко А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=RpOI6DoAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ТА РОЗРОБКА НАВЧАЛЬНОГО СТЕНДА-БАЛАНСИРА ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК ПІД-РЕГУЛЯТОРА

Постановка проблеми та її актуальність. Стенд-балансир – це класичний навчально-дослідницький об'єкт автоматичного управління, у якому необхідно стабілізувати положення кульки на двох направляючих, шляхом динамічної зміни кута прощини, що вони утворюють. Наявність в об'єкта астатизму 2-го порядку, це робить робить його ідеальним середовищем для дослідження впливу традиційних та специфічних законів регулювання.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка апаратно-програмного комплексу та математичної моделі навчально-дослідницького стенда-балансира для практичного дослідження впливу параметрів ПІД-регулятора на динамічні характеристики системи автоматичного керування (САР). Об'єктом дослідження є процес автоматичної стабілізації положення об'єктів з астатизмом 2-го порядку. Предметом дослідження є параметри ПІД-регулятора та їх вплив на динамічні характеристики САР.

Основна частина. Основна особливість конструкції полягає у тому, що обертовий рух безпосередньо передається до направляючих. Це суттєво спрощує моделювання та розрахунки, однак накладає жорсткі обмеження на крутний момент виконавчого механізму (ВМ).

Механічна частина стенда спроектована за допомогою САД-систем, а її корпусні деталі виготовлені методом 3D-друку (рисунок 1). Робоча площина (балансир) складається з двох паралельних металевих трубок, об'єднаних спроектованими тримачами. Центральний вузол кріплення рухомо з'єднаний із базовою платформою. У середині бази компактно розміщено електронну апаратну частину: мікроконтролер, підсистему живлення, а також інтерфейсні модулі для відображення та локальної зміни налаштувань регулятора.

Кінематичний зв'язок реалізовано за допомогою важеля, що передає зусилля від серводвигуна до центрального тримача напрямних, змінюючи кут їх нахилу. На одному з торцевих тримачів жорстко зафіксовано датчик відстані. Важливою експлуатаційною перевагою розробленого корпусу є його модульність: конструкція дозволяє швидко замінювати металеві напрямні на трубки іншої довжини. Це дає змогу легко змінювати габарити робочої зони та розширювати діапазон експериментальних досліджень САР.

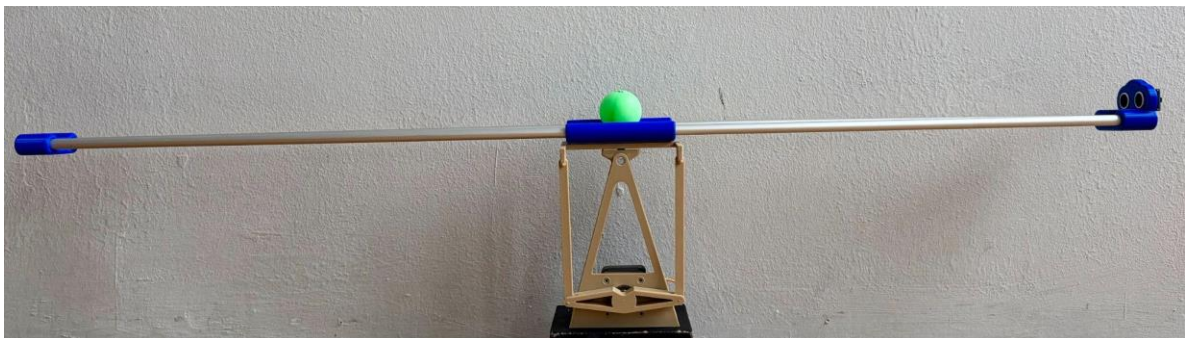


Рисунок 1 – Стенд-балансир

Положення кульки на площині балансира визначається ультразвуковим датчиком HC-SR04. Мікроконтролер ESP32, порівнюючи поточне значення зі значенням уставки, обчислює сигнал неузгодженості. Значення завдання в даній реалізації є жорстко заданим і відповідає центру досліджуваної площини. Автоматичне регулювання відбувається за ПД-законом регулювання, або будь-якого його похідної форми при вимкнених пропорційній, диференціальній чи інтегральній частині. За виходом регулятора формується ШІМ-сигнал, який подається на виконавчий механізм.

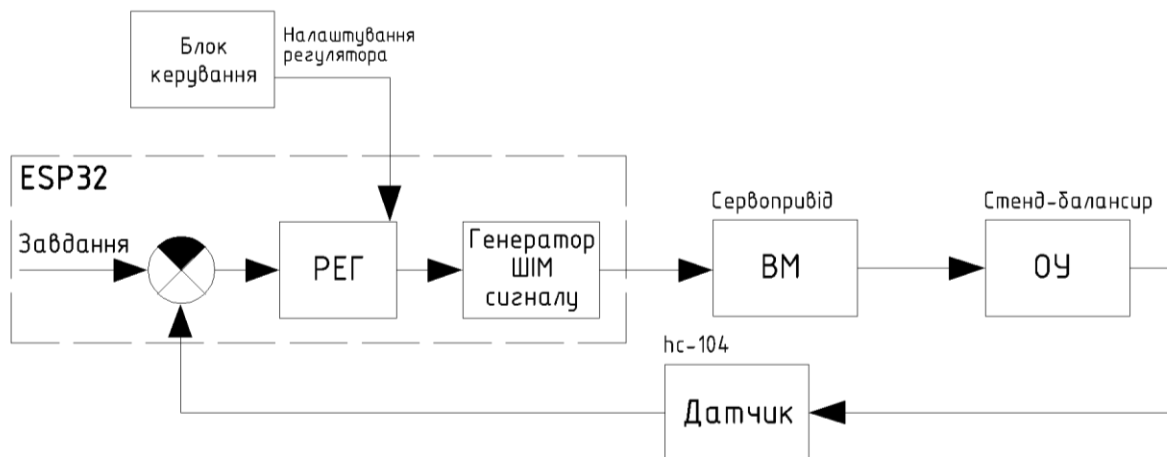


Рисунок 2 – Контур САР станду-балансиру

Оскільки дана система не передбачає динамічної зміни завдання, це означає, основним каналом роботи, дослідження і налаштування САР є канал «збурення-вихід», де користувач може механічно виводити кульку з стану рівноваги, ініціюючи таким чином процес автоматичного балансування.

На рис.2 наведено загальну структурну схему системи, яка ілюструє взаємодію її апаратних і логічних елементів, а також напрямки інформаційних потоків. Важливою функціональною перевагою використаного блока керування та реалізованої програми мікроконтролера є підтримка зміни коефіцієнтів ПД-регулятора в режимі реального часу (так зване «гаряче» налаштування) без зупинки роботи лабораторного станда.

Математична модель об'єкта управління може бути описана як залежність відстані між кулькою та датчиком від кута нахилу направляючих. Силою тертя кульки можна знехтувати, оскільки вона має незначний вплив у порівнянні з іншими силами. Відповідно, на кульку діють сили лінійного переміщення та обертового руху, описаних в (1) і (2) [1].

$$F_{\text{лін}} = m \frac{d^2x}{dt^2} = mx''; \quad (1)$$

$$M = F_{\text{об}}r = I \frac{d\omega}{dt} = I \frac{d(\frac{v}{r})}{dt} = \frac{I}{r} \frac{dv}{dt} = \frac{I}{r} \frac{d^2x}{dt^2} = \frac{I}{r} x'', \text{ звідки} \quad (2)$$

$$F_{\text{об}} = \frac{I}{r^2} x'',$$

де $F_{\text{лін}}$ – сила лінійного переміщення,

$F_{\text{об}}$ – сила обертового руху,

m – маса кульки,

x – відстань яку проходить кулька,

M – момент сили,

r – радіус кульки,

I – момент інерції кульки,

ω – кутова швидкість кульки,

v – лінійна швидкість кульки,

t – час.

Момент інерції кульки можна розглядати як момент інерції суцільної сфери, тобто:

$$I = \frac{2}{5}mr^2. \quad (3)$$

Підставляючи формулу (3) у формулу (2) отримуємо:

$$F_{об} = \frac{2}{5}mx''. \quad (4)$$

Відповідно до другого закону Ньютона:

$$F_{лін} + F_{об} = mg \cdot \sin\alpha, \quad (5)$$

де g – прискорення вільного падіння,

α – кут нахилу направляючих.

Підставляючи формули (4) та (1) у формулу залежності (5) отримуємо залежність позиція кульки від кута нахилу направляючих:

$$\begin{aligned} mx'' + \frac{2}{5}mx'' &= mg \cdot \sin\alpha; \\ x'' &= \left(1 + \frac{2}{5}\right)^{-1} \cdot g \cdot \sin\alpha = \frac{5}{7}g \cdot \sin\alpha \end{aligned} \quad (6)$$

$$x'' = \frac{5}{7}g \cdot \sin\alpha. \quad (7)$$

Отримана математична модель (7), дозволяє розраховувати початкові параметри налаштування ПД-регулятора за певним обраним критерієм. У процесі роботи користувач може візуально спостерігати різницю між поведінкою ідеальної математичної моделі та реального об'єкта, а також оцінювати такі прямі показники якості перехідного процесу, як перерегулювання, коливальність, час перехідного процесу, динамічну та статичну похибки. Передбачено можливість зміни параметрів ПД-регулятора в реальному часі для дослідження їхнього впливу на систему.

Висновки. Створений апаратно-програмний стенд дозволяє наочно досліджувати процеси автоматичного регулювання та вплив налаштувань регулятора на прямі характеристики перехідного процесу. Розроблена математична модель слугує базою для аналітичного розрахунку параметрів системи та порівняльного аналізу поведінки віртуального і фізичного об'єктів керування.

Перелік посилань:

1. Marta Virseda. Modeling and Control of the Ball and Beam Process. Department of Automatic Control Lund Institute of Technology. 2004. pp. 12–14. URL: <https://files01.core.ac.uk/download/pdf/289940555.pdf>

¹ Аспірант 3 курсу Сельоткін В. О.

¹ Доц., д.т.н. Волощук В. А.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=Gdu5LckAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОД КЕРУВАННЯ РОБОТИЗОВАНИМ МАНІПУЛЯТОРОМ ДЛЯ ЗАХОПЛЕННЯ ДЕФЕКТНИХ КОМПОНЕНТ ДРУКОВАНИХ ПЛАТ НА ОСНОВІ НАВЧАННЯ З ПІДКРІПЛЕННЯМ

Постановка проблеми та її актуальність. Автоматизована інспекція друкованих плат з дефектними компонентами є складною задачею, що поєднує вимоги до точного сприйняття сцени, просторового планування та безпечної маніпуляції об'єктами. Традиційні програмно-задані роботизовані системи мають обмежену гнучкість і погано масштабуються до різноманітних конфігурацій плат та дефектів. Застосування методів навчання з підкріпленням дозволяє формувати адаптивні алгоритми керування маніпулятором, здатні узагальнювати на нові конфігурації друкованих плат та сценарії взаємодії, що є актуальним для сучасних роботизованих систем виробництва електроніки.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження демонструють ефективність навчання з підкріпленням для задач роботизованої маніпуляції, зокрема захоплення та переміщення об'єктів у симульованому середовищі. Методи глибокого навчання з підкріпленням застосовуються для роботизованого керування у безперервних просторах дій, де класичні підходи планування та вручну задані траєкторії є обмеженням у змінюваних умовах. Один із базових підходів до безперервного керування є актор-критик з детермінованим політиком (DDPG), який продемонстрував придатність до широкого класу фізичних задач керування [1]. Для підвищення стабільності навчання широко використовується PPO алгоритм, який оптимізує цільову функцію та забезпечує надійнішу збіжність у порівнянні з класичними policy-gradient підходами [2]. У задачах маніпуляції з безперервними діями часто кращу вибірково ефективність демонструє SAC підхід, що важливо для симуляцій із дорогими епізодами та контактною фізикою [3]. Для задач маніпуляції з наростаючою складністю ефективним є curriculum learning, який полягає у поступовому ускладненні задачі і зменшує ймовірність «зависання» в невдалих стратегіях на ранніх етапах навчання [4]. Окрім того, основною частиною створення системи роботизованої маніпуляції включають розробку функції винагороди, підходу до навчання та ієрархічних постановок саме для практичних сценаріїв [5].

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка та експериментальна оцінка багато крокової системи для автоматизованого захоплення дефектних компонентів друкованих плат роботизованим маніпулятором. Завдання включають поетапне ускладнення середовища, порівняння алгоритмів навчання з підкріпленням та аналіз стабільності навчання і ефективності політик управління.

Основна частина.

У даній роботі реалізовано алгоритм навчання з підкріпленням для автоматизованої маніпуляції елементами друкованої плати, де маніпулятор має знайти дефектний компонент, виконати захоплення та підняття компонента. Загальна архітектура складається з синтетичної генерації плат, симулятора взаємодії та набору навчальних фаз із поступовим ускладненням простору дій і спостережень.

У роботі порівняно PPO (on-policy) та off-policy алгоритми SAC/TD3/TQC як основні підходи для безперервного контролю. PPO використовується як стабільний базовий метод для ранніх фаз та валідації середовища. SAC розглядається як більш вибірково-ефективний метод із ентропійною регуляризациєю, релевантний для контактних задач. TQC

використовується як distributional підхід для зменшення переоцінки Q та стабілізації off-policy навчання.

Експеримент організовано як систематичне вимірювання метрик із декількома випадковими початковими умовами для оцінки варіативності, фіксованою кількістю кроків навчання та сіткою гіперпараметрів, таких як learning rate, batch size, buffer size. Основні метрики оцінювання: success rate, episode reward, steps to success, collision frequency. У зведеній таблиці результатів наведено максимальну/фінальну винагороду та оцінку стабільності для 4 алгоритмів PPO, SAC, TD3 та TQC.

Таблиця 1 – Порівняння RL-алгоритмів для різних фаз навчання

Фаза	Алгоритм	Максимальна винагорода	Фінальна винагорода	Стабільність, СКВ
1	PPO	-23.45	-26.15	± 3.09
1	SAC	-19.62	-23.11	± 3.54
1	TD3	-24.49	-27.43	± 0.52
1	TQC	-17.80	-20.04	± 0.34
2	PPO	-66.00	-73.48	± 3.65
2	SAC	-50.04	-61.23	± 15.03
2	TD3	-49.26	-57.27	± 9.54
2	TQC	-49.45	-62.61	± 6.83

Графіки на рис. 1 та рис. 2 демонструють типову динаміку тренування, спад тренувального loss та збіжність винагороди з різною дисперсією між алгоритмами на фазах 1 та 2, де окремі криві для різних конфігурацій.

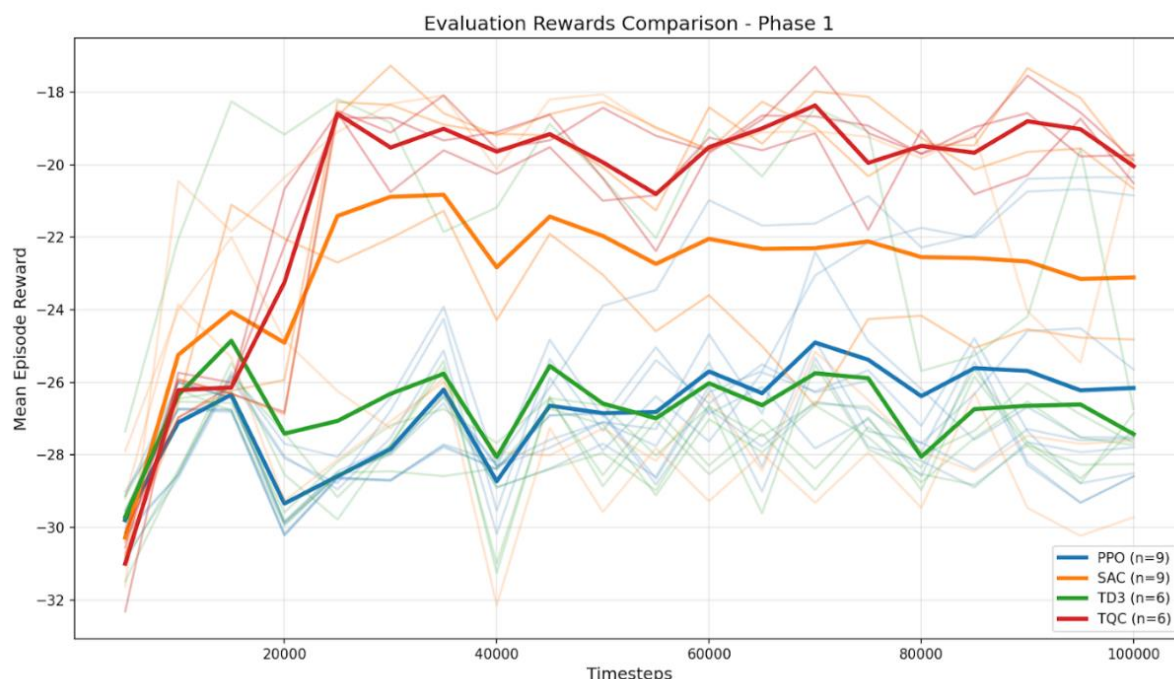


Рисунок 1 – Вимірювання винагороди від кількості кроків тренування для Фази 1

Алгоритм організовано у послідовність фаз, кожна з яких розв'язує підзадачу та готує політику до складнішої постановки:

- Фаза 1: навчання базової поведінки підведення маніпулятора до цілі з безперервними діями по 3-х осях (x, y, z). Спостереження представлені компактним вектором положень маніпулятора та відносного вектора до цілі.

- Фаза 2: додається керування орієнтацією та захоплювачем, а успіх визначається фактом захоплення та підняття компонента, що робить задачу ближчою до реальної маніпуляції.

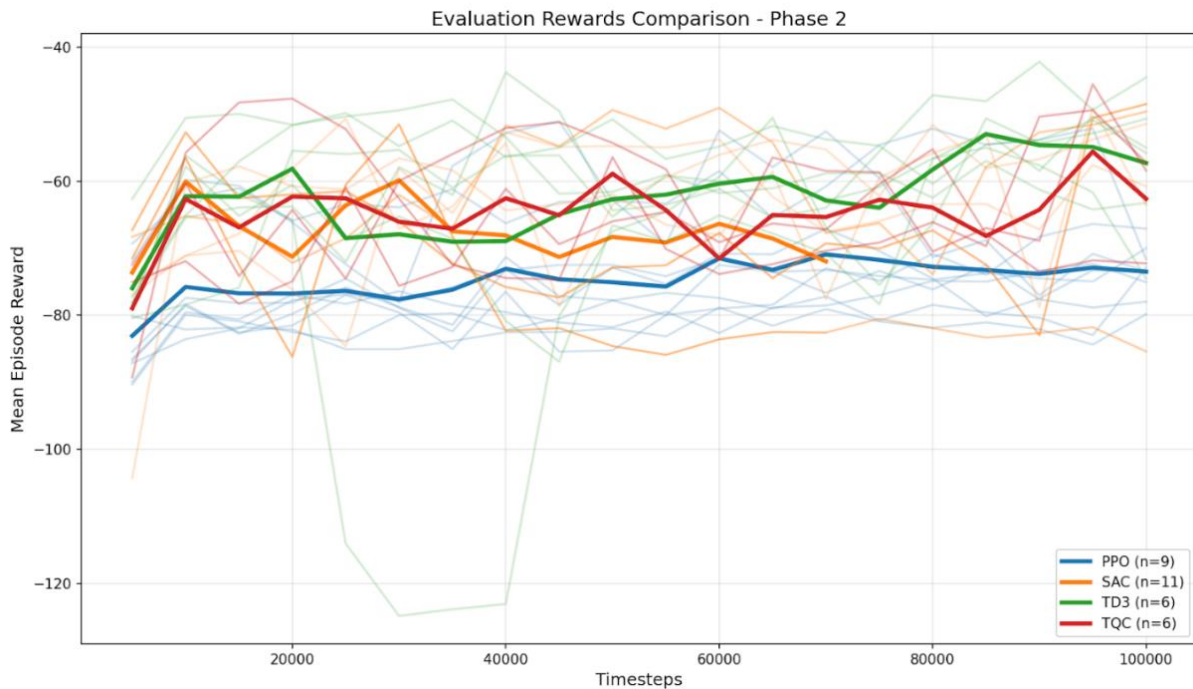


Рисунок 2 – Вимірювання винагороди від кількості кроків тренування для Фази 2

- Простір дій задається як неперервний $[-1, 1]^n$:
- $n=3$ для базових δ -зсувів у просторі (Фаза 1),
- $n=7$ для δ -позиції (3) + δ -орієнтації (3) + керування захоплювачем (1) у Фазі 2.

У алгоритмі використано винагороду на основі відстані між маніпулятором та ціллю з кроковим штрафом, а також бонус успіху при досягненні порогу; додатково враховується штраф за колізії з іншими елементами друкованої плати. Формалізація наведена як:

$$R = -|p_m - p_t| - p_{collision} - p_{step} + reward. \quad (1)$$

Висновки. Результати експериментів демонструють, що використання навчальної прогресії у поєднанні з сучасними RL-алгоритмами дозволяє досягти стабільного навчання політик керування для задач роботизованого захоплення компонентів друкованих плат. Алгоритми сімейства SAC і TQC показали кращу збіжність та меншу варіативність результатів порівняно з PPO та TD3. Запропонований підхід створює основу для подальшого переходу до реальних роботизованих систем та інтеграції з візуальними модулями інспекції друкованих плат.

Перелік посилань:

1. Lillicrap T. P., Hunt J. J., Pritzel A., Heess N. M., Erez T., Tassa Y., Silver D., & Wierstra D. (2015). Continuous control with deep reinforcement learning. arXiv: Learning.
2. Schulman J., Wolski F., Dhariwal P., Radford A., & Klimov O. (2017). Proximal Policy Optimization Algorithms. ArXiv, abs/1707.06347.
3. Haarnoja T., Zhou A., Abbeel P., & Levine S. (2018). Soft Actor-Critic: Off-Policy Maximum Entropy Deep Reinforcement Learning with a Stochastic Actor. ArXiv, abs/1801.01290.
4. Bengio Y., Louradour J., Collobert R., & Weston J. (2009). Curriculum learning. International Conference on Machine Learning.
5. Han D., Mulyana B., Stanković V., & Cheng S. (2023). A Survey on Deep Reinforcement Learning Algorithms for Robotic Manipulation. Sensors (Basel, Switzerland), 23.

¹ Бакалаврант 4 курсу Боціон С. О.

¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.

<https://scholar.google.com/citations?user=U9Xoun4AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА ДІАГНОСТИКИ ТА ПІДТРИМКИ МІКРОКЛІМАТУ СТЕНДА СЕРІЙНОГО ТЕСТУВАННЯ ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ ТЕХНІКИ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах масового виробництва та великовузлового складання обчислювальної техніки етап фінального вихідного контролю є одним із найбільш критичних та водночас ресурсомістких процесів. Необхідність проведення інтенсивних стрес-тестів для великої кількості системних одиниць в умовах обмеженого простору виробничих цехів висуває жорсткі вимоги до організації тестових майданчиків. Аналіз досвіду провідних вітчизняних виробників та великих дистриб'юторів комп'ютерної техніки підтверджує, що впровадження комплексних інтелектуальних систем на етапі випробувань дозволяє не лише масштабувати виробництво, а й суттєво підвищити пропускну здатність складальних ліній, одночасно мінімізуючи ризики, пов'язані з «людським фактором» [1].

Однією з ключових технічних суперечностей при експлуатації багатоярусних тестових стендів є температурний режим. Розміщення працюючого обладнання з високим рівнем тепловиділення у відносно закритих комірках призводить до стрімкої акумуляції теплової енергії та виникнення зон локального перегріву. Це явище не лише скорочує термін служби компонентів, а й провокує спрацювання механізмів теплового тротлінгу, що призводить до неконтрольованого зниження продуктивності та повної втрати об'єктивності результатів бенчмарків. Таким чином, актуальність даного дослідження зумовлена гострою потребою у створенні автоматизованого середовища, яке здатне забезпечити синхронне розгортання програмного забезпечення та прецизійну термостабілізацію кожної робочої зони для досягнення абсолютної чистоти та повторюваності результатів випробувань.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні тенденції розвитку промислових систем діагностики свідчать про поступовий перехід від статичних стелажних конструкцій до спеціалізованих кліматичних камер, інтегрованих у загальний контур АСУ ТП підприємства [2]. Світовий досвід проектування випробувальних стендів для електроніки вказує на те, що для отримання достовірних даних про надійність систем необхідно здійснювати активне керування параметрами навколишнього середовища в режимі реального часу, а не просто констатувати факт відмови.

Більшість класичних підходів до проектування систем охолодження базуються на статичних розрахунках повітряного обміну, які часто виявляються неспроможними в умовах динамічної зміни теплового навантаження сучасних багатоядерних процесорів та графічних адаптерів. Це підкреслює важливість впровадження науково обґрунтованих методик розрахунку мікроклімату, адаптованих для обмежених об'ємів закритих оболонок з високою щільністю тепловиділення [3].

Формулювання мети.

Метою даного дослідження є розробка структури та наукове обґрунтування принципів побудови багатоканального автоматизованого комплексу для комплексного тестування та передпродажної підготовки обчислювальної техніки. Для досягнення поставленої мети в роботі вирішуються наступні науково-технічні завдання:

- створення інтелектуальної мережевої інфраструктури;
- проектування системи адаптивного термокерування;

- побудова підсистеми апаратного енергомоніторингу;
- методологічне забезпечення прецизійних випробувань.

Основна частина. Після завершення циклу автоматичного розгортання операційної системи, керуючий сервер ініціює виконання спеціалізованого пакета кросплатформних бенчмарків та стрес-тестів. Це програмне забезпечення здійснює комплексний моніторинг обчислювальних ресурсів, що дозволяє отримати об'єктивні та верифіковані дані щодо продуктивності, стабільності роботи під критичним навантаженням та коректності функціонування апаратних складових кожної одиниці техніки [5].

Паралельно з програмною діагностикою, на апаратному рівні промисловий логічний контролер (ПЛК) безперервно здійснює функцію прецизійного енергомоніторингу та інтелектуального захисту. Система в реальному часі аналізує параметри споживання електричної енергії по кожному каналу (слоту). У разі детекції аномальних відхилень, таких як різкі стрибки сили струму, ознаки короткого замикання або вихід споживаної потужності за межі встановлених допусків для конкретної конфігурації ПК, ПЛК миттєво генерує керуючий сигнал на розмикання відповідного силового контактора. Таке вибіркове знеструмлення конкретного слота дозволяє локалізувати потенційну аварійну ситуацію та запобігти пошкодженню обладнання, не перериваючи при цьому загальний технологічний цикл тестування інших пристроїв у шафі.

Запропонована система базується на трирівневій ієрархії АСУ ТП:

1. Інформаційна автоматизація (ІТ-рівень): Центральний сервер керує процесом через локальну мережу. Використання протоколів мережевого завантаження та спеціалізованого програмного забезпечення для роботи з образами дисків дозволяє автоматично ініціалізувати встановлення ОС та запуск діагностичних скриптів [4].

2. Керування мікрокліматом (Рівень ПЛК): Для кожної висувної комірки шафи реалізується контур стабілізації температури. Математична модель теплового балансу комірки описується рівнянням:

$$T_{set} \approx T_{in} + \frac{Q_{pk}(t)}{c_p \cdot \rho \cdot G(t)}, \quad (1)$$

де $Q_{pk}(t)$ – миттєва теплова потужність ПК, $G(t)$ – витрата повітря, що створюється витяжною системою. ПЛК за допомогою ПІД-алгоритму керує швидкістю вентиляторів для підтримки стабільної температури ($22 \pm 2^\circ\text{C}$):

Автоматизація тестування та безпека. Після автоматичного розгортання ОС система запускає пакет кросплатформних бенчмарків, що забезпечує збір об'єктивних даних про продуктивність та стабільність систем [5]. Паралельно ПЛК виконує функцію енергомоніторингу та захисту: при виявленні аномальних стрибків споживання система миттєво знеструмлює конкретний слот через силовий контактор.

Висновки. У роботі запропоновано комплексний підхід до автоматизації тестувальних процесів. Поєднання РХЕ-технологій для розгортання ПЗ та ПЛК-керування мікрокліматом дозволяє створити ідентичні умови тестування для всіх об'єктів. Експериментально доведено, що активна стабілізація температури в шафі знижує ймовірність помилкових відмов через перегрів на 15-20%, що підвищує загальну пропускну здатність виробничої лінії.

Перелік посилань:

1. DCLink Group. Офіційний сайт компанії. URL: <https://dclink.ua/>
2. Ametek Reliability Solutions. Industrial Burn-in Systems. URL: <https://www.programmablepower.com/>.
3. Rittal GmbH. Thermal Management for Enclosures: Engineering and Calculation Guide.
4. FOG Project. Network Imaging and Deployment. URL: <https://docs.fogproject.org/>
Phoronix Test Suite. Open-Source Automated Benchmarking. URL: <https://www.phoronix-test-suite.com/>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Ворошилов О. Д.

¹ Ст.викл. Грудзинський Ю. Є.

<https://scholar.google.com/citations?user=w83w6ZwAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОСОБЛИВОСТІ ПОБУДОВИ АВТОМАТИЗОВАНОЇ СИСТЕМИ КОНТРОЛЮ ЯКОСТІ ВОДОПОСТАЧАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення належної якості питної води є одним із пріоритетних завдань систем централізованого водопостачання. Відповідно до вимог ДСанПіН 2.2.4-171-10 та ДСТУ 4808:2007, вода повинна відповідати встановленим санітарно-гігієнічним нормам за фізико-хімічними та мікробіологічними показниками [1, 2].

На практиці якість води залежить від багатьох факторів: складу вихідної води, ефективності очищення, режиму роботи насосних станцій та протяжності мережі. Коливання витрати води та зміна навантаження на систему можуть призводити до відхилення концентрації залишкового вільного хлору, зміни рівня рН або мутності. Саме тому впровадження автоматизованої системи контролю є актуальним напрямом модернізації водопідготовчих станцій.

Основна частина. Автоматизована система контролю якості водопостачання включає:

- первинні вимірювальні перетворювачі (датчики залишкового хлору, рН, мутності, витрати);
- програмований логічний контролер
- частотно-регульований привід дозуючого насоса;
- систему диспетчеризації.

Основною контрольованою величиною є концентрація залишкового вільного хлору перед подачею води в мережу. Датчик безперервно вимірює значення концентрації та передає сигнал до ПЛК. Контролер порівнює фактичне значення із заданим та формує керуючий сигнал на дозуючий насос.

На відміну від ручного або ступінчастого керування, використання частотного регулювання дозволяє плавно змінювати продуктивність насоса залежно від витрати води.

Це забезпечує:

- зменшення перевитрати реагенту;
- стабільніше підтримання нормативної концентрації;
- зниження енергоспоживання;
- підвищення ресурсу насосного обладнання.

Важливим елементом АСК є система диспетчерського контролю, яка забезпечує архівування параметрів, візуалізацію процесу, формування звітів та аварійну сигналізацію. У випадку зниження концентрації хлору нижче допустимого рівня або перевищення нормативу система формує попереджувальний сигнал для оператора.

У сучасних системах контролю якості водопостачання важливо не лише вимірювати залишковий хлор у кінцевій точці, а формувати «профіль хлору» по основних технологічних ділянках. Це передбачає встановлення декількох точок вимірювання залишкового хлору, як показано на рис. 1.

Для підвищення точності керування доцільно реалізувати в ПЛК модуль розрахунку показника СТ (концентрація $\times$ час контакту) з урахуванням температури води та ефективного часу контакту. Це дає змогу підтвердити достатність знезараження при

оптимізації дози хлору та одночасно зменшувати утворення побічних продуктів знезараження. У практичних дослідженнях показано можливість зниження побічних продуктів знезараження більш ніж на 50 % та зменшення дози хлору з 8 до 5–5.5 г/м³ без втрати мікробіологічної ефективності знезараження [3].

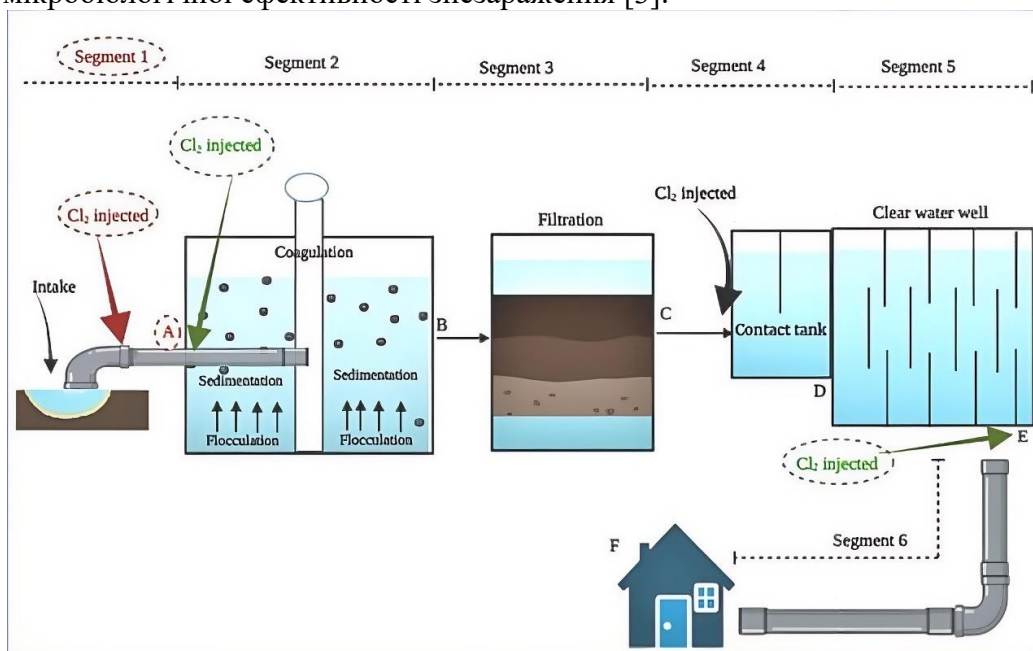


Рисунок 1 – Схема водопідготовки та сегментації процесу знезараження

Крім того, використання автоматизованої системи контролю дозволяє здійснювати комплексний моніторинг технологічного процесу водопідготовки в режимі реального часу. Дані, отримані від вимірювальних перетворювачів, передаються до системи керування та зберігаються в архіві, що дає можливість аналізувати зміну параметрів якості води протягом тривалого періоду. На основі накопиченої інформації оператор може оцінювати ефективність роботи технологічного обладнання, виявляти тенденції зміни параметрів води та своєчасно приймати рішення щодо коригування режимів роботи системи.

Висновки. Таким чином, впровадження автоматизованої системи контролю якості водопостачання дозволяє підвищити надійність функціонування станції, мінімізувати вплив людського фактору та забезпечити стабільну відповідність води санітарним нормам. Автоматизація процесу дозування реагентів є економічно доцільною та технічно обґрунтованою модернізацією систем водопідготовки.

Перелік посилань:

1. ДСанПіН 2.2.4-171-10. Гігієнічні вимоги до води питної, призначеної для споживання людиною. – Київ : МОЗ України, 2010.
2. ДСТУ 4808:2007. Джерела централізованого питного водопостачання. Вимоги щодо якості води і правила вибирання. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. URL: https://environmentallab.com.ua/wp-content/uploads/2021/12/dstu-4808_2007-dzherela-czentralizovanogo-pitnogo-vodopostachannya.-vimogi-shhodo-yakosti-vodi-i-pravila-vibirannya.pdf (дата звернення: 24.02.2026)
3. Omar B., Zalouk R., Soliman S., EL-Gammal M. Controlling Disinfection By-Products using Chlorine Profile and CT Tables at EL-Nobarya Drinking Water Treatment Plant, Egypt // Catrina: The International Journal of Environmental Sciences. – 2023. – Vol. 27(1). – P. 33–43. DOI: 10.21608/cat.2023.194317.1158 (дата звернення: 24.02.2026)
4. Методи контролю якості та безпеки питної води. – URL: <https://alt.ua/blog/metody-kontrolyu-yakosti-ta-bezpeky-pytnoyi-vody> (дата звернення: 24.02.2026)

¹ Бакалаврант 4 курсу Дриневський В. Р.

¹ Ст.викл. Любицький С. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=I8v3R-oAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КОМБІНОВАНОЮ СИСТЕМОЮ ТЕПЛОПОСТАЧАННЯ БУДИНКУ НА БАЗІ ІТП

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах сучасних викликів, пов'язаних із забезпеченням енергетичної безпеки та стійкості інфраструктури України внаслідок масштабних пошкоджень об'єктів об'єднаної енергетичної системи, питання докорінної модернізації систем теплопостачання набуває критичної важливості. Значний дефіцит маневрових генеруючих потужностей та нестабільність роботи великих ТЕЦ вимагають переходу до концепції розподіленої генерації та впровадження систем теплопостачання 4-го та 5-го поколінь (4GDH / 5GDH). У такій парадигмі класичний багатоквартирний будинок трансформується з пасивного споживача на активного учасника енергоринку (просьюмера). Індивідуальний тепловий пункт (ІТП) при цьому стає складним гібридним енергетичним вузлом, що об'єднує підключення до централізованої теплової мережі (ЦТ) та локальні відновлювані джерела енергії, зокрема теплові насоси (ТН). Керування такими бівалентними (комбінованими) системами за допомогою традиційних методів, заснованих на простих еквітермічних (погодних) кривих, є вкрай неефективним. Це призводить до перевитрат енергоносіїв, нераціонального використання ресурсу компресорного обладнання та неможливості гнучкого реагування на динамічні зміни тарифів на електроенергію. Відповідно, розробка та впровадження інтелектуальної автоматизованої системи керування (АСК) комбінованою системою теплопостачання будівлі є актуальною науково-технічною та інженерною задачею.

Незважаючи на широке розповсюдження комерційних мікропроцесорних контролерів для стандартних ІТП (наприклад, лінійок Danfoss ECL або Siemens Climatix), які успішно реалізують ПІ- та ПІД-закони регулювання, їх застосування для гібридних систем супроводжується низкою фундаментальних проблем. Традиційні АСК здійснюють управління джерелами тепла за ієрархічним принципом із жорстко заданими порогоми перемикання (залежно лише від поточної температури зовнішнього повітря). При цьому контролери повністю ігнорують фактор фінансового арбітражу між варіантами генерації тепла (вартість електроенергії для живлення ТН з урахуванням його поточного коефіцієнта перетворення COP та вартість теплової енергії з мережі ЦТ). Крім того, наявні на ринку рішення базового рівня не містять вбудованих математичних моделей для оцінки теплової акумулюючої здатності будівельних конструкцій будівлі. Це унеможлиблює використання технологій управління попитом (Demand Response) та реалізацію стратегій предиктивного нагріву (pre-heating) у години дії нічного, більш дешевого, тарифу на електроенергію.

Аналіз останніх досліджень. Питання математичного моделювання та автоматизації багатокритеріальних комбінованих систем ґрунтовно висвітлені в працях вітчизняних дослідників (К. Баранчук, А. Назаренко, О. Дешко) та зарубіжних науковців. У міжнародному науковому просторі значна увага приділяється алгоритмам керування на базі прогнозуючих моделей – Model Predictive Control (MPC). Дослідження показують, що використання багатоцільових контролерів (МО-MPC) здатне забезпечити до 20-30% економії фінансових витрат в гібридних теплових системах. Деякі автори пропонують застосування нечіткої логіки (Fuzzy Logic) та штучних нейронних мереж для адаптації систем до звичок споживачів. Проте, як зазначається в оглядових роботах, практична інтеграція класичних алгоритмів MPC у серійні програмовані логічні контролери (ПЛК)

рівня ІТП залишається суттєво обмеженою. Основною перешкодою є висока обчислювальна складність оптимізаційних задач та відсутність адаптивних (самонавчальних) моделей низького порядку, які б адекватно описували нестационарні теплофізичні процеси в реаліях українських систем централізованого теплопостачання з їхніми частими відхиленнями температурних графіків.

Формулювання мети. Метою даного дослідження є розробка структури, математичного та програмного забезпечення автоматизованої системи керування комбінованою системою теплопостачання будинку (з використанням мережі ЦТ та повітряного теплового насоса), яка реалізує спрощений адаптивний предиктивний алгоритм на базі ПЛК для мінімізації сумарних експлуатаційних витрат з урахуванням диференційованих тарифів за умови жорсткого дотримання критеріїв теплового комфорту в приміщеннях.

Основна частина. Об'єктом автоматизації виступає комбінований індивідуальний тепловий пункт, підключений за незалежною схемою. Апаратна конфігурація включає: пластинчастий теплообмінник для відбору тепла з мережі ЦТ, тепловий насос (ТН) типу «повітря-вода», буферний тепловий акумулятор великої ємності, циркуляційні насоси з частотним регулюванням та систему регулюючих клапанів з електроприводами. Для розв'язання поставленої задачі авторами застосовано метод багатокритеріального предиктивного керування (МО-MPC). Керуючий контролер на кожному дискретному кроці часу (з інтервалом 15 хвилин) розраховує оптимальну траєкторію керування потужностями джерел тепла на горизонт прогнозування 24 години. Математична постановка задачі зводиться до мінімізації цільової функції витрат J :

$$\min J = \sum_{k=1}^N [C_{el}(k)P_{el}(k) + C_{th}(k)Q_{DH}(k)]\Delta t + \lambda \sum_{k=1}^N \max(0, T_{set} - T_{in}(k))^2, (1)$$

де N – загальна кількість кроків прогнозування на горизонті; $C_{el}(k)$ та $C_{th}(k)$ – прогнозовані динамічні тарифи на електричну та теплову енергію відповідно на кроці k ; $P_{el}(k)$ – електрична потужність, що споживається компресором ТН; $Q_{DH}(k)$ – теплова потужність, яка відбирається з централізованої мережі; Δt – тривалість часового кроку; λ – ваговий коефіцієнт (штрафна функція) за порушення температурного режиму; T_{set} – уставка комфортної внутрішньої температури; $T_{in}(k)$ – прогнозована внутрішня температура повітря в приміщеннях. Ключовою модифікацією запропонованого алгоритму, що дозволяє реалізувати його на базі стандартного промислового ПЛК, є використання спрощеної резистивно-ємнісної (RC) еквівалентної теплової моделі будівлі другого порядку (2R2C). Модель 2R2C базується на аналогії з електричним колом: опори R моделюють тепловий опір, а ємності C – накопичення тепла, модель враховує дві основні ємності: окремо внутрішнє повітря (мала інерція) і окремо масивні конструкції стін (велика інерція). Це дозволяє точно прогнозувати, як швидко будівля охолоне за ніч. Динаміка будівлі описується двома рівняннями першого порядку, що пов'язані між собою.

Рівняння для внутрішньої температури (T_{in}):

$$C_b \frac{dT_{in}}{dt} = \frac{T_{\omega} - T_{in}}{R_{in}} + Q_{HP}(t) + Q_{DH}(t) + Q_{int}(t) (2)$$

Рівняння для температури масиву стін (T_{ω}):

$$C_{\omega} \frac{dT_{\omega}}{dt} = \frac{T_{in} - T_{\omega}}{R_{in}} + \frac{T_{out} - T_{\omega}}{R_{out}} + Q_{sol}(t), (3)$$

де C_b – ефективна еквівалентна теплоємність будівельних конструкцій (Дж/К); Q_{HP} та Q_{DH} – теплові потоки від теплового насоса та тепломережі, $Q_{int}(t)$ – сумарні внутрішні теплонадходження, C_{ω} – теплоємність зовнішніх стін (основний акумулятор тепла), R_{in} – опір теплообміну між повітрям і стіною, R_{out} – опір теплопередачі стіни назовні (якість утеплення), T_{out} – температура зовнішнього повітря, $Q_{sol}(t)$ – сонячна радіація, що поглинається стінами.

Значення погодних параметрів (T_{out} та інсоляція) на горизонт прогнозування АСК отримує автоматично через відкриті API метеорологічних сервісів. Коефіцієнт трансформації теплового насоса (Coefficient of Performance – COP) у моделі не є константою, а динамічно обчислюється як поліноміальна функція від прогнозованої зовнішньої температури та необхідної температури подачі теплоносія, що суттєво підвищує точність оптимізації.

Для того, щоб контролер міг швидко обчислювати оптимальні рішення, реальні характеристики ТН (які зазвичай надаються виробником у вигляді таблиць) описують поліномом другого порядку (поверхнею відгуку). Загальний вигляд такої функції:

$$COP(T_{out}, T_{sup}) = a_0 + a_1 T_{out} + a_2 T_{sup} + a_3 T_{out}^2 + a_4 T_{sup}^2 + a_5 (T_{out} \cdot T_{sup}) \quad (4)$$

де T_{out} – прогнозована температура зовнішнього повітря (отримана через API), T_{sup} – температура подачі теплоносія, яку система планує підтримувати (змінна керування), $a_0 \dots a_5$ – емпіричні коефіцієнти, які отримуються шляхом методу найменших квадратів на основі паспортних даних конкретної моделі ТН.

Висновки. В ході дослідження розроблено концептуальну архітектуру та алгоритмічне забезпечення АСК гібридним тепловим пунктом. Теоретичне обґрунтування та перевірка логіки управління базуються на аналітичному моделюванні теплофізичних процесів та сценарному аналізі роботи обладнання при різних погодних умовах та показує, що система здатна в автономному режимі забезпечувати накопичення тепла в конструкціях будівлі та буферній ємності вночі (під час дії пільгового тарифу на електроенергію та високої ефективності ТН). У пікові ранкові та вечірні години алгоритм передбачає зменшення потужності ТН та мінімізацію відбору тепла з ЦТ, перекриваючи дефіцит накопиченою енергією. Централізована тепломережа логічно розглядається як пікове резервне джерело для періодів сильних морозів, коли використання ТН стає економічно недоцільним через падіння COP. Впровадження запропонованої математичної моделі створює надійні передумови для системного зниження експлуатаційних витрат на теплозабезпечення порівняно з класичним ПІД-регулюванням, а також оптимізує графіки навантаження на місцеві ТЕЦ шляхом згладжування піків споживання. Теоретичне обґрунтування інтеграції спрощеної моделі будівлі у предиктивний алгоритм дозволяє комплексно враховувати нелінійну ефективність ТН, інерційність конструкцій та динамічні тарифи без потреби у надлишкових обчислювальних потужностях. Запропоновану алгоритмічну основу можна використовувати для програмування серійних ПЛК під час модернізації багатоквартирних будинків (ОСББ).

Перелік посилань:

1. Multi-Criteria Model Predictive Controller for Hybrid Heating Systems in Buildings / V. Hosseini та ін. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 21. P. 5839.
2. Баранчук К. О., Любарець О. П. Еволюція теплових пунктів: від парових систем до теплових просьюмерів. Вентиляція, освітлення та теплогазопостачання. 2025. 53. с. 6–19.
3. Digital Transformation of District Heating: A Scoping Review of Technological Innovation and Control Systems / A. Researcher та ін. *Energies*. 2025. Vol. 18, no. 22. P. 5994.
4. Назаренко А. О. Система керування теплоспоживанням будівель з комбінованим теплопостачанням і використанням сонячної енергії : автореф. дис.... канд. техн. наук : 05.14.01 / НТУУ «КПІ». Київ, 2016. 22 с.

¹ Бакалаврант 4 курсу Красан Д. М

¹ Доц., к.т.н. Степанець О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=Kq9ce50AAAAAJ&hl=ua>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АСПЕКТИ ВИКОРИСТАННЯ НАВЧАЛЬНО-ДОСЛІДНОГО СТЕНДУ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗАЦІЇ ТВАРИННИЦЬКОГО ПІДПРИЄМСТВА

Постановка проблеми та її актуальність. В сучасному світі велику роль відіграє підготовка майбутніх спеціалістів, зокрема, з використанням реальних об'єктів та систем. Під час практичних занять студенти розуміють важливі тонкощі професії. Використання стендів, приладів, що мають симулювати справжні об'єкти, створені спеціалістами галузі автоматизації і мають складні програмні та технічні рішення, які наочно пояснюють здобувачам освіти концепцію роботи в сфері автоматизації, є корисним досвідом.

Аналіз останніх досліджень. У теперішній час існує велика кількість компаній що займаються створенням лабораторних стендів з автоматизації, зокрема [1]. Кожен прилад вирізняється унікальністю, характеризує та описує певну систему, або системи, є прикладом системи керування. У випадку з використанням навчально-дослідного стенду системи автоматизації тваринницького підприємства велика увага приділяється мікроклімату всередині пташника [2]. Метою системи є підтримка життєздатності птиці в комфортних умовах, запобіганню стресу поголів'я. Особливістю цих систем є комплексність вентиляції приміщення [3].

Формулювання мети. Метою роботи є аналіз навчально-дослідницького стенду системи автоматизації тваринницького підприємства «Учбовий стенд БУМП» створеного компанією ПрАТ «МХП». Виокремлення його сильних сторін, пошук яким чином стенд допоможе студентам зрозуміти тонкощі роботи систем автоматичного регулювання в пташнику.

Основна частина. Блок управління мікрокліматом птахокомплексу (надалі БУМП) є моделлю комплексної системи керування пташника. Він об'єднує декілька систем автоматичного регулювання створюючи окрему екосистему підприємства, в якій кожен агрегат взаємодіє один з одним. Під час дослідження фізичної частини об'єкту люди стикаються з задачами реалізації реальних систем регулювання, використання конкретних приладів для конкретних задач. Зокрема, для підтримки заданих параметрів та візуалізації меню використовується ІРРС-С8000ТУ. Це промПК з сенсорною панеллю, на якій реалізований НМІ інтерфейс. Дана реалізація є зручним рішенням в умовах динамічної системи з величезною кількістю параметрів [4]. Цей комп'ютер підключений до модуля входів та виходів за допомогою RS-485, маючи змогу надсилати йому команди за допомогою протоколу ModBus-RTU. Модуль входів та виходів виконує команди ІРРС-С8000ТУ, контролюючи усі системи автоматичного регулювання (надалі САР) пташника. Також система містить САР керування освітленням, що також критично важливо для підтримки комфорту птиці. Птахи мають чіткий цикл дня і ночі, тому важливо слідувати йому. На стенді керування освітленням реалізоване за допомогою ШІМ сигналів, що контролюються безпосередньо контролером, так і за допомогою блоку ручного керування. Блок ручного керування надає можливості вручну керувати стендом. Це необхідно для регулювання системи під час аварійних або критичних ситуацій. Блок ручного керування має вищий пріоритет, тому оператор завжди може впливати на пташник не зважаючи на сигнали контролера.

Програмна частина стенду надає студенту можливість зрозуміти принципи пропорційного регулювання, використання кривих росту та різних уставок в залежності від

виміряних параметрів. Важливо підтримувати птицю в оптимальних умовах мікроклімату. Якщо температура в пташнику відхилиться від заданої, то птиця відчує стрес, зросте смертність в поголів'ї [2]. Щоб запобігти втратам птиці БУМП реалізує декілька САР мікрокліматом. Перш за все САР температури курника за допомогою підвісних теплових гармат. Гармати розподілені по пташнику таким чином, щоб реалізувати нагрівання приміщення по окремих зонах. Система використовує теплові гармати, якщо температура в одній з зон курника стала меншою за підтримувану. САР вентиляцією впливає на кількість задіяних груп вентиляторів, відкриття та закриття тунельних та приливних клапанів. Вентилятори розділені на декілька груп, що вмикаються за вимогою контролера. Алгоритм пропорційного регулювання реалізований відносно підвищення температури, оскільки вентиляція використовується тільки для охолодження середовища, в якому живе птиця, та подачі свіжого повітря всередину пташника. Вентилятори вмикаються пропорційно до перевищення температури в курнику задля швидшого охолодження приміщення. Це реалізовано в декількох режимах, а саме: в режимі за потужністю, циклічному і постійному. Також, САР вентиляції використовує алгоритм компенсації мінімальної вентиляції в залежності від рівня CO₂, аміаку або кількості поголів'я, запобігаючи погіршенню нормативної якості повітря. Система динамічних уставок реалізована за допомогою кривих росту. На БУМП є змога виставити криву росту уставки температури, вентиляції в залежності від відповідного дня туру. Таким чином ми підтримуємо оптимальні умови мікроклімату в залежності від кількості птиці та погодних умов.

Обробка та недопущення аварійних ситуацій є важливою для будь-якої системи регулювання. В програмі є можливість встановити критичні межі для основних параметрів, що вимірюються. Під час виходу за задані значення вмикається сигнал тривоги. Щоб запобігти передчасним спрацюванням тривоги також вводиться часова затримка. Вона допомагає відфільтрувати короткочасні випадкові виміряні значення від реальної аварійної ситуації. При виході з ладу критичних давачів відбувається перехід в режим безпечного стану. В цьому стані система повертається на заздалегідь задані значення і підтримує їх, поки аварійна ситуація не буде вирішена. Також для роботи припливних клапанів БУМП використовує алгоритм захисту від обмерзання взимку. Цей алгоритм відкриває клапани на заданий відсоток, тим самим забезпечуючи відсутність обмерзання механізму клапану. Стенд має алгоритм пріоритетності аварійних режимів, коли при перебільшенні значення критичного параметру ігнорується значення менш критичного. Наприклад, якщо виміряна кількість аміаку в повітрі перевищує норму, то система переходить в режим постійної вентиляції, ігноруючи температуру всередині курника.

Висновок. Розглянувши деякі аспекти навчально-дослідного стенду системи автоматизації тваринницького підприємства можна зробити висновок, що такі стенди є надзвичайно корисними в використанні в навчальних цілях. БУМП містить промПК з сенсорною панеллю, що забезпечує керування і візуалізацію в одному місці. Стенд на своєму прикладі реалізує демонстраційну систему керування декількома САР, використовуючи комплексні алгоритми та динамічні уставки. Окремо, цей стенд пояснює особливості автоматизації процесів під час роботи з тваринними підприємствами, вважливість алгоритму пріоритетності аварійних режимів.

Перелік посилань:

1. ASTI Automation. Catalogue. URL: <https://astiautomation.com/catalogue/>.
2. Preliminary Evaluation of an Advanced Ventilation-Control Algorithm to Optimise Microclimate in a Commercial Broiler House. Animals. 2024. Vol. 14, № 23. Article 3430. URL: <https://www.mdpi.com/2076-2615/14/23/3430>.
3. Operational performance of ventilation mechanisms for layer houses: Modeling with experimental validation. Computers and Electronics in Agriculture. 2025. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S016816992500924X>.
4. Human-Machine Interface – an overview. ScienceDirect. Engineering Topic. URL: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/human-machine-interface>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Малевицька А. О.

¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.

<https://scholar.google.com/citations?user=l0I2Mk0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗАЦІЯ КОТЛІВ-УТИЛІЗАТОРІВ

Постановка проблеми та її актуальність

Сучасна промисловість характеризується високою інтенсивністю виробничих процесів, що супроводжуються значними викидами теплової енергії та побічними продуктами у вигляді відхідних газів. Утилізація цієї енергії стає одним із ключових напрямів підвищення екологічної та енергетичної ефективності підприємств. Одним із найбільш раціональних рішень є використання котлів-утилізаторів – установок, здатних перетворювати тепло відхідних газів на корисну енергію в формі гарячої води або пари. Завдяки цьому підприємства зменшують споживання традиційного палива, скорочують енерговитрати та знижують шкідливий вплив на довкілля.

Аналіз останніх досліджень

Котли-утилізатори застосовуються в хімічній, нафтовій, металургійній, енергетичній, машинобудівній та інших галузях, де процеси супроводжуються великими втратами тепла. Вони дозволяють реалізувати принцип енергоресурсної замкненості, забезпечуючи повторне використання теплового потенціалу технологічних процесів. У зв'язку з цим зростає потреба у вдосконаленні цих систем, підвищенні їхньої надійності, адаптивності та безпеки. Саме автоматизація відіграє ключову роль у забезпеченні таких вимог, дозволяючи підтримувати стабільні режими роботи навіть за умов змінних навантажень та коливань характеристик відхідних газів [1].

Автоматизація котлів-утилізаторів забезпечує оптимальне функціонування як у випадках стабільних, так і в умовах різко змінних технологічних режимів. Оскільки температура, тиск і склад відхідних газів можуть значно варіювати залежно від роботи основного обладнання, система керування має швидко аналізувати ситуацію й реагувати на всі збурення. Від цього залежить не лише ефективність перетворення теплової енергії, а й довговічність обладнання та безпека виробничого процесу.

Основна частина

Центральним компонентом системи автоматизації є програмований логічний контролер, який здійснює збір даних від численних датчиків, виконує аналіз інформації та формує керуючі команди. PLC стежить за ключовими параметрами: температурою перегрітої пари, рівнем води в барабані, тиском у системі, станом газового тракту. Контролер забезпечує реалізацію алгоритмів регулювання, що дозволяє запобігати перегріву, недогріву чи небажаним коливанням робочих характеристик.

Ефективну роботу контролера доповнює система SCADA. Вона забезпечує оператору повний огляд технологічного процесу: надає графічне відображення параметрів у реальному часі, фіксує аварійні та попереджувальні сигнали, формує архівні дані для подальшого аналізу. SCADA дозволяє контролювати стан об'єкта дистанційно та надає можливість оперативного втручання у разі потреби. Разом PLC і SCADA формують мультирівневу структуру керування, що поєднує автоматичний режим роботи з можливістю людини впливати на процес, забезпечуючи гнучкість та високу якість управління [2].

Автоматизація також сприяє економії енергії. Чітке дотримання оптимальних температурних режимів та контроль рівня води у барабані дозволяють знизити втрати тепла та запобігти зайвому витрачання ресурсу. Своєчасне виявлення відхилень у стані котла не

лише забезпечує безпеку, а й допомагає уникати аварійних ремонтів, зменшуючи простій та витрати на обслуговування. Завдяки комплексному підходу до автоматизації котел-утилізатор працює стабільніше, ефективніше та із значно нижчими експлуатаційними витратами.

Повноцінна автоматизація котла-утилізатора охоплює кілька груп параметрів, що забезпечують якісне регулювання й контроль процесу. Серед основних – температура пари на виході. Вона є визначальною для оцінки ефективності пароутворення, тому її стабілізація має велике значення. Шляхом керування подачею води для впорскування або використання інших методів охолодження система забезпечує потрібний рівень температури та запобігає її небажаним коливанням.

Іншим критично важливим параметром є рівень води у барабані. Занадто низький рівень загрожує перегрівом і пошкодженням теплообмінних поверхонь, тоді як надмірно високий – потраплянням води у зону пароперегрівника та порушенням роботи всієї парової системи. Завдяки автоматичному регулюванню рівня за рахунок зміни витрати живильної води забезпечується стабільність роботи котла.

Окрім цього, система автоматизації контролює низку допоміжних параметрів, таких як тиск пари та води, температура й розрідження димових газів, витрати води та пари. Дані показники допомагають своєчасно виявляти засмічення газового тракту, зниження ефективності теплообміну, утворення відкладень на поверхнях нагріву та інші небажані явища. На основі інформації, отриманої від вимірювальних приладів, контролер може своєчасно формувати команди для зміни режимів роботи або запуску захисних механізмів.

До об'єктів автоматизації входять датчики температури, тиску, рівня, витрати, електроприводи та регулюючі клапани. Датчики передають контролеру достовірні сигнали про стан процесу, а виконавчі механізми реалізують зміну подачі води, пари чи інших середовищ. Завдяки злагодженій роботі вимірювальної та виконавчої частин досягається точне підтримання всіх режимних параметрів без необхідності постійного втручання оператора.

Висновок

Автоматизація котлів-утилізаторів є невід'ємною складовою сучасних технологічних процесів, спрямованих на економію енергії, підвищення надійності та екологічності виробництва. Вона забезпечує стабільну роботу обладнання, створює умови для гнучкого та ефективного керування, зменшує ризики аварій і значно скорочує експлуатаційні витрати [3]. Завдяки використанню програмованих контролерів, систем SCADA та сучасних засобів діагностики котли-утилізатори функціонують на високому технічному рівні, забезпечуючи раціональне використання ресурсів і зменшення негативного впливу промислових процесів на довкілля.

Перелік посилань:

1. Боженко М. Ф., Камишний Б. М. Методика визначення енергетичної ефективності утилізації теплоти димових газів котелень. Науковий журнал технічного спрямування КП, 2024. URL: http://tech.vernadskyjournals.in.ua/journals/2024/1_2024/part_2/8.pdf.
2. Guide to Waste Heat Recovery Systems for Industrial Boilers. W.C. Rouse & Son, 2025. URL: https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electrical_engineering/Control_of_Boiler_Operation_using_PLC%20-%20SCADA.pdf.
3. Котли-утилізатори й енерготехнологічні котли. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. URL: <http://energetika.in.ua/ua/books/book-3/part-1/section-2/2-6-kotli-utilizatori-j-energotekhnologichni-kotli>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Мельник О. Г.

¹ Асист. Захарченко А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=RpOI6DoAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕТОДІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО КЕРУВАННЯ СИСТЕМАМИ ГАРЯЧОГО ВОДОПОСТАЧАННЯ ТА ПРОЦЕСАМИ НАКОПИЧЕННЯ ТЕПЛОВОЇ ЕНЕРГІЇ У ЖИТЛОВОМУ СЕКТОРІ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах сучасної енергетичної кризи та нестабільної ситуації внаслідок війни, зростає потреба в оптимізації використання ресурсів, зокрема в енергетичних системах, таких як водопостачання. Проблеми з електро та теплопостачанням, часті відключення та обмеження доступу до енергоресурсів ставлять під загрозу стабільну роботу традиційних систем гарячого водопостачання (ГВП) [1]. Зокрема, великі витрати енергії на нагрів води, що вимагають постійної підтримки високих температур, стають неефективними в умовах обмеженого енергопостачання. Система автоматизованого управління водопостачанням житлового будинку, що забезпечує раціональне використання енергії та підтримку оптимальних температурних режимів, може стати ефективним рішенням цієї проблеми.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у галузі ГВП зосереджені на вдосконаленні систем через автоматизацію та інтеграцію сучасних технологій, що забезпечують енергоефективність та надійність таких систем. Зокрема, багато досліджень зосереджені на застосуванні IoT для моніторингу, відслідковування та аналізу більшої кількості параметрів, що може покращити регулювання та прогнозування технологічних параметрів водопостачання в реальному часі, що дозволяє знижувати енергоспоживання без втрати комфорту для користувачів, а також забезпечувати надійність і стійкість систем до енергетичних можливих відключень [2]. Автоматизовані системи дозволяють досягти значної економії енергії шляхом коригування температури води залежно від фактичних потреб споживачів [3]. Наявні дослідження підтверджують ефективність використання накопичувальних резервуарів для гарячої води, які дозволяють акумулювати тепло під час низького споживання та використовувати його в періоди пікового попиту, тим самим знижуючи навантаження на енергетичні мережі. Крім того, впровадження адаптивних алгоритмів машинного навчання для прогнозування потреб у воді і управління її температурою дозволяє значно підвищити ефективність таких систем, знижуючи витрати енергії на 20-30% [4].

Формулювання мети. Метою роботи є розробка автоматизованої системи керування гарячим водопостачанням для житлового будинку, яка забезпечує мінімізацію енерговитрат та комфорт у використанні, раціональний розподіл акумульованої теплової енергії під час обмеженого електропостачання та підтримку оптимальних температурних режимів за рахунок сучасних алгоритмів управління та реалізовує алгоритми, спрямовані на підвищення енергоефективності.

Основна частина. Архітектура автоматизованої системи керування ГВП базується на комплексному використанні датчиків температури, витратомірів потоку води та контурів зворотного зв'язку, що забезпечують безперервне автоматичне регулювання режимів нагріву та подачі теплоносія [2]. Система керування на основі даних датчиків може перемикатися між різними режимами роботи обладнання, включно з керування процесів нагрівання та накопичення теплової енергії для мінімізації енергоспоживання або вартості спожитих ресурсів при збереженні комфортної температури води для мешканців.

Для розробки систем ГВП перспективним напрямком є використання алгоритмів оптимізації та прогнозування споживання. Реалізація найбільш ефективних алгоритмів нагрівання води для різних сценаріїв роботи – режимів акумуляції теплової енергії, споживання теплової енергії, режими електричного догріву, нагріву від альтернативних джерел тепла чи від теплового вводу від системи теплопостачання, режими економії енергії тощо – дає змогу не тільки забезпечувати стабільну роботу системи, а й знижувати витрати енергії відповідно до розкладу, прогнозу споживання, вартості енергоресурсів чи інших факторів, що можуть вплинути на комфорт користувачів, економічні чи екологічні показники роботи.

Оскільки одним із ключових технологічних рішень є використання резервуарів для накопичення гарячої води, комбінованих резервуарів з теплообмінниками, або комбінацій резервуарів і теплообмінників з відповідною трубою обв'язкою. Це дозволяє акумулювати енергію під час періодів низького споживання та використовувати її під час пікових навантажень. З використанням резервуарів спостерігається значне зменшення енергетичних витрат і підвищення ефективності системи, оскільки вони дозволяють зберігати воду при оптимальних температурах, навіть у випадках відключень електрики [1].

У разі відсутності електропостачання система повинна переходити в аварійний режим роботи. Для цього передбачається використання резервного джерела живлення (акумулятора або ДБЖ), яке забезпечує функціонування контролера та ключових елементів. При тривалому знеструмленні система зберігає поточні параметри в пам'яті та коректно завершує роботу. Після відновлення живлення відбувається автоматичний перезапуск із відновленням заданих режимів роботи та перевіркою стану обладнання.

Для безшовної інтеграції програмно-апаратних засобів доцільним є використання сучасних платформ для візуального програмування та віддаленого керування, зокрема середовища Node-RED, яке успішно об'єднує всі розрізнені компоненти обладнання в єдину автоматизовану мережу. Своєю чергою, для забезпечення глибокої аналітики та покращення загальної логіки роботи системи активно застосовується мова програмування Python, зокрема з використанням бібліотек SciPy та Scikit-learn, Pandas, NumPy тощо, з допомогою яких розробляються математичні моделі та проводиться первинний аналіз даних.

Висновки. Впровадження автоматизованої системи керування гарячим водопостачанням для житлових будинків дасть можливість значно знизити витрати на енергію, що може досягати 20-30% відповідно до досвіду впровадження рішень даного типу. Розробка алгоритмів на основі використання резервуарів для накопичення гарячої води знижує навантаження на електро- і теплоенергосистему та забезпечує резерв в разі аварійних відключень, що дозволяє підтримувати автономне забезпечення гарячою водою протягом 4-6 годин. Інтеграція сучасних технологій, таких як IoT, Python та Node-RED, дозволяє створити ефективну, надійну та зручну систему для користувачів.

Перелік посилань:

1. Zhang C. Sustainable and energy-efficient domestic hot water systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2020. Vol. 128. P. 109900. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032120301921>
2. Ismail S., Dawoud D. W., Ismail N., Marsh R., Alshami A. S. IoT-Based Water Management Systems: Survey and Future Research Direction. *IEEE Access*. 2022. Vol. 10. P. 35942–35952. URL: <https://www.semanticscholar.org/paper/IoT-Based-Water-Management-Systems%3A-Survey-and-Ismail-Dawoud/390ffedee06dd2d4adae1bd7dfec08d1dd5dde71>
3. Czerski G., Strugała A. The Energy Efficiency of Hot Water Production by Gas Water Heaters with a Combustion Chamber Sealed with Respect to the Room. *Water*. 2014. Vol. 6, No. 8. P. 2394–2411. URL: <https://www.mdpi.com/2073-4441/6/8/2394>
4. Kazmi H., Mehmood F., Lodeweyckx S., Driesen J. Deep Reinforcement Learning based Optimal Control of Hot Water Systems. *arXiv preprint arXiv:1801.01467*. 2018. URL: <https://arxiv.org/abs/1801.01467>

¹ Бакалаврант 4 курсу Мержиєвський А. О.

¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.

<https://scholar.google.com/citations?user=U9Xoun4AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОВИМ РЕЖИМОМ ТА ВОДОПІДГОТОВКОЮ БАСЕЙНУ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні плавальні басейни є складними об'єктами, що потребують безперервного контролю взаємопов'язаних параметрів: температури теплоносія, об'єму води у чаші, концентрації хімічних реагентів та рівня кислотності. Зміна одного показника безпосередньо впливає на інші. Наприклад, доливання холодної водопровідної води для компенсації втрат на випаровування призводить до різкого падіння температури та зміни водневого показника, оскільки він залежить від регіону і зазвичай становить 6,5–8,5 рН, а норматив для плавання є 6,8–7,6 [1]. Відсутність алгоритмічної синхронізації між контурами рівня води, підігріву та дозування реагентів призводить до значних динамічних похибок, що викликає перевитрату теплової енергії на 15–20 % та погіршення санітарних умов під час перехідних процесів. Тому розробка комплексної автоматизованої системи керування (АСК), яка синхронізує теплоенергетичні та фізико-хімічні процеси, є актуальним завданням для підвищення енергоефективності об'єкта.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика автоматизації теплоенергетичних процесів спортивно-оздоровчих комплексів є предметом багатьох сучасних наукових розвідок та передових промислових розробок. Зокрема, провідні світові виробники обладнання активно впроваджують концепцію «розумного басейну» на базі технологій IoT, що дозволяє дистанційно керувати процесами та оптимізувати витрати енергії і реагентів [2]. Разом з тим, значний масив досліджень присвячений розробці архітектури мікропроцесорних систем водопідготовки та теплопостачання на базі програмованих логічних контролерів, що забезпечують високу надійність циркуляції та апаратної фільтрації [3, 4]. Проте в більшості існуючих рішень контури підігріву, рівня води та водопідготовки все ще реалізуються як локальні та функціонально незалежні. При такому децентралізованому підході об'єкт не розглядається як єдина багатовимірна система, тому локальні контролери реагують на перехресні збурення із запізненням. Це обґрунтовує доцільність розробки єдиного комплексного алгоритму керування на базі ПЛК, здатного синхронізувати ці процеси.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка структури та алгоритмів комплексної автоматизованої системи керування тепловим режимом і водопідготовкою басейну для усунення впливу перехресних збурень, забезпечення нормативних фізико-хімічних показників та підвищення загальної енергоефективності об'єкта.

Основна частина. Запропонована автоматизована система реалізує комплексне керування технологічним циклом підготовки води на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), який алгоритмічно синхронізує роботу теплового вузла та станції дозування реагентів.

Головним завданням теплового контуру є підтримка заданої уставки температури у визначеному діапазоні (24–28 °С) і допустимим відхиленням $\pm 0,5$ °С. Для усунення коливань під час збурень (наприклад, при доливанні свіжої води з водопровідної мережі) застосовано алгоритм безперервного ПІД-регулювання. Контролер обчислює поточну похибку між заданим та фактичним значенням температури і формує керуючий сигнал на електропривід змішувального клапана.

Паралельно з підігрівом система забезпечує санітарно-екологічний моніторинг. Оскільки бактерицидна ефективність вільного хлору експоненціально залежить від водневого показника (рН) та температури, ці процеси апаратно інтегровані. Алгоритм ПЛК побудовано таким чином, що дозування хімії коригується синхронно зі змінами температури, жорстко утримуючи рН у нормативних межах 6,8–7,6.

Для оцінки ефективності розробленого алгоритму було проведено порівняння якості регулювання традиційного об'єкта та розробленої системи при типовому збуренні (доливанні холодної води). Результати див. табл. 1.

Таблиця 1 – Показники якості перехідних процесів контуру підігріву

Параметр	До автоматизації	Після автоматизації
Споживання теплової енергії (Гкал/рік)	320	256
Витрати хімічних реагентів (кг/рік)	1100	935
Температурні коливання (°C)	$\pm 1.8^{\circ}\text{C}$	$\pm 0.5^{\circ}\text{C}$
Витрати на експлуатацію (%)	100	80

Висновки. Розробка та впровадження комплексної автоматизованої системи на базі ПД-закону регулювання є ефективним вирішенням проблеми перехресних збурень у плавальних басейнах. Алгоритмічна синхронізація контурів підживлення, підігріву та вузла водопідготовки дозволяє утримувати температурну уставку ($24\text{--}28^{\circ}\text{C}$) з відхиленням не більше $\pm 0.5^{\circ}\text{C}$ та дотримуватися санітарних норм рівня кислотності (рН 6,8–7,6). Оцінка показників підтверджує, що розроблена система повністю усуває статичну похибку та значно скорочує час стабілізації температури, що у свою чергу нівелює перевитрату теплової енергії на 20 % та оптимізує витрати реагентів.

Перелік посилань:

1. ДСТУ EN 16713-3:2020. Приватні басейни. Системи водопостачання. Частина 3. Обробка води. Вимоги та методи випробування (EN 16713-3:2016, IDT). – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020.

2. A connected swimming pool - easy maintenance thanks to pool automation! [Електронний ресурс] / Pentair Pool Europe. URL: <https://www.pentairpooleurope.com/blog/virtuous-pool/connected-pool-automation> (дата звернення: 25.02.2026).

3. Pozhitkov A. PLC-Based Swimming Pool System: The PoolOS Project [Електронний ресурс] / Circuit Cellar. – 2022. URL: <https://circuitcellar.com/research-design-hub/projects/plc-based-swimming-pool-system/> (дата звернення: 25.02.2026).

4. Diniş C. M., Popa G. N., Iagăr A. Automation of water supply and recirculation-filtration of water at a swimming pool using Zelio PLC. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018. Vol. 294, no. 1. P. 012052. URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1757-899X/294/1/012052> (дата звернення: 25.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Муха Н. С.¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.<https://scholar.google.com/citations?user=U9Xoun4AAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ КАМЕРНОЮ СУШАРКОЮ ДЕРЕВИНИ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах сучасного деревообробного виробництва якість кінцевої продукції безпосередньо залежить від дотримання технологічних режимів сушіння деревини. Камерне сушіння є одним із найбільш енергомістких процесів, тому розробка та впровадження автоматизованих систем керування (АСК) є актуальним завданням для зниження собівартості та запобігання дефектам (тріщинам, коробленню). Автоматизація дозволяє мінімізувати вплив «людського фактору» та забезпечити стабільність параметрів мікроклімату в камері протягом усього циклу [1].

Аналіз останніх досліджень. Для ефективного керування процесом розглянемо структуру АСК на основі моніторингу вологості повітря та стану самої деревини. У промисловій автоматизації використання камерних сушарок вимагає застосування спеціалізованих контролерів, що дозволяють реалізовувати складні логічні алгоритми. Поєднуючи потужність сучасних датчиків з гнучкістю програмного забезпечення, можна створювати адаптивні системи, які автоматично коригують режим сушіння залежно від породи деревини та її початкового стану [2].

Формулювання мети. Метою роботи є проектування структури АСК камерної сушарки деревини, яка забезпечує підтримку заданої температури та відносної вологості повітря шляхом керування калориферами, вентиляторами та системою зволоження/вентиляції.

Основна частина. Технологічний процес сушіння деревини описується зміною вологості матеріалу в часі. Швидкість сушіння описується експоненційною залежністю:

$$\frac{dW}{d\tau} = -K(W - W_r), \quad (1)$$

де W – поточна вологість деревини, %;

τ – час сушіння, год;

K – коефіцієнт швидкості сушіння;

W_r – рівноважна вологість деревини, що залежить від параметрів середовища.

Для визначення необхідних енергетичних витрат на реалізацію процесу сушіння необхідно розглянути тепловий баланс сушильної камери. Для підтримання мікроклімату в камері використовується рівняння теплового балансу

$$Q_{in} = Q_{evap} + Q_{loss} + Q_{heat}, \quad (2)$$

де Q_{in} – теплота, що надходить від калориферів;

Q_{evap} – витрати теплоти на випаровування вологи;

Q_{loss} – теплові втрати через огорожувальні конструкції;

Q_{heat} – теплота на нагрівання деревини та обладнання.

Регулювання температури здійснюється за ПІД-законом регулювання, що забезпечує високу точність підтримання заданих параметрів. Принцип циркуляції повітря та розташування основних елементів сушильної камери наведено на рис. 1.

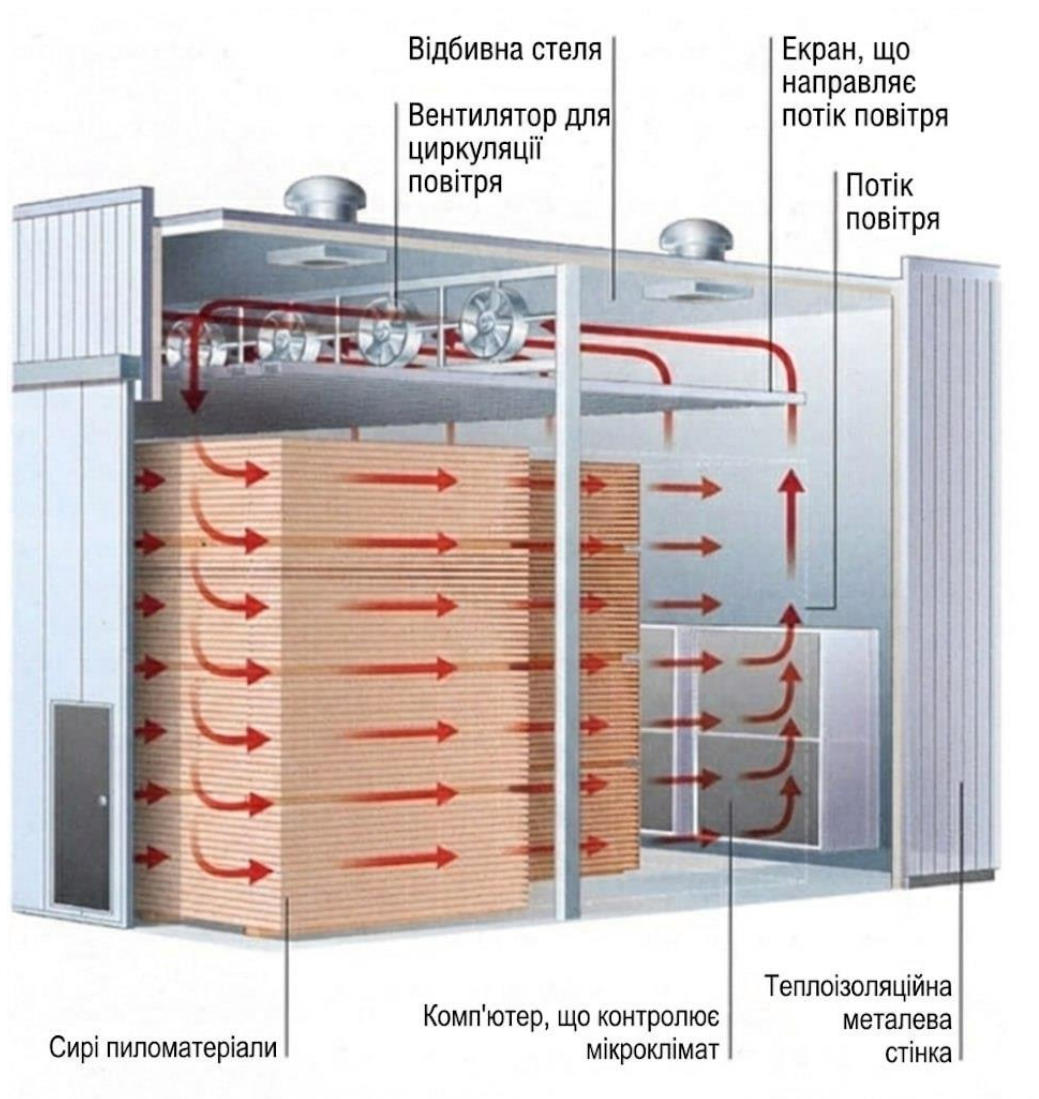


Рисунок 1 – Схема циркуляції повітря у камерній сушарці

Однією з переваг автоматизації є можливість реалізації ступеневих режимів сушіння. На кожному етапі (прогрів, основне сушіння, кондиціювання) система автоматично змінює уставки параметрів. Використовуючи дані з вологомірів, встановлених безпосередньо у штабелі, АСК переходить до наступної фази без втручання оператора [3].

Таблиця 1 – Технічні характеристики АСК за різних режимів роботи

Режим роботи	Температура в камері, °C	Ступінь навантаження вентиляторів, %	Витрата теплоносія, м³/год	Похибка підтримки параметрів, %
Початковий підігрів	40	100	1.5	0.5
Основне сушіння	65	70	0.8	1.0
Кондиціювання	50	50	0.4	0.8
Охолодження	25	100	0	2.0

Виходячи з даних табл. 1 можна зробити такі висновки:

- найбільше енергоспоживання вентиляційної системи припадає на етап початкового підігріву та фінального охолодження;
- автоматизація дозволяє підтримувати похибку температури в межах $\pm 1^\circ\text{C}$, що є критичним для сушіння твердих порід деревини;
- витрата теплоносія регулюється відповідно до стадії процесу, що забезпечує економію енергоресурсів порівняно з ручним керуванням.

Ще однією перевагою сучасних АСК є можливість дистанційного моніторингу через SCADA-системи. Оскільки параметри сушіння зберігаються у базі даних, можна аналізувати історію кожної партії, що важливо для контролю якості на великих підприємствах. Це дозволяє оперативно коригувати карти сушіння та досліджувати нові режими для різних порід деревини [4].

Виходячи з енергетичних розрахунків, потужність, необхідна для випаровування вологи з партії дубових пиломатеріалів об'ємом 20 м^3 при зменшенні вологості з 40 % до 8 %, визначається за формулою

$$P = \frac{\Delta W \rho V r}{\tau} = 3,2 \text{ кВт}, \quad (3)$$

де ΔW – зміна вологості;

ρ – щільність деревини;

V – об'єм матеріалу;

r – питома теплота пароутворення;

τ – тривалість сушіння.

Основними вимогами до розроблюваної системи є надійність датчиків у середовищі з підвищеною вологістю, зрозумілий інтерфейс користувача, захист від аварійних режимів (перегріву), а також можливість автономної роботи при втраті зв'язку із сервером.

Висновки. Впровадження автоматизованої системи керування камерною сушаркою деревини є необхідною умовою отримання високоякісної сировини. Використання сучасних контролерів і алгоритмів ПІД-регулювання забезпечує високу точність підтримання технологічних параметрів та дозволяє значно знизити питомі витрати теплової та електричної енергії.

Перелік посилань:

1. Пінчевська О. О., Спірочкін А. К. Технологія сушіння і захисту деревини. Частина 1. Навчальний посібник. Київ: вид-во, 2021.
2. Simpson W. T. (Ed.) Dry Kiln Operator's Manual. – Madison : USDA Forest Service, 1991. – 274 р.
3. Bond B. H., Espinoza O. A decade of improved lumber drying technology // Current Forestry Reports. – 2016. – Vol. 2. – P. 106–118. DOI: 10.1007/s40725-016-0034-z
4. Machuga O. C., et al. Using SolidWorks Simulation Tool for modelling wood drying chamber design [Електронний ресурс] / National Forestry University Journal. – 2024. – дослідження про автоматизоване моделювання камерного сушіння. – URL: <https://nv.nltu.edu.ua/index.php/journal/article/download/2587/2594> (дата звернення: 26.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Сергієнко М. В.

¹ Доц., к.т.н. Батюк С. Г.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=cWaZ5o4AAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНА СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ ТЕХНОЛОГІЧНИМИ ПРОЦЕСАМИ РЕГЕНЕРАТИВНОЇ СКЛОВАРНОЇ ПЕЧІ

Постановка проблеми. Скловарна піч – це спеціальний тип плавильної печі, яка використовується у виробництві скла. Скловарні печі призначені для плавлення шихти (сировинних матеріалів) і створення високих температур, необхідних для формування та обробки скла. Використовуються на скловарних заводах та підприємствах для виробництва різноманітних скляних виробів, від пляшок та посуду до віконних склопакетів та скловолокна. Робота скловарної печі характеризується режимами технологічним (хімічний склад шихти; спосіб виробництва скловиробів; продуктивність печі) і тепловим (теплові параметри внутрішнього середовища топки, які впливають на якість виплавленого скла, отже, на якість виробленої скляної продукції). Скловарна піч є класичним технологічним об'єктом автоматизації теплоенергетичних процесів і класичним полігоном операційних технологій (цифрових технологій автоматизації). Актуальним є використання новітніх цифрових технологій для покращення ефективності експлуатації скловарних печей і скловарного виробництва взагалі.

Інтелектуальні системи управління технологічними процесами (ІСУТП) – це автоматизовані системи управління технологічними процесами (АСУТП) з просунутою (advanced) функціональністю за рахунок використання цифрових двійників (ЦД) і систем штучного інтелекту (СШІ) [1]. Цифровізовані технологічні об'єкти управління (ЦТОУ) – ТОУ з інсталюваною ІСУ технологічними процесами (ІСУТП) – визначаються як кібер-фізичні системи (КФС) – це сучасний, тобто цифровізований класичний автоматизований технологічний комплекс (АТК = ТОУ + АСУ).

Аналіз проблеми. ЦД – це цифрова копія (імітаційна модель) ТОУ, яка керується вимірними параметрами і використовується для обчислення параметрів, які не вимірюються. ЦД не визначається способом свого застосування; засадничим для визначення моделі ТОУ як ЦД ТОУ є використання в моделі вимірних параметрів для обчислення невимірних параметрів. Обчислені параметри можуть бути як технологічні, так і техніко-економічні. Ефективні застосування ЦД в теплоенергетичних системах автоматичного регулювання (САР): 1) технічна діагностика ТОУ; 2) компенсація вимірних сигнальних збурень розрахованими компенсаторами в прямому зв'язку комбінованих САР; 3) розрахунок невимірюваного параметру з проміжної точки або невимірюваного вихідного параметру каскадної САР.

ШІ – це галузь кібернетики, яка вивчає (аналізує і синтезує) системи, здатні до навчання. СШІ – це система машинного навчання (СМН). Алгоритми ШІ імітують процес навчання. СШІ – це пристрій або програма, які можуть навчатись. Вирізняють дедуктивне машинне навчання (ДМН) та індуктивне машинне навчання (ІМН). ДМН – формалізація знань експертів у вигляді баз знань (БЗ). ІМН – пошук емпіричних залежностей в експериментальних даних. Алгоритми ДМН реалізуються експертними системами управління (ЕСУ). Алгоритми ІМН реалізуються пошуковими системами управління (ПСУ). ПСУ, за визначенням і фактично, є адаптивними системами управління – системами адаптації параметрів (САП) САР режимних параметрів ТОУ. Ефективні застосування СШІ в теплоенергетичних САР: 1) ЕСУ і ЦД ТОУ в складі системи технічної діагностики (СТД) ТОУ (режим порадника); 2) системи екстремального управління (СЕУ), які реалізують

алгоритми градієнтного пошуку екстремальних значень техніко-економічних параметрів;
3) системи автотюнінгу (САТ) регуляторів, які реалізують алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів регуляторів пробними діями на ТОУ в розімкненій САР.

Постановка завдання. Скловарні печі, як усі печі, є теплообінними агрегатами. Відповідно, до складу АТК скловарної печі входять класичні САР температури, співвідношення повітря/паливо, розрідження, тиску, рівня тощо. Особливість скловарних печей – це регенеративні печі. Відповідно, до складу АТК скловарної печі завжди входить унікальна система програмно-логічного управління (СПЛУ) – СПЛУ перекиданням факелу (СПЛУ ПФ). Актуальною задачею є використання ЦД в задачах верхнього (супервізорного) рівня автоматизації скловарної печі – розрахунок температури і рівня скломаси в басейні печі. Актуальною задачею є використання ЦД в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації скловарної печі – розрахунок моменту перекидання факелу в регенеративній скловарній печі і формування команди на перекидання факелу в регенеративній топці.

Дослідження і аналіз. Класична задача автоматизації – регулювання температури скломаси і рівня скломаси в басейні скловарної печі. Температуру скломаси в басейні виміряти фізично неможливо, а рівень – проблематично. ЦД – модель тепломасообміну в скловарній печі. ЦД розраховує температуру скломаси в басейні і рівень скломаси в басейні. Реалізується каскадна САР температури скломаси в басейні зі стабілізуючим регулятором температури печі (димових газів). Реалізується каскадна САР рівня скломаси зі стабілізуючим регулятором витрати шихти (регулятором рівня шихти в бункері шихти).

ЦД в задачах нижнього (контролерного) рівня автоматизації скловарної печі – формування команди на перекидання факелу в регенеративній топці.

Класична задача автоматизації – реалізація перекидання факелу в регенеративній скловарній печі. Реалізується СПЛУ перекиданням факелу. Нестандартною є задача формування команди на перекидання факелу (після чого послідовність перекидання факелу реалізується відповідною СПЛУ).

Формування команди на перекидання факелу виконується за такими ознаками:

- 1) за максимальним інтервалом часу між перекиданнями:

$$\tau \geq \tau^*,$$

де τ^* – заданий – максимальний інтервал часу між перекиданнями;

- 2) за максимальною температурою верхніх частин регенераторів, які гріються (через які під час поточного інтервалу між перекиданнями проходять димові гази):

$$t_{ep} \geq t_{ep}^*,$$

де t_{ep}^* – задана максимальна температура;

t_{ep} – середня поточна температура верхніх частин регенераторів;

- 3) за максимальним теплом, яке передається димовими газами до верхніх частин регенераторів, які гріються:

$$\int_0^{\tau} [t_{ep}(\tau) - t_o] d\tau \geq q^*,$$

де q^* – задане максимальне значення інтегралу;

t_{ep} – середня поточна температура регенераторів після закінчення перекидання (див. п. 2);

t_o – середня початкова температура регенераторів після закінчення перекидання;

- 4) за мінімальною температурою нижніх частин регенераторів, які охолоджуються (через які під час поточного інтервалу між перекиданнями проходить повітря):

$$t_{np} < t_{np}^*,$$

де t_{np}^* – задана мінімальна температура;

t_{np} – середня поточна температура нижніх частин регенераторів;

- 5) за максимальним теплом, яке відбирається повітрям від нижніх частин регенераторів, які охолоджуються:

$$\int_0^{\tau} [t_o - t_{np}(\tau)] d\tau \geq q^*,$$

де q^* – задане максимальне значення інтегралу;

t_{np} – середня поточна температура регенераторів після закінчення перекидання (див. п. 4);

t_o – середня початкова температура регенераторів після закінчення перекидання.

Вимірювання температури насадок рекуператорів є складною технічною задачею. Одноточкові вимірювання температур насадок не є репрезентативними. Рішення проблеми – розрахувати температурні епюри регенераторів або кількість підведеного до холодного регенератора чи відведеного від гарячого регенератора тепла.

ЦД – модель теплообміну системи регенераторів скловарної печі. На основі вимірювань температур печі і одноточкових вимірювань температури насадок регенераторів розраховуються температурні епюри регенераторів, кідькість підведеного чи відведеного тепла і формується команда на перекидання факелу.

Перекидання факелу, наприклад, зліва направо (вихідна позиція – факел зліва; кінцева позиція – факел зправа) реалізується в послідовності: 1) зупин подачі палива зліва; 2) вентилявання печі повітрям зліва; 3) зупин подачі повітря зліва; 4) перенаправлення засувками потоків енергоносіїв зліва направо; 5) подача повітря зправа і вентилявання печі; 6) подача палива зправа. Аналогічно реалізується перекидання факелу зправа наліво (вихідна позиція – факел зправа; кінцева позиція – факел зліва).

Наведена циклограма є типовою і багаторазово реалізована як для скловарних печей, так і для інших регенеративних печей. Графік перекидання факелу реалізується типовою СПЛУ перекиданням факелу. Таким чином, ЦД системи регенераторів печі (модель реального часу теплообміну в системі регенераторів печі) фактично є складовою частиною типової СПЛУ, навіть не САР.

Результати і висновки:

1. Ефективні застосування ЦД в ІСУТП регенеративної скловарної печі: 1) технічна діагностика ТОУ; 2) компенсація вимірюного збурення теплотворної здатності витрати палива розрахованими компенсаторами в прямому зв'язку комбінованих САР температури топки печі (димових газів в топці печі) з виходом компенсатору на вихід регулятора; 3) розрахунок невимірюваних вихідних параметрів каскадних САР температури і рівня скломаси в басейні речі.

2. Ефективні застосування СШІ в ІСУТП регенеративної скловарної печі: 1) ЕСУ і ЦД ТОУ в складі СТД ТОУ (режим порадирика); 2) СЕУ коефіцієнтом надлишку повітря в топці печі (градієнтний пошук оптимального значення коефіцієнту надлишку повітря); 3) системи автотюнінгу (САТ) регуляторів САР теплового режиму, які реалізують алгоритми автоматичного пошуку оптимальних параметрів регуляторів пробними діями на ТОУ в розімкненій САР.

Перелік посилань:

1. Батюк С. Г., Воронюк М. В. Застосування цифрових двійників і систем штучного інтелекту в автоматизації теплоенергетичних процесів. *Вчені записки Таврійського національного університету імені В.І. Вернадського. Серія: Технічні науки.* Том 36 (75), № 3, 2025, Частина 2. С. 77–91. DOI: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.3.2/11>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Стельмах М. О.

¹ Доц., к.т.н. Бунке О. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=l0I2Mk0AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ТЕПЛОПУНКТОМ ЛІКАРНІ

Постановка проблеми та її актуальність

В умовах триваючих атак на енергетичну інфраструктуру України забезпечення безперебійного функціонування медичних закладів є критичним завданням. Досвід НДСЛ «Охматдит», лікарень Маріуполя, Чернігова та Харкова продемонстрував, що пошкодження магістральних теплових мереж або систем електропостачання в зимовий період ставить під загрозу життя пацієнтів та призводить до розмерзання внутрішньобудинкових систем. Традиційні індивідуальні теплові пункти (ІТП) потребують присутності персоналу для переходу на резервні схеми роботи. Тому розробка та впровадження автоматизованих систем керування (АСК) ІТП, здатних самостійно адаптуватися до нестандартних та аварійних режимів роботи тепломережі, є надзвичайно актуальним завданням для етапу відбудови [1, 2].

Аналіз останніх досліджень

Сучасні підходи до модернізації систем теплопостачання медичних закладів, що реалізуються за підтримки таких фондів як GIZ та NEFCO (на прикладі лікарень Рівного та Чернівців), переважно орієнтовані на впровадження погодного регулювання для досягнення енергоефективності. Стандартні рішення на базі спеціалізованих контролерів (наприклад, серії Danfoss ECL) чудово справляються з підтримкою температурного графіка [3]. Проте вони мають обмежений функціонал щодо автоматичного перемикавання між основним джерелом тепла та резервними (модульними твердопаливними котельнями, тепловими насосами) у разі раптового зникнення теплоносія в магістралі [4].

Формулювання мети

Метою роботи є розробка алгоритмічного та апаратного забезпечення автоматизованої системи керування тепловим пунктом багатoproфільної лікарні, що забезпечує стабільний температурний режим, мінімізацію споживання енергії за нормальних умов та автоматичне гарантоване перемикавання на автономні джерела живлення і тепла у разі аварії на централізованій мережі.

Основна частина

Об'єктом дослідження обрано систему теплопостачання типової обласної багатoproфільної лікарні загальною площею 3 650 м², що складається з двох основних контурів: системи опалення (СО) та системи гарячого водопостачання (ГВП). Загальна концепція гарантованого теплозабезпечення об'єкта з автоматичним перемиканням між основним та резервним джерелами тепла наведена на рис. 1.

Основою енергоефективного керування ІТП є підтримка заданої температури T_{set} у внутрішньому контурі опалення залежно від температури зовнішнього повітря T_{ext} (погодна компенсація). Математична модель теплового балансу в спрощеному вигляді представлена рівнянням (1):

$$Q = kF(T_{in} - T_{ext}), \quad (1)$$

де Q – тепловий потік, необхідний для підтримки нормативної температури;
 k – зведений коефіцієнт теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі лікарні;
 F – площа поверхні теплообміну;

T_{in} – нормована температура всередині приміщення (для палат вона становить 20–22 °С, для операційних – 24°С);
 T_{ext} – температура на вулиці.



Рисунок 1 – Концептуальна схема керування тепловими потоками лікарні

Для усунення розбіжності між заданою та фактичною температурою теплоносія в АСК використовується пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання.

Апаратна частина розробленої АСК базується на використанні вільно програмованого логічного контролера (ПЛК). До аналогових входів контролера підключено термоперетворювачі опору Pt1000 для контролю температур T_{ext} , T_1 , T_2 та датчики тиску з уніфікованим сигналом 4-20 мА для захисту мережевих насосів від «сухого ходу».

Ключовою особливістю розробленого алгоритму є модуль «Антизамерзання та автономність». У разі падіння тиску або критичного зниження температури T_1 з централізованої мережі (що фіксується впродовж 10 хвилин), ПЛК формує такі керуючі впливи:

1. Повне закриття моторних клапанів на вводі від міської тепломережі.
2. Переведення циркуляційних насосів внутрішніх контурів на живлення від джерел безперебійного живлення (ДБЖ) та дизель-генератора.
3. Подача релейного сигналу на запуск резервної модульної котельні.
4. Зниження температурної уставки в адміністративних та допоміжних приміщеннях (другорядне навантаження) задля максимального збереження теплової енергії для палат та операційних блоків.

Як свідчать розрахунки (табл. 1), впровадження розробленої системи суттєво змінює експлуатаційні показники ІТП.

Виходячи з даних табл. 1 можна зробити наступні висновки:

- застосування частотних перетворювачів (ПЧ) для насосів дозволяє знизити енергоспоживання на 30 %;
- власне обладнання камери споживає 25 Вт;
- розроблений алгоритм скорочує час реакції на аварію до часток хвилини, що унеможливує розмерзання труб у підвальних приміщеннях;

- погодна компенсація спільно з добовим таймером (зниження температури в технічних зонах вночі) дає змогу економити до 25 % теплової енергії [5].

Уся інформація з ПЛК передається по протоколу Modbus TCP/IP на автоматизоване робоче місце диспетчера. Це виключає необхідність перебування технічного персоналу в небезпечних приміщеннях ІТП під час повітряних тривог.

Таблиця 1 – Експлуатаційні показники ІТП лікарні за різних умов роботи

Режим роботи ІТП	Відхилення від графіка, %	Час реакції на аварію в мережі, хв	Потужність, що споживається системою автоматизації, Вт	Споживання енергії насосами, кВт·год/добу	Економія тепла, %
Ручне керування (елеваторний вузол)	± 15	15–40 (залежить від персоналу)	-	120 (нерегульований привід)	0
Стандартна АСК (без модуля автономності)	± 2	Відключення системи	20	85 (з ПЧ)	15–20
Розроблена АСК	± 2	< 1 (перехід на резерв)	25	80–85 (з ПЧ, оптимізований режим)	20–25

Висновки

Підсумовуючи, автоматизація індивідуальних теплових пунктів медичних закладів сьогодні виходить за межі суто економічної доцільності, перетворюючись на базовий інструмент забезпечення енергетичної безпеки та живучості. Розроблена АСК на базі сучасного ПЛК з використанням ПД-регулювання та модуля автономного перемикавання гарантує підтримку необхідного мікроклімату для пацієнтів та забезпечення їх гарячою водою навіть у випадках пошкодження міської інфраструктури.

Перелік посилань:

1. Енергетична безпека медичних закладів в умовах війни : звіт. Міністерство охорони здоров'я України. 2024. URL: <https://moz.gov.ua> (дата звернення: 16.02.2026).
2. Health Care in the Dark: The Impacts of Russian Attacks on Energy in Ukraine [Електронний ресурс] / Physicians for Human Rights, Truth Hounds. – 2024.
3. Інженерні рішення для централізованого теплопостачання [Електронний ресурс] / Офіційний сайт ТОВ «Данфосс ТОВ» в Україні. – Режим доступу: <https://www.danfoss.com/uk-ua/markets/district-energy/> (дата звернення: 24.02.2026).
4. Тарадай О. М. Теплозабезпечення : монографія. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2025. 322 с.
5. ДБН В.2.5-39:2008. Інженерне обладнання будинків і споруд. Зовнішні мережі та споруди. Теплові мережі (зі Зміною № 1). – Київ : Мінрегіонбуд України, 2009. – 86 с.

¹ Бакалаврант 4 курсу Стельмах М. О.

¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.

<https://scholar.google.com/citations?user=U9Xoun4AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА КЕРУВАННЯ МІКРОКЛІМАТОМ ХІРУРГІЧНОГО ВІДДІЛЕННЯ ЛІКАРНІ

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення нормативних параметрів мікроклімату в закладах охорони здоров'я є не лише питанням комфорту, а й важливим фактором інфекційної безпеки. Недотримання нормативної температури, вологості та перепаду тиску в операційних приміщеннях підвищує ризик поширення внутрішньолікарняних інфекцій [1]. В умовах енергетичної нестабільності в Україні підтримка стерильності в операційних блоках і палатах інтенсивної терапії супроводжується додатковими інженерними викликами. Хоча медичні заклади оснащуються автономними джерелами живлення (дизель-генераторами), їх використання не повністю усуває ризики порушення режимів роботи припливно-витяжних установок (ПВУ). Зокрема, короткочасна зупинка ПВУ під час спрацювання автоматичного вводу резерву (АВР) може призводити до порушення нормативного каскаду тисків і потенційного перетікання нестерильного повітря з суміжних приміщень. Крім того, медичні ПВУ є одними з найбільших споживачів електроенергії будівлі, тому їх робота на повній потужності в умовах обмеженої генераторної потужності є енергетично неефективною. У зв'язку з цим розробка автоматизованих систем керування (АСК) мікрокліматом, здатних адаптивно реагувати на аварійні режими та оптимізувати енергоспоживання, є актуальним науково-прикладним завданням.

Аналіз останніх досліджень. Базові вимоги до проектування та експлуатації систем вентиляції та кондиціонування повітря (HVAC) у медичних закладах жорстко регламентуються чинними державними та міжнародними стандартами [2-4]. Водночас у сучасних наукових дослідженнях [5-6] активно розглядається застосування частотного регулювання вентиляторів і датчиків якості повітря для підвищення енергоефективності систем. Проте, як показує практика експлуатації, типові рішення мають обмежені можливості щодо формування «чистих приміщень зі змінними режимами» і, як правило, не реалізують алгоритмів автоматичного скидання некритичного навантаження (load shedding) під час роботи від резервних джерел живлення. Це зумовлює необхідність розроблення більш адаптивних підходів до керування мікрокліматом медичних приміщень.

Формулювання мети. Метою роботи є підвищення надійності підтримання нормативних параметрів чистоти повітря та каскадного перепаду тиску в хірургічному відділенні шляхом розроблення апаратного і програмного забезпечення АСК мікрокліматом з функцією адаптивної оптимізації енергоспоживання вентиляційного обладнання в умовах дефіциту електроенергії.

Основна частина. Об'єктом дослідження обрано систему вентиляції та кондиціонування операційного блоку площею 150 м², яка обслуговується центральною медичною ПВУ з рекуператором з проміжним теплоносієм та фільтрами абсолютної очистки (НЕРА).

Для забезпечення гнучкого регулювання каскаду тисків у сучасних медичних закладах доцільно використовувати системи зі змінною витратою повітря (VAV – Variable Air Volume).

Основою підтримки асептичних умов є забезпечення позитивного дисбалансу витрат повітря (приплив переважає над витяжкою), що математично описується рівнянням масового балансу (1):

$$G_{sup} = G_{exh} + G_{leak}, \quad (1)$$

де G_{sup} – масова витрата припливного повітря, кг/год;

G_{exh} – масова витрата витяжного повітря, кг/год;

G_{leak} – витік повітря через нещільності огорожувальних конструкцій, кг/год.

Для точної підтримки перепаду тиску ΔP між операційною та суміжним коридором на рівні +15 Па використовується ПД-регулятор, який формує керуючий сигнал для частотних перетворювачів (ПЧ) вентиляторів.

Апаратна реалізація АСК виконана на базі програмованого логічного контролера (ПЛК), до якого підключено датчики температури, вологості, CO_2 та прецизійні перетворювачі диференціального тиску (0–50 Па). Структурна схема апаратного забезпечення системи наведена на рис. 1.

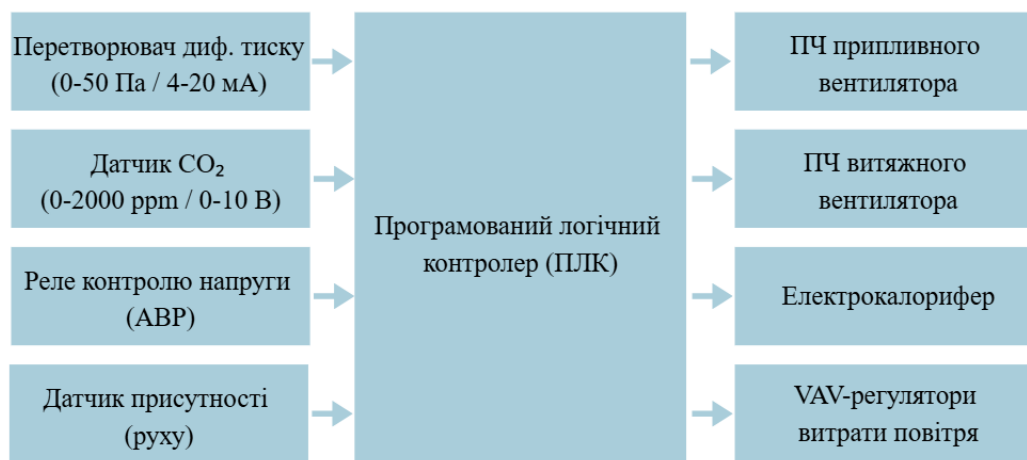


Рисунок 1 – Структурна схема апаратної реалізації АСК мікрокліматом

Запропоновано алгоритм «Адаптивна стерильність та автономність», який базується на аналізі стану електроживлення та фактичного використання приміщення. Перемикання режимів здійснюється за умовою:

$$S_{mode} = f(P_{grid}, CO_2, M_{occ}), \quad (2)$$

де P_{grid} – дискретний сигнал стану основної мережі живлення (наявність/робота від ДЕС);

CO_2 – поточна концентрація вуглекислого газу в приміщенні, ppm;

M_{occ} – сигнал присутності медичного персоналу від датчиків руху.

Відповідно до визначеного стану вектора вхідних змінних, ПЛК реалізує один із трьох сценаріїв:

1. Робочий режим – підтримання кратності повітрообміну не менше 15 об'ємів/год, температури +22 °C та надлишкового тиску +15 Па.

2. Режим чергування – зниження продуктивності вентиляторів приблизно на 50 % зі збереженням мінімально допустимого позитивного тиску (+5 Па).

3. Аварійний режим (робота від ДЕС) – після спрацювання АВР ПЛК забезпечує синхронізований плавний перезапуск вентиляторів із застосуванням ПД-регулятора з anti-windup та переходом на санітарний мінімум повітрообміну. З метою оптимізації ресурсу генератора (load shedding) алгоритм автоматично відключає секції енергоємного електричного догріву. При цьому захист від подачі переохолодженого повітря та

підтримання базового температурного режиму забезпечується основним водяним калорифером, циркуляційні насоси якого підключені до гарантованої мережі живлення.

За результатами розрахункового моделювання отримано порівняльні характеристики систем (табл. 1).

Таблиця 1 – Порівняння ефективності систем керування мікрокліматом операційної під час аварійних режимів

Тип системи керування ПВУ	Поведінка каскаду тисків при АВР	Електричне навантаження на резервну мережу (ДЕС), кВт	Час відновлення асептичних умов, хв	Економія ресурсу генератора, %
Базова автоматика	Втрата підпору	15,0	> 5	0
Стандартна АСК	Короткочасна інверсія	10,5	2 – 3	~ 30
Розроблена АСК	Синхронізований пуск	4,5	< 1	до 70 залежно від конфігурації ПВУ

Аналіз даних табл. 1 показує, що запропонований алгоритм дозволяє суттєво зменшити пікове навантаження на дизель-генератор та скоротити час відновлення нормативних умов у приміщенні. Зниження електроспоживання ПВУ в аварійному режимі досягається за рахунок координованого керування вентиляторами та автоматичного відключення некритичних споживачів.

Висновки. Розроблено автоматизовану систему керування мікрокліматом хірургічного відділення, що забезпечує адаптивне підтримання каскаду тисків і параметрів повітряного середовища. Запропонований алгоритм підвищує стійкість роботи «чистих приміщень зі змінними режимами» під час переходу на резервне живлення та сприяє зниженню навантаження на дизель-генератор. Отримані результати моделювання підтверджують доцільність застосування ПЛК-орієнтованих адаптивних стратегій керування в медичних вентиляційних системах.

Перелік посилань:

1. Roadmap to improve and ensure good indoor ventilation in the context of COVID-19 [Електронний ресурс] / World Health Organization. – 2021. – Режим доступу: <https://www.who.int/publications/i/item/9789240021280>

2. ДБН В.2.2-10:2022. Будинки і споруди. Заклади охорони здоров'я. Основні положення. – Київ : Мінрегіон України, 2022. – 128 с.

3. ASHRAE Standard 170-2021: Ventilation of Health Care Facilities. – Atlanta : ASHRAE, 2021. – 48 р.

4. Проєкт ДБН В.2.5-67:20XX. Опалення, вентиляція та кондиціонування повітря (Перша редакція) [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <https://dreamdim.ua/wp-content/uploads/2025/07/dbn-v25-67-20xx-opalennia-ventiliaciia-ta-kondicionuvannia-povitria-persa-redakciia.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).

5. Almomani F. A. O., Al-Majali M., Al-Khawaldh S. Design and Implementation of a Cascade Control System for a Variable Air Volume in Operating Rooms Based on Pressure and Temperature Feedback. Sensors. 2024. Vol. 24, no. 18. P. 5656. DOI: <https://www.mdpi.com/1424-8220/25/18/5656>.

6. Oduyemi O., Okoroh M. I., Fajana O. S. Improving energy efficiency of HVAC systems in buildings: a review of best practices. International Journal of Building Pathology and Adaptation. 2021. Vol. 40, no. 2. P. 165-189. DOI: <https://doi.org/10.1108/IJBPA-02-2021-0019>

¹ Бакалаврант 4 курсу Тимченко А. Р.

¹ Доц., к.т.н. Бунь В. П.

<https://scholar.google.com/citations?user=U9Xoun4AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСУ ПІДТРИМАННЯ ТЕМПЕРАТУРНОГО РЕЖИМУ У ВИСТАВКОВОМУ ЗАЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ РЕЦИРКУЛЯЦІЇ ПОВІТРЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Виставкові зали належать до приміщень із великим об'ємом повітря та змінним тепловим навантаженням. Протягом проведення заходів кількість відвідувачів може суттєво змінюватися, що впливає на тепловий баланс приміщення та концентрацію вуглекислого газу. Додатковими джерелами тепловиділення є освітлювальні системи, мультимедійне обладнання та електротехнічні пристрої. За таких умов система вентиляції повинна одночасно забезпечувати нормативний повітрообмін і підтримувати стабільний температурний режим у робочій зоні.

Традиційні вентиляційні системи, що працюють без регульованої рециркуляції, характеризуються значними витратами теплової енергії, особливо в холодний період року. Нагрівання великого об'єму зовнішнього повітря потребує суттєвих енергетичних ресурсів. Тому актуальним є впровадження автоматизованих систем керування, які дозволяють гнучко змінювати співвідношення зовнішнього та рециркуляційного повітря, забезпечуючи комфортні параметри мікроклімату при мінімальних енергетичних витратах. Розробка такої системи є важливою складовою підвищення енергоефективності сучасних громадських будівель.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері автоматизації систем вентиляції та кондиціювання повітря спрямовані на підвищення енергоефективності та стабільності регулювання параметрів мікроклімату. Значна увага приділяється використанню рециркуляції повітря як засобу зменшення теплових витрат. Доведено, що часткове повторне використання теплого витяжного повітря дозволяє істотно знизити навантаження на нагрівальні елементи системи без погіршення санітарних показників за умови контролю концентрації CO₂.

У роботах, присвячених автоматичному регулюванню температури, переважно застосовуються ПІ- та ПІД-регулятори, які забезпечують відсутність статичної похибки та достатню швидкодію системи. Для об'єктів із великою тепловою інерцією, до яких належать виставкові зали, доцільним є використання одноконтурних систем із зворотним зв'язком за температурою повітря у приміщенні. Такі системи відзначаються простотою налаштування, стійкістю до збурень та високою надійністю. Також активно впроваджуються програмовані логічні контролери, що забезпечують інтеграцію вимірювальних пристроїв, виконавчих механізмів і засобів диспетчеризації в єдину систему керування.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка системи автоматичного регулювання температурного режиму у виставковому залі з використанням рециркуляції повітря, яка забезпечує стабільність температури у робочій зоні, дотримання санітарних вимог щодо якості повітря та зниження енергоспоживання. Система повинна функціонувати в умовах змінного теплового навантаження, адаптуватися до сезонних коливань зовнішньої температури та гарантувати надійність і безпечність роботи обладнання.

Основна частина. Об'єктом автоматизації є припливно-витяжна вентиляційна установка виставкового залу з камерою змішування, що дозволяє реалізувати режим рециркуляції повітря. Повітряний потік формується шляхом змішування зовнішнього та витяжного повітря у визначеній пропорції. Після змішування повітря проходить через фільтраційний блок для очищення від механічних домішок, далі надходить у водяний

калорифер, де здійснюється його нагрів до заданої температури, після чого подається в зал припливним вентилятором. Частина повітря з приміщення видаляється витяжною системою, а частина повертається до змішувальної камери.

Регулювання температурного режиму здійснюється за допомогою одноконтурної системи автоматичного керування із зворотним зв'язком за температурою повітря у витяжному каналі. Вибір такої точки вимірювання дозволяє отримати усереднене значення температури у приміщенні та зменшити вплив локальних відхилень. Сигнал від датчика температури надходить до програмованого логічного контролера, який порівнює виміряне значення із заданою уставкою та формує керуючий вплив.

Алгоритм регулювання реалізований за ПІ-законом. При відхиленні температури від заданого значення контролер спочатку змінює положення повітряних заслінок, регулюючи співвідношення зовнішнього та рециркуляційного повітря. Якщо зміни частки рециркуляції недостатньо для досягнення необхідного результату, контролер змінює ступінь відкриття триходового клапана на лінії подачі гарячої води до калорифера, забезпечуючи додатковий нагрів.

Для підтримання нормативної якості повітря система оснащена датчиком концентрації CO₂. У випадку перевищення допустимого рівня концентрації контролер автоматично збільшує частку зовнішнього повітря незалежно від теплових витрат. Такий підхід дозволяє поєднати енергоефективність із виконанням санітарних вимог. У перехідні періоди року можливе використання режиму вільного охолодження, коли підтримання температури досягається лише змішуванням потоків без залучення нагрівальних елементів.

З огляду на велику теплову інерцію виставкового залу в алгоритмі передбачено обмеження швидкості зміни керуючих сигналів, що запобігає частим перемиканням виконавчих механізмів та підвищує їх ресурс роботи. Додатково реалізовано функції захисту обладнання, зокрема запобігання розморожуванню калорифера у холодний період, контроль перепаду тиску на фільтрах та переведення системи у безпечний режим при надходженні сигналу пожежної тривоги. Передбачено можливість архівування параметрів роботи та інтеграції системи до загальної мережі диспетчеризації будівлі.

Застосування автоматизованої системи з рециркуляцією дозволяє знизити теплові витрати в холодний період за рахунок зменшення об'єму нагріваного зовнішнього повітря. Ефективність такого підходу особливо помітна при значних внутрішніх тепловиділеннях, коли часткове повернення теплого повітря є достатнім для підтримання заданої температури без інтенсивної роботи калорифера.

Висновки. У роботі обґрунтовано застосування одноконтурної системи автоматичного регулювання температури виставкового залу з використанням рециркуляції повітря. Запропонована структура забезпечує стабільність температурного режиму в умовах змінного теплового навантаження, зменшує енергоспоживання та відповідає санітарним вимогам щодо якості повітря. Реалізація ПІ-алгоритму керування та використання програмованого логічного контролера забезпечують надійність і достатню точність регулювання.

Перелік посилань:

1. Ладуха І. С., «Основи автоматики та автоматизації технологічних процесів», канд. техн. наук, доцент, КПІ ім. Ігоря Сікорського, Київ, 2015.
2. Степанов В. П., «Проектування систем автоматизації: Сучасні вимоги до побудови мікроклімату», Навчальний посібник, Том 2., С. 84–91, 2018.
3. Панфьоров В. І. Математичне моделювання та автоматизація систем вентиляції та кондиціювання повітря : навч. посіб. – Харків : ХНУРЕ, 2020. – 192 с.
4. Петрік С. В., «Системи вентиляції та кондиціювання повітря», Київ: НТУ, 2020.
5. Honeywell S. Research of Energy Efficient Control Systems for HVAC in Public Buildings, International Journal of Automation and Control, Том 15, № 3, С. 210–218, 2023.

СЕКЦІЯ № 8

Стійка енергетика

¹ Аспірант 1 курсу Аршанський Д. І.

¹ Доц., к.т.н. Степанець О. В.

<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=Kq9ce50AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ МІЖНАРОДНИХ ПРОМИСЛОВИХ СТАНДАРТІВ В РОЗРОБЦІ ЦИФРОВИХ ДВІЙНИКІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні теплоенергетичні системи, є складними кібер-фізичними об'єктами, що поєднують теплогідравлічні процеси, засоби автоматизованого керування та інформаційні системи моніторингу [1]. Зростання вимог до енергоефективності, надійності та гнучкості експлуатації теплових систем зумовлює необхідність переходу від традиційних підходів керування до інтелектуальних методів, здатних працювати в умовах невизначеності, нелінійності та змінних зовнішніх впливів [2, 3]. Одним із перспективних напрямів є впровадження цифрових двійників, які забезпечують безперервний зв'язок між фізичною системою та її цифровою моделлю.

Разом з тим, створення цифрових двійників стикається з низкою фундаментальних проблем, серед яких ключовими є відсутність уніфікованої структурної моделі обладнання, низький рівень функціональної сумісності та складність інтеграції моделей у різні програмно-апаратні платформи [4, 5]. Більшість існуючих рішень мають фрагментарний характер, орієнтовані на конкретні виробничі реалізації та не забезпечують масштабованості або повторного використання моделей [6]. У цьому контексті може бути доцільним застосування стандартів ISA-88 [7] і ISA-95 [8], який широко-відомий в професійному середовищі та який визначає формалізовану ієрархічну модель фізичної структури та процедурної логіки технологічних систем.

Аналіз останніх досліджень. У сфері цифрових двійників промислових і енергетичних систем останні дослідження акцентують увагу на проблемі відсутності узгодженості між моделями, яка б забезпечувала інтероперабельність між різними інженерними та ІТ-системами [5]. В рамках парадигми Industry 4.0 [9] підкреслюється, що ключовим фактором масштабованості та повторного використання моделей цифрових двійників є застосування формальних стандартів опису фізичних і функціональних структур об'єктів [5, 6].

Формулювання мети.

Метою даного дослідження є аналіз доцільності використання стандартів ISA-88/ISA-95 для створення та впровадження цифрових двійників теплоенергетичних об'єктів (в рамках даного дослідження – індивідуального теплового пункту) в сучасні ІоТ- та Industry 4.0-платформи.

Основна частина.

На основі аналізу літературних джерел та останніх досліджень, було прийнято рішення розробити модель цифрового двійника згідно стандартів ISA-88/ISA-95. В рамках даного дослідження в межах стандартів особливу увагу було приділено наступним рівням представлення: технологічна комірка (Process Cell) як ІТП в цілому, з усіма елементами та контурами; апарат (Unit), яка представляє окремі процеси від початку до кінця; агрегат (Equipment module), який відображає групи обладнання, які виконують конкретну задачу в межах процесу; модуль керування (Control Module), які представляють собою окремі фізичні або програмні модулі. В якості об'єкту моделювання було обрано індивідуальний тепловий пункт (ІТП), чиє загальне представлення в межах ISA-88/ISA-95 представлено нижче (рис. 1).

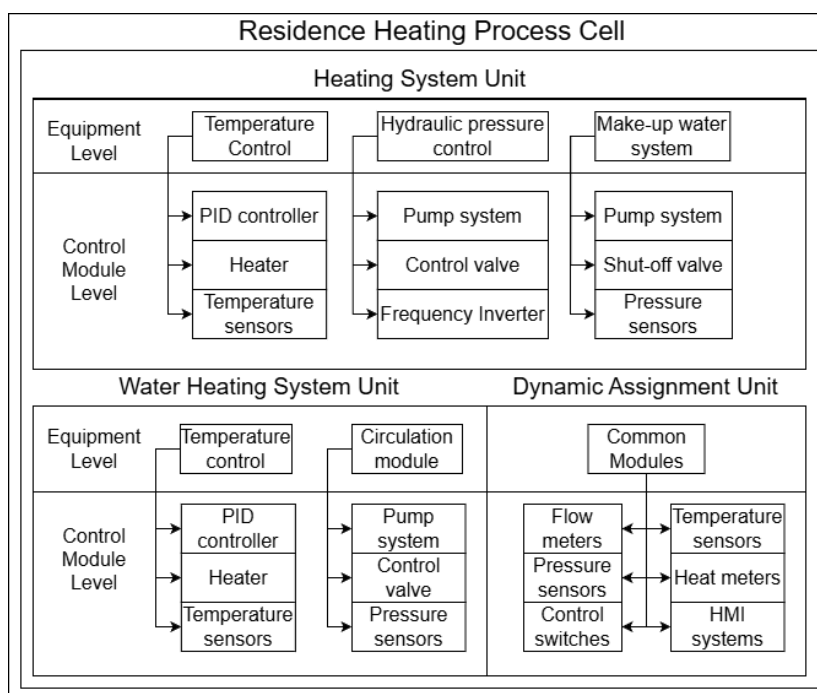


Рисунок 1 – Структурна схема ІТП відповідно до стандартів ISA-88/ISA-95

Згідно стандартів ISA-88/ISA-95, ІТП вважається об'єктом рівня технологічної комірки, оскільки він має в собі всі необхідні елементи для повного виконання всіх етапів процесу нагрівання води для системи опалення та гарячого водопостачання будинку. На рівні апаратів виділено два основні функціональні об'єкти: систему опалення (Heating System) та систему підігріву гарячої води (Water Heating System). Кожен із цих апаратів реалізує завершений підпроцес нагрівання теплоносія для відповідного контуру та може розглядатися як автономна функціональна одиниця в межах комірки процесу.

Першим апаратом є система опалення (Heating System), яка відповідає за нагрівання та підтримання температури теплоносія в контурі опалення будівлі. У складі цього апарату виділяється декілька агрегатів, а саме модуль керування температурою (Temperature control), модуль керування гідравлічним тиском (Hydraulic pressure control) та контур підживлення системи опалення (Make-up water system). Кожен з агрегатів має в собі всі необхідні для виконання підпроцесу модулі, які можуть включати як програмні одиниці (ПД-регулятор), так і фізичні одиниці (сенсори, клапани, насоси).

Другим апаратом є система гарячого водопостачання (Water Heating System), яка відповідає за підготовку гарячої води для побутових потреб і складається з агрегату керування температурою гарячої води (Temperature control) та агрегату циркуляції (Circulation system).

Окремо для обох апаратів використовуються спільні елементи, зосереджені в групі загальних модулів (Common modules). До них належать датчики зовнішньої температури, тиску та витрати, засоби збору даних, НМІ та комутаційні пристрої. Ці елементи реалізують функції вимірювання, діагностики та взаємодії з оператором, не будучи жорстко прив'язаними до одного конкретного підпроцесу, а маючи динамічне використання тими процесами, де вони необхідні в межах рецепту.

На основі декомпозиції запропоновано ієрархію цифрового двійника в open-source середовищі Eclipse Ditto [10].

Кожен з елементів ІТП в представленні Eclipse Ditto це окремий об'єкт (thing), зі своїми статичними властивостями та динамічними властивостями. Оскільки платформа не підтримує вкладеність об'єктів, необхідно в атрибутах вказувати, до яких об'єктів входить та які має в собі конкретний той чи інший елемент. До статичних властивостей відносять незмінні характеристики, серед яких можна виділити тип, назву, модель та інші. До

динамічних властивостей відносять часто змінювані параметри, як то значення давачів, стан системи, тощо.

Для комунікації з фізичним обладнанням та цифровими джерелами даних запропонований цифровий двійник використовує технологію MQTT та open-source брокер Mosquitto. Зберігання даних, об'єктів та їх властивостей реалізовано використовуючи базу даних MongoDB.

Висновки. Застосування міжнародних промислових стандартів ISA-88/ISA-95 може підвищити інтероперабельність цифрових двійників за рахунок формалізації структури теплоенергетичного об'єкта, використовуючи чітку ієрархію декомпозиції Process Cell – Unit – Equipment Module – Control Module. Такий підхід забезпечує однозначний опис фізичної та функціональної структури об'єкту, відокремлює структурний рівень від рівня реалізації керування та створює основу для модульності й подальшого розширення моделі.

На прикладі індивідуального теплового пункту продемонстровано, що декомпозиція на систему опалення та систему гарячого водопостачання з подальшим виділенням агрегатів і модулів керування відповідає як реальній технологічній логіці роботи об'єкта, так і принципам стандартів ISA-88/ISA-95. Це підтверджує можливість застосування даних стандартів для моделювання теплоенергетичних систем у контексті цифрових двійників.

Реалізація розробленої ієрархії в середовищі Eclipse Ditto показала, що модель ISA-88/ISA-95 може бути відображена без використання додаткових програмних модулів, а кожен елемент системи представлений у вигляді окремого thing з чітким розподілом статичних і динамічних властивостей. Це також підвищує інтероперабельність, спрощує інтеграцію з іншими цифровими сервісами та створює передумови для подальшого впровадження інтелектуальних алгоритмів аналізу й керування на базі цифрового двійника.

Перелік посилань:

1. Orumwense E. F., Abo-Al-Ez K. A systematic review to aligning research paths: Energy cyber-physical systems. *Cogent Engineering*. 2019. Т. 6, вип. 1. URL: <https://doi.org/10.1080/23311916.2019.1700738>.
2. Carli R., Cavone G., Ben Othman S. IoT Based Architecture for Model Predictive Control of HVAC Systems in Smart Buildings. *Sensors*. 2020. Т. 20, вип. 3. URL: <https://doi.org/10.3390/s20030781>.
3. Chowdhury I. J., Yusoff S. H., Gunawan T. S. Analysis of Model Predictive Control-Based Energy Management System Performance to Enhance Energy Transmission // *Energies*.– 2024.– Т. 17, вип. 11. URL: <https://doi.org/10.3390/en17112595>
4. Cavalieri S., Gambadoro S. Proposal of Mapping Digital Twins Definition Language to Open Platform Communications Unified Architecture // *Sensors*.– 2023.– Т. 23, вип. 4. URL: <https://doi.org/10.3390/s23042349>
5. Schmidt C., Volz F., Stojanovic L. Increasing Interoperability between Digital Twin Standards and Specifications: Transformation of DTDL to AAS // *Sensors*.– 2023.– Vol. 23, № 18.– Article 7742.– URL: <https://doi.org/10.3390/s23187742>
6. Conde J., Munoz-Arcentales A., Alonso A. Collaboration of Digital Twins Through Linked Open Data: Architecture With FIWARE as Enabling Technology. *IT Professional*. 2022. Т. 24, вип. 6. URL: <https://doi.org/10.1109/mitp.2022.3224826>.
7. ISA-88 Series of Standards– Batch Process Control / International Society of Automation (ISA).– ISA. URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/ISA-88/ISA-95-standards>
8. ISA-95 Series of Standards– Enterprise-Control System Integration / International Society of Automation (ISA).– ISA. URL: <https://www.isa.org/standards-and-publications/isa-standards/isa-95-standard>
9. Vaidya S., Ambad P., Bhosle S. Industry 4.0 – A Glimpse // *Procedia Manufacturing*.– 2018.– Т. 20, стр. 233–238. URL: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.034>
10. Eclipse Ditto™: Open Source Framework for Digital Twins in the IoT / Eclipse Foundation.– Eclipse Foundation, 2026.– URL: <https://eclipse.dev/ditto/>

¹ Магістрант 1 курсу Балицька Т. О.

¹ Доц., к.т.н. Степанець О. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АВТОМАТИЗАЦІЯ ЗАХИСНОЇ СПОРУДИ ЦИВІЛЬНОГО ЗАХИСТУ У КИЇВСЬКІЙ МІСЬКІЙ КЛІНІЧНІЙ ЛІКАРНІ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ТЕХНОЛОГІЙ ПОТ

Постановка проблеми та її актуальність. В умовах воєнного стану і постійних обстрілів ключовим питанням є побудова нових укриттів та бомбосховищ або реконструкція і модернізація існуючих. Укриття це, найчастіше, – підвали, паркінги, цокольні поверхи, підземні переходи або спеціально облаштовані приміщення. Укриття не обов'язково має герметичність, фільтровентиляції та автономну систему, тому воно захищає від уламків і частково від вибухової хвилі. Бомбосховище, або сховище цивільного захисту, це споруда, яка забезпечує повноцінний захист від вибухової хвилі, уламків, радіації та/або хімічного ураження. Бомбосховище обов'язково повинно мати герметичність, фільтровентиляцію, автономні системи життєзабезпечення, санітарні вузли та резервне живлення, тому що воно розраховано на тривале перебування людей [1]. Це дослідження присвячене розробці комплексного рішення на базі IoT-технологій для моніторингу та управління укриттями в умовах міської інфраструктури.

Аналіз останніх досліджень. У сучасних умовах воєнного стану та підвищених техногенних ризиків особливої актуальності набуває розвиток інтелектуальних систем захисту цивільного населення.

З огляду на сучасні загрози та вимоги нормативного регулювання, зокрема положення ДСНС України та Кодексу цивільного захисту України, автоматизовані системи стають логічним та необхідним стандартом для захисних споруд. Вони трансформують бомбосховище з пасивного укриття у керований, контрольований та прогнозований інженерний комплекс.

Вимоги до проектування бомбосховищ та інших захисних споруд цивільного захисту чітко регламентовані чинною нормативною базою України, що формує комплексний підхід до забезпечення безпеки перебування людей в умовах надзвичайних ситуацій. Ключовим документом у цій сфері є ДБН В.2.2-5:2023, який визначає обов'язкові параметри герметичності приміщень, вимоги до захисно-герметичних дверей і аварійних виходів, організацію систем вентиляції, водопостачання, електроживлення та інших інженерних систем життєзабезпечення.

Питання забезпечення належного мікроклімату, зокрема контролю температури та концентрації CO₂, а також необхідність автономного і резервного електроживлення для мобільних укриттів регламентуються положеннями ДСТУ 9329:2025, що підкреслює важливість безперервного функціонування інженерних систем навіть у разі відключення основного джерела електроенергії. Водночас вимоги щодо впровадження систем пожежної сигналізації, датчиків задимлення та оповіщення визначені у ДСТУ Б В.2.5-56:2014, оскільки у замкненому просторі укриття ризики, пов'язані з пожежею або задимленням, є особливо критичними. Нормативні аспекти організації водопостачання та водовідведення, а також заходи щодо запобігання аварійним ситуаціям у внутрішніх мережах встановлені у ДСТУ Б В.2.5-64:2012, що обґрунтовує необхідність застосування датчиків затоплення та систем автоматичного перекриття подачі води.

Багато дослідників розглядають ПОТ-концепцію як перспективну для застосування у цьому класі об'єктів [2].

Формулювання мети. Метою є обґрунтування концепції автоматизації захисної споруди цивільного захисту в структурі міської клінічної лікарні із застосуванням технологій Industrial Internet of Things (IIoT), спрямованої на підвищення рівня безпеки, безперервності функціонування медичного закладу в умовах надзвичайних ситуацій, а також забезпечення ефективного моніторингу, управління інженерними системами та оперативного реагування на загрози..

Основна частина. В сучасних умовах бомбосховище – це вже не просто «бетонне приміщення», а складний інженерний об'єкт із критичними системами життєзабезпечення. Автоматизована система контролю та моніторингу інженерних систем виконує ряд важливих завдань.

По-перше, вона сприяє підвищенню безпеки людей. Під час перебування людей в споруді цивільного захисту критичними стають такі параметри: якість повітря (CO₂, O₂, дим, токсичні гази), температура та вологість, робота вентиляції, стан електроживлення. Людина не здатна контролювати це вручну, а автоматика реагує із потрібною швидкістю.

По-друге, автоматика підвищує загальну надійність систем життєзабезпечення: вентиляційні установки, фільтровентиляційні системи, насосні станції, резервне живлення (ДГУ), системи водопостачання та каналізації. Без моніторингу можна не помітити відмову вентиляції, перегрів обладнання, втрату живлення та критичні аварійні режими.

По-третє, під час обстрілів або тривалого перебування людей: навантаження на системи різко зростає, персонал може відсутній, доступ до об'єкта обмежений. Автоматизована система контролю дозволяє здійснювати дистанційний моніторинг, аварійні сценарії, автоматичне перемикання живлення та сигналізацію про небезпеку [2-3].

Згідно ДБН В.2.2-5:2023 має бути реалізовано два режими роботи вентиляції – чиста вентиляція та фільтровентиляція. У режимі чистої вентиляції у основні та допоміжні приміщення укриття подача очищеного від пилу зовнішнього повітря забезпечує необхідний обмін повітря та видалення з приміщень тепловиділень та вологи. Подача повітря відбувається через припливні системи. Витрата повітря для режиму чистої вентиляції розраховується розділом ОВіК. Забір повітря відбувається із існуючої припливної шахти. На повітряозаборі передбачено установку противибухового пристрою, фільтрувальної секції грубого очищення та в межах венткамери герметичних клапанів з електроприводом. Підігрів повітря здійснюється водяним нагрівачем. У режимі фільтровентиляції зовнішнє повітря, яке подається у сховище, очищується від газоподібних засобів масового ураження, аерозолей та пилу. Подача повітря здійснюється через окремий повітрязабір. Очищення від бойових отруйних, небезпечних хімічних радіоактивних та біологічних речовин здійснюється за допомогою фільтра-поглинача.

Для спрощення роботи інженерів та персоналу усі алгоритми роботи реалізуються за допомогою автоматизованої системи управління. На припливну установку встановлюються необхідні КВПіА - сервоприводи, частотні перетворювачі, датчики температури та перепаду тиску.

Одним з важливих параметрів для контролю є загазованість приміщення. Для контролю загазованості використовується блок управління «ВАРТА 1-03.24» [4]. Він дозволяє під'єднати давачі окису вуглецю (чадного газу) та давачі метану та природнього газу для контролю параметрів. У випадку перевищення норм він видає сигнал на світлозвукові оповіщувачі, встановлені при виході з приміщення. Додатково сигнал про «Несправність» та «Поріг» передається у системи диспетчеризації.

Критично важливою є робота системи водопостачання. Інколи людина не в змозі відразу побачити затоплення у приміщенні та миттєво відреагувати на нього. Тому в приміщеннях санітарних вузлів та приміщеннях з інженерними мережами встановлено датчики затоплення, які подають сигнал про аварійну ситуацію. Насосні станції, які встановлюються у бомбосховищі, теж підключаються до системи диспетчеризації за допомогою плат управління.

Для зручності роботи персоналу на кожному вході встановлено замки з електроприводами, які автоматично відкриваються у випадку сигналу «Повітряна тривога». Це дозволяє організувати безперешкодний доступ людей у захисну споруду.

Система електропостачання є не менш важливою у спорудах цивільного захисту. Зазвичай, автоматизованою системою управління передбачається контроль станів ввідних автоматів, реле контролю напруги та контакторів у щитах ГРЩ. Більшість виробників промислових генераторів передбачають плати керування ДГУ. За допомогою цих плат можна віддалено контролювати стан генератора, рівень палива та аварії.

Система інтегрує мережу IoT-сенсорів для контролю параметрів мікроклімату, включаючи температуру, вологість, склад повітря та радіаційний фон, а також облік перебування людей на основі PIR-датчиків.

Висновки. Автоматизована система управління та моніторингу бомбосховища є не просто технологічним удосконаленням, а критично важливим елементом забезпечення безпеки людей у надзвичайних ситуаціях. На відміну від звичайних інженерних об'єктів, захисні споруди функціонують в умовах підвищеного ризику, обмеженого доступу та потенційно тривалого автономного режиму роботи. У таких умовах ручний контроль систем життєзабезпечення є недостатньо ефективним, повільним і залежним від людського фактору.

Впровадження автоматизованої системи дозволяє забезпечити безперервний контроль параметрів мікроклімату, якості повітря, електроживлення, стану вентиляційних та аварійних систем. Це гарантує своєчасне виявлення відмов, аварійних режимів і потенційно небезпечних ситуацій, що безпосередньо впливає на збереження життя та здоров'я людей. Крім того, автоматизація значно підвищує надійність функціонування об'єкта, оптимізує роботу обладнання та забезпечує можливість дистанційного моніторингу.

Перелік посилань:

1. Кодекс цивільного захисту України : Закон України від 02.10.2012 № 5403-VI. Ст. 32. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/5403-17> (дата звернення: 27.02.2026).
2. Aerov D., Gladka M., Paliy S. Integrating IoT technologies for monitoring and managing urban civil defense shelters. *Management of Development of Complex Systems*. 2025. No. 62. P. 125–133. URL: <https://doi.org/10.32347/2412-9933.2025.62.125-133> (дата звернення: 27.02.2026).
3. Комп'ютеризована система моніторингу якості повітря та мікроклімату в бомбосховищі [Електронний ресурс]. URL: <http://elartu.tntu.edu.ua/handle/lib/49988> (дата звернення: 27.02.2026).
4. Блок управління «Варта 1-03-24-2» [Електронний ресурс]. URL: <https://temio.com.ua/product/blok-upravlinnya-varta-1-03-24-2/> (дата звернення: 02.03.2026)

¹ Магістрант 1 курсу Гудзій А. С.

¹ Ст.викл. Штіфзон О. Й.

<https://scholar.google.com/citations?user=WB12UuMAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПОРІВНЯЛЬНИЙ АНАЛІЗ БЕЗДРОТОВИХ ТЕХНОЛОГІЙ ДЛЯ СИСТЕМ ДИСТАНЦІЙНОГО ДІАГНОСТУВАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНИХ ТЕПЛОВИХ ПУНКТИВ

Постановка проблеми та її актуальність. Підвищення енергоефективності систем централізованого теплопостачання вимагає переходу від реактивного обслуговування індивідуальних теплових пунктів (ІТП) до предиктивного (запобіжного). Традиційна локальна автоматика не здатна завчасно сигналізувати про приховані дефекти, такі як поступове забруднення теплообмінників чи знос насосного обладнання, що неминуче призводить до перевитрат енергії [1]. Для реалізації діагностики необхідно об'єднати географічно розподілені ІТП у єдину інформаційну мережу. Головною технічною перешкодою для цього є розташування теплових пунктів: зазвичай це підвальні приміщення із залізобетонними перекриттями, які суттєво екранують радіосигнали [2]. Відповідно, метою роботи є аналіз сучасних бездротових технологій зв'язку для вибору найбільш раціональної архітектури мережі дистанційного діагностування.

Аналіз останніх досліджень. При проектуванні IoT-мереж для об'єктів комунальної енергетики розглядається кілька базових технологій. Їх вибір залежить від балансу між проникаючою здатністю, швидкістю та вартістю експлуатації:

- Zigbee (IEEE 802.15.4): підтримує комірчасту топологію (Mesh), де датчики ретранслюють сигнал один одного. Відмінно підходить для збору даних всередині одного підвалу, але через малий радіус дії (до 50 м) непридатна для об'єднання ІТП різних будівель без складної системи маршрутизаторів [3].
- LoRaWAN: працює в субгігагерцовому діапазоні, завдяки чому чудово проникає крізь перекриття і має радіус дії до 10 км. Головний недолік вкрай низька швидкість (до 50 кбіт/с) та обмеження на ефірний час. Це не дозволяє передавати деталізовані графіки перехідних процесів у реальному часі, що критично для глибокої діагностики [4].
- Стільниковий зв'язок (NB-IoT/LTE): забезпечує високу надійність та добре працює у підвалах завдяки існуючій інфраструктурі мобільних операторів. Проте необхідність сплачувати регулярну абонентську плату за кожну точку робить цей варіант економічно неефективним для закритих корпоративних чи кампусних мереж [5].
- Wi-Fi (IEEE 802.11): забезпечує високу пропускну здатність та абсолютно безкоштовний трафік у межах власної мережі підприємства. Проблема поганого проходження сигналу крізь залізобетон вирішується інженерним шляхом винесенням антени на перший поверх будівлі або інтеграцією в існуючу IT-інфраструктуру об'єкта [6].

Формулювання мети. Відповідно, метою роботи є аналіз сучасних бездротових технологій зв'язку для вибору найбільш раціональної архітектури мережі дистанційного діагностування.

Основна частина. На прикладному рівні для передачі телеметрії з індивідуальних теплових пунктів (ІТП) в умовах можливих нестабільностей зв'язку стандартом де-факто є протокол MQTT (Message Queuing Telemetry Transport). На відміну від класичної мережевої архітектури «клієнт-сервер» (наприклад, Modbus TCP), яка вимагає постійного

синхронного опитування периферійних пристроїв, MQTT побудований за асинхронним принципом «видавець-підписник» (Publish/Subscribe). У контексті мережі теплопунктів, периферійні IoT-контролери, що безперервно збирають дані з датчиків температури та тиску теплоносія, виступають «видавцями». Вони відправляють пакети даних у визначені ієрархічні топіки центрального серверного вузла – MQTT-брокера. Своєю чергою, диспетчерська SCADA-платформа (наприклад, Node-RED) є «підписником», яка автоматично отримує ці дані в момент їх публікації для подальшого аналізу. Використання архітектури MQTT має критичне значення для об'єктів комунальної енергетики, які переважно розташовані у підвальних приміщеннях зі слабким проникненням радіосигналів Wi-Fi. По-перше, цей протокол є вкрай легковаговим: мінімальний розмір його заголовка становить лише 2 байти. Це мінімізує обсяг службового трафіку та дозволяє без затримок передавати деталізовані діагностичні дані (наприклад, у форматі JSON) навіть за умови низької пропускну здатності каналу. По-друге, MQTT успішно нівелює проблему тимчасової втрати зв'язку завдяки вбудованому механізму контролю якості обслуговування (Quality of Service – QoS). Якщо для передачі рутинної телеметрії достатньо рівня QoS 0, то для критичних аварійних сповіщень (наприклад, різке падіння тиску в системі) застосовуються рівні QoS 1 («щонайменше один раз») або QoS 2 («точно один раз»). Це гарантує стовідсоткову доставку важливих пакетів даних до диспетчера після відновлення з'єднання. Для локалізованих об'єктів (мережі корпусів університету, підприємства або житлового комплексу) найбільш раціональним є створення однорідної системи на базі Wi-Fi та MQTT [7]. Імплементация такої архітектури передбачає класичну трирівневу структуру, що реалізує топологію «Зірка» (рис. 1).

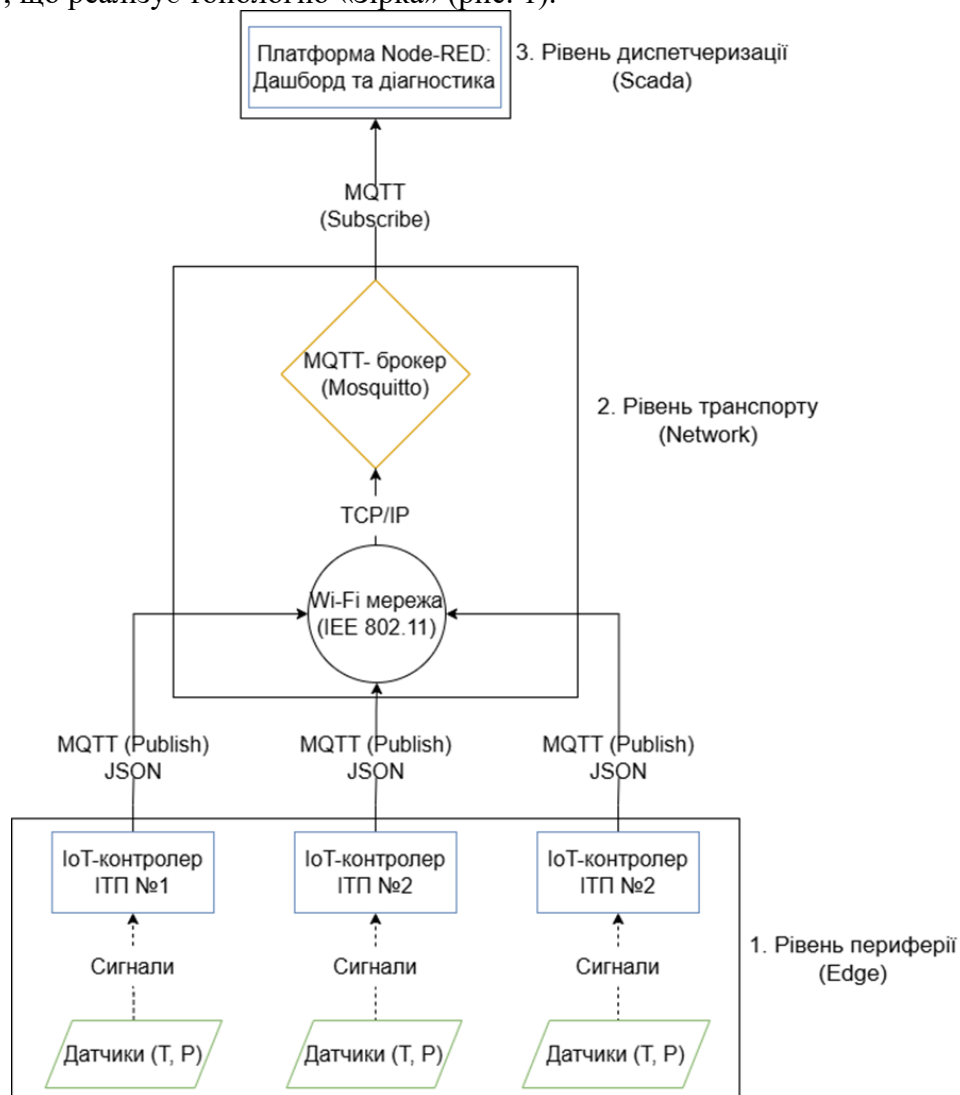


Рисунок 1 – Трирівнева структура мережі для локалізованих об'єктів

На нижньому рівні периферії (Edge) первинні перетворювачі температури та тиску безперервно фіксують фізичні параметри теплоносія. Ці аналогові сигнали зчитуються локальними IoT-контролерами, які встановлені безпосередньо в кожному індивідуальному тепловому пункті. Сформовані мікроконтролерами оптимізовані пакети даних універсального формату JSON передаються на середній рівень транспорту (Network). Замість прокладання високовартісних інформаційних кабелів між будівлями, контролери використовують локальну Wi-Fi мережу для бездротової публікації телеметрії на центральний MQTT-брокер (наприклад, Mosquitto). Завдяки використанню протоколу стека TCP/IP, брокер виконує роль надійного транспортного ядра системи, здатного одночасно обробляти повідомлення від розподіленої мережі теплових пунктів без втрати продуктивності.

На верхньому рівні диспетчеризації (SCADA) функціонує low-code серверна платформа Node-RED. Вона виступає в ролі клієнта, що підписується на відповідні топіки MQTT-брокера, агрегує інформацію з усіх підключених вузлів та візуалізує її на єдиному дашборді оператора. Крім того, система здійснює безперервне порівняння отриманих даних з еталонними математичними моделями ІТП. У разі виявлення розбіжностей, таких як падіння ефективності теплообміну чи деградація насосів, автоматично формується діагностичне сповіщення. Це дозволяє не лише здійснювати централізований моніторинг, але й виявляти аномалії на найбільш ранніх стадіях, ще до виникнення аварійних ситуацій.

Висновки. Організація дистанційного діагностування мережі теплових пунктів є необхідною умовою для підвищення ефективності теплопостачання. Порівняльний аналіз показав, що використання стільникових мереж або технологій класу LPWAN (LoRaWAN [5]) для локалізованих об'єктів часто є економічно недоцільним або технічно обмеженим через низьку швидкість. Найбільш збалансованим рішенням є побудова однорідної IoT-мережі на базі стандарту Wi-Fi та протоколу MQTT. Це забезпечує високу пропускну здатність для передачі динамічних логів, відсутність експлуатаційних витрат на зв'язок та дозволяє швидко розгорнути систему діагностики обладнання.

Перелік посилань:

1. S. Petersen, et al., "A review of IoT solutions for district heating networks," Energy and Buildings, vol. 202, 2019.
2. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Київ: Мінрегіонбуд України, 2008. – 82с.
3. IEEE 802.15.4-2020. IEEE Standard for Low-Rate Wireless Networks. Washington, DC: IEEE Computer Society, 2020.
4. LoRa Alliance. LoRaWAN® 1.0.4 Specification. 2020. [Електронний ресурс].
5. 3GPP TS 36.300. Evolved Universal Terrestrial Radio Access (E-UTRA) and Evolved Universal Terrestrial Radio Access Network (E-UTRAN); Overall description; Stage 2. – 3rd Generation Partnership Project.
6. IEEE 802.11-2020. IEEE Standard for Information Technology-Telecommunications and Information Exchange between Systems Local and Metropolitan Area Networks. - New York: IEEE, 2021.
7. Node-RED Documentation. Design patterns and architecture. OpenJS Foundation.

¹ Магістрант 1 курсу Мартинюк О. І.¹ Ст.викл. Поліщук І. А.<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&authuser=2&user=2CLzdFgAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНТЕЛЕКТУАЛЬНЕ ПРОГНОЗОВАНЕ КЕРУВАННЯ ЗАРЯДОМ АКУМУЛЯТОРНОЇ СИСТЕМИ ГІБРИДНОЇ ЕНЕРГОСИСТЕМИ З УРАХУВАННЯМ ГЕНЕРАЦІЇ СОНЯЧНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ ТА ЗОННИХ ТАРИФІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Активне впровадження розподіленої генерації на базі фотоелектричних установок та акумуляторних систем зумовлює необхідність розроблення ефективних алгоритмів енергоменеджменту. У побутових та малих комерційних системах широко використовуються гібридні інвертори з можливістю заряджання акумуляторів як від сонячної електростанції (СЕС), так і від електричної мережі. В умовах застосування зонних тарифів (зокрема нічного тарифу) виникає задача оптимального вибору джерела заряджання з урахуванням прогнозу генерації, профілю навантаження та технічних обмежень акумуляторної батареї. Неефективне керування призводить до збільшення експлуатаційних витрат та прискореного старіння акумуляторів. Таким чином, актуальною є задача розроблення інтелектуального алгоритму прогнозного керування [1-2], спрямованого на мінімізацію вартості електроенергії та підвищення ресурсу акумуляторної системи.

Аналіз останніх досліджень. У роботах, присвячених керуванню розподіленими енергосистемами [3], значну увагу приділено методам прогнозного керування (Model Predictive Control) [1-2], стохастичній оптимізації та машинному навчанню для прогнозування генерації від СЕС. Зокрема, у працях Н. Lund розглядаються підходи до моделювання енергосистем із високою часткою відновлюваних джерел. У дослідженнях D. Connolly [4] аналізуються інструменти оптимізації інтеграції ВДЕ. Однак більшість відомих підходів орієнтовані на енергосистеми великого масштабу та не враховують специфіку побутових інверторних систем із зонними тарифами та обмеженим ресурсом акумуляторів. Недостатньо дослідженим залишається питання інтеграції економічної моделі тарифів, прогнозу генерації та моделі деградації акумулятора в єдину оптимізаційну задачу.

Формулювання мети. Метою роботи є розроблення математичної моделі та алгоритму прогнозного керування зарядом акумуляторної системи гібридної енергосистеми, що забезпечує мінімізацію вартості спожитої електроенергії з урахуванням зонних тарифів та зменшення темпів старіння акумулятора [3-4].

Основна частина

1. Математична модель системи

Розглядається дискретний часовий інтервал $t = 0, 1 \dots N$. Баланс активної потужності системи описується рівнянням [1-2]:

$$P_{PV}(t) + P_{grid} + P_{dis}(t) = P_{load}(t) + P_{ch}(t), \quad (1)$$

де $P_{PV}(t)$ – потужність генерації СЕС; P_{grid} – потужність, спожита з мережі; $P_{load}(t)$ – потужність навантаження; $P_{ch}(t), P_{dis}(t)$ – потужність заряджання та розряджання акумулятора.

2. Динаміка акумуляторної батареї

Модель стану акумулятора формується на основі енергетичного балансу та дискретного представлення системи керування, що відповідає підходам оптимального керування [1]:

$$x(t+1) = x(t) + \frac{\Delta t}{E_{bat}} \left(\eta_{ch} P_{ch}(t) - \frac{P_{dis}(t)}{\eta_{dis}} \right), \quad (2)$$

з обмеженнями:

$$\begin{aligned} x_{min} &\leq x(t) \leq x_{max} \\ 0 &\leq P_{ch}(t) \leq P_{ch}^{max}, 0 \leq P_{dis}(t) \leq P_{dis}^{max} \end{aligned}$$

Для виключення одночасного заряджання та розряджання вводиться умова невзаємності:

$$P_{ch}(t) \times P_{dis}(t) = 0. \quad (3)$$

3. Економічна модель

Зонний тариф описується функцією:

$$C(t) = \begin{cases} C_{day}, & t \in T_{day} \\ C_{night}, & t \in T_{night} \end{cases} \quad (4)$$

Вартість спожитої електроенергії:

$$J_{energy} = \sum_{t=0}^{N-1} C(t) P_{grid}(t) (\Delta t). \quad (5)$$

4. Урахування деградації акумулятора

Для врахування впливу циклів заряд/розряд на ресурс батареї вводиться регуляризаційний член:

$$J_{deg} = \gamma \sum_{t=0}^{N-1} (P_{ch}^2(t) + P_{dis}^2(t)) \Delta t, \quad (6)$$

де γ - ваговий коефіцієнт.

5. Постановка оптимізаційної задачі

Необхідно знайти послідовність керувань

$$v(t) = [P_{ch}(t), P_{dis}(t), P_{grid}(t)]^T, \quad (7)$$

яка мінімізує функціонал:

$$\min J = \sum_{t=0}^{N-1} [C(t) P_{grid}(t) + \gamma (P_{ch}^2(t) + P_{dis}^2(t))] (\Delta t), \quad (8)$$

при виконанні рівнянь стану, балансу потужності, обмежень на стан, обмежень на керування.

Таким чином задача зводиться до задачі квадратичного програмування з лінійними обмеженнями.

6. Реалізація прогнозного керування

Для врахування змінності генерації та навантаження застосовується метод прогнозного керування (MPC)[1-2]. На кожному часовому кроці формується прогноз $P_{PV}(t)$ та $P_{load}(t)$, після чого розв'язується оптимізаційна задача на горизонті прогнозу. Реалізується лише перше керуюче значення, що забезпечує адаптивність алгоритму до зміни умов.

Висновки. Розроблено математичну модель гібридної енергосистеми з акумуляторним накопичувачем. Також сформульовано задачу оптимального прогнозного керування з урахуванням зонних тарифів і старіння батареї. Запропонований підхід дозволяє мінімізувати витрати на електроенергію, підвищити рівень автономності системи та зменшити інтенсивність циклічних навантажень акумулятора. Отримана модель може бути реалізована в системах реального часу на базі вбудованих контролерів гібридних інверторів або промислових PLC.

Перелік посилань:

1. Lund H. Renewable Energy Systems: A Smart Energy Systems Approach to the Choice and Modeling of 100% Renewable Solutions. Elsevier Science & Technology Books, 2014, 384 p.
2. Mayne D. Q., Rawlings J. B. Correction to "Constrained model predictive control: stability and optimality". Automatica. 2001. Vol. 37, no. 3. P. 483.
3. Camacho E. F., Bordons C. Introduction to Model Predictive Control. Model Predictive control. London, 2007. P. 1–11.
4. A review of computer tools for analysing the integration of renewable energy into various energy systems / D. Connolly et al. Applied Energy. 2010. Vol. 87, no. 4. P. 1059–1082.

¹ Бакалаврант 4 курсу Соломко Д. Г.

¹ Ст.викл. Штіфзон О. Й.

<https://scholar.google.com/citations?user=WB12UuMAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПІДВИЩЕННЯ ВІДМОВОСТІЙКОСТІ СИСТЕМ УПРАВЛІННЯ В ТЕПЛОЕНЕРГЕТИЦІ ЗА ДОПОМОГОЮ РЕЗЕРВУВАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Теплоенергетичні процеси характеризуються безперервною роботою та високою ціною помилки керування. Сучасні вимоги диктують необхідність переходу до парадигми гарантованої доступності системи. Раптова відмова єдиного контролера в котельні або на тепловому пункті миттєво призводить до втрати управління клапанами, порушення циркуляції теплоносія та створює ризик передаварійних ситуацій.

З огляду на це, я пропоную розглядати впровадження апаратного та структурного резервування не як додаткову опцію, а як базову вимогу при проектуванні систем управління в теплоенергетиці. Завдання полягає в тому, щоб система могла автоматично парировати відмову окремого модуля, не перериваючи технологічний процес.

Аналіз останніх досліджень. Побудова сучасних відмовостійких систем вимагає багаторівневого підходу, який охоплює компонентний рівень, рівень комунікацій та загальносистемну архітектуру [1].

Топологія мережі сама по собі не гарантує безперервності процесу без впровадження резервованих протоколів обміну даними та відповідних комунікаційних механізмів [1]. При цьому ключову роль відіграє не лише апаратне дублювання ПЛК, але й здатність системи своєчасно діагностувати відмови на рівні польових пристроїв, оскільки саме датчики є першоджерелом даних для контурів регулювання [2].

Застосування дубльованих архітектур із реалізацією схем голосування є одним із базових підходів підвищення функціональної безпеки та доступності систем [3]. У практиці резервування застосовують схеми типу k-out-of-n [1]. Для двоканальних рішень поширені 1oo2 та 2oo2. У схемі 1oo2 керуючий сигнал формується за активного стану хоча б одного ІВК, що підвищує доступність системи. Схема 2oo2 вимагає узгодженості результатів обох ІВК і підвищує рівень функціональної безпеки за рахунок взаємного контролю. Для трьохканальних структур використовують 2oo3, де рішення приймається більшістю, що забезпечує стійкість до одиничної відмови.

Для незалежних каналів ймовірність небезпечної відмови визначається як добуток ймовірностей відмов окремих каналів, що зумовлює кратне зниження ризику [3].

Такий підхід дозволяє ізолювати поодинокі апаратні збої без втрати цільової функції та підвищити експлуатаційну готовність системи.

Формулювання мети. Метою роботи є обґрунтування вибору оптимальної архітектури резервування ПЛК для автоматизації теплоенергетичних об'єктів з метою забезпечення безударного перемикавання та безперервності технологічного процесу.

Основна частина. Резервування є комплексним рішенням, яке не обмежується простим дублюванням обладнання. Тому ефективність резервування визначається не лише наявністю резервного каналу, але й коефіцієнтом покриття відмов, тобто ймовірністю своєчасного виявлення та ізоляції несправного модуля [4].

Для забезпечення максимальної готовності теплоенергетичного об'єкта необхідно реалізувати надлишковість на трьох базових рівнях: компонентному, мережевому та системному [1].

На компонентному рівні першочерговим є резервування джерел живлення та критичних модулів вводу-виводу. Для критичних режимних параметрів (тиск у паровому колекторі, рівень у барабані котла) доцільно застосовувати дублювання або трикратне встановлення датчиків із програмною перевіркою узгодженості показів та мажоритарним вибором достовірного сигналу [5].

Проте центральним і найскладнішим питанням залишається вибір парадигми резервування центрального процесора.

Існуючі моделі синхронізації:

- Cold Standby (холодний резерв), де резервний ПЛК не виконує керування, активується лише після відмови основного.
- Warm Standby (теплий резерв), де резервний ПЛК працює в режимі готовності з частковою синхронізацією стану.
- Hot Standby (гарячий резерв), де основний і резервний ПЛК працюють паралельно з безперервною синхронізацією даних.

Ці моделі мають різний вплив на стабільність керованого процесу [1].

Використання холодного або теплого резерву передбачає певну часову затримку при передачі керування від основного ПЛК до резервного. У теплоенергетиці, де ПД-регулятори безперервно керують ступенем відкриття клапанів, така затримка неминуче викликає стрибкоподібні зміни керуючого сигналу. Тому єдиним технічно виправданим рішенням для таких систем є застосування гарячого резерву (Hot Standby). У цій архітектурі основний та резервний ПЛК працюють паралельно, безперервно синхронізуючи стан пам'яті: входи, виходи, внутрішні регістри через виділений високошвидкісний оптоволоконний канал. У разі апаратної відмови основного процесора, резервний перехоплює управління за один робочий цикл контролера. Це гарантує безударне перемикавання, при якому виконавчі механізми залишаються у заданому положенні, а регулятори зберігають накопичену інтегральну складову [3, 4].

Висновки. Забезпечення відмовостійкості систем управління в теплоенергетиці вимагає комплексного підходу та переходу від одноканальних ПЛК до багаторівневих резервованих архітектур. Для керування безперервними тепловими процесами оптимальним є використання парадигми Hot Standby, яка забезпечує миттєве перехоплення управління та безударне перемикавання виконавчих механізмів. Варто додати, що сам ефект резервування ПЛК знижується, якщо не резервуються мережеві комунікації та не забезпечується діагностика польових пристроїв. Тому разом із Hot Standby доцільно застосовувати кільцеві топології та алгоритми виявлення відмов датчиків і каналів вводу-виводу [5].

Перелік посилань:

1. A Review of Redundancy in PLC-Based Systems. 2 Mar. 2023, www.researchgate.net/publication/368966609_A_review_of_redundancy_in_PLC-based_systems. (дата звернення 23.02.2026).
2. Jeong Taikyeong. "A Novel Overload Control Algorithm for Distributed Control Systems to Enhance Reliability in Industrial Automation." *Applied Sciences*, vol. 15, no. 10, 21 May 2025, p. 5766. <https://doi.org/10.3390/app15105766>.
3. Medvedík Milan, et al. "Safety of Control Systems with Dual Architecture Based on PLCs." *Applied Sciences*, vol. 12, no. 19, 29 Sept. 2022, p. 9799. <https://doi.org/10.3390/app12199799>.
4. Ryu, Chi Kook, et al. "Heterogeneous PLC-Based Distributed Controller with Embedded Logic-Monitoring Blackbox for Real-Time Failover." *Electronics*, vol. 14, no. 22, 7 Nov. 2025, p. 4359. <https://doi.org/10.3390/electronics14224359>.
5. Trapani Natalia, and Leonardo Longo. "Fault Detection and Diagnosis Methods for Sensors Systems: A Scientific Literature Review." *IFAC-PapersOnLine*, vol. 56, no. 2, 1 Jan. 2023, pp. 1253–1263. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2023.10.1749>.

¹ Бакалаврант 4 курсу Чиженко Б. О.

¹ Асист. Захарченко А. С.

<https://scholar.google.com/citations?user=RpOI6DoAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОСОБЛИВОСТІ АВТОМАТИЗАЦІЇ РЕЖИМІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ КОГЕНЕРАЦІЙНОЇ УСТАНОВКИ В УМОВАХ ЗМІННОГО НАВАНТАЖЕННЯ ПІДПРИЄМСТВА

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні промислові об'єкти характеризуються високим рівнем та складною динамікою споживання енергоресурсів, що створює складні умови для роботи когенераційних установок (КГУ). Традиційні алгоритми керування КГУ орієнтовані на стабільну роботу в базовому режимі, тому різкі асинхронні коливання електричного та теплового навантажень призводять до зниження загального коефіцієнта корисної дії, перевитрат палива та прискореного зносу обладнання. Ефективність автоматизації КГУ визначається здатністю системи керування підтримувати баланс між генерацією та попитом при збереженні високого електричного ККД та стабільного теплового потоку. Актуальність теми зумовлена необхідністю розробки АСК, яка мінімізує перехідні процеси та запобігає прискореному зносу газопоршневого двигуна в умовах змінного навантаження.

Аналіз останніх досліджень. Сучасний стан розвитку засобів автоматизації енергетичних систем свідчить про перехід від локальних регуляторів до використання хмарних технологій для аналізу роботи системи і синхронізації працюючих когенераційних установок для утворення власної єдиної мережі для забезпечення власних потреб чи продажу надлишку енергії в загальну мережу [1]. Дослідження підтверджують, що використання когенерації на базі газових двигунів внутрішнього згоряння є найбільш перспективним методом підвищення енергоефективності підприємств [2]. Проте питання адаптивного керування режимами роботи в умовах нерівномірного графіка навантаження залишаються відкритими і потребують детального технічного обґрунтування.

Формулювання мети. Метою роботи є аналіз та обґрунтування принципів автоматизації режимів експлуатації КГУ для оптимізації роботи енергетичного комплексу підприємства при змінних електричних та теплових навантаженнях.

Основна частина.

Когенераційна установка як об'єкт автоматизації є складною багатозв'язною системою. На основі технічної документації установок Vitobloc та MWM, архітектура АСК повинна охоплювати контроль параметрів двигуна, генератора та системи теплообміну [3, 4]. Основним завданням АСК є стабілізація частоти обертання та напруги при зміні електричного навантаження, а також регулювання температури теплоносія.

В умовах змінного навантаження АСК реалізує три базові режими автоматизації:

1. Теплокерований режим з буферизацією. У цьому режимі потужність модуля регулюється відповідно до температури у зворотному трубопроводі теплової мережі. Автоматика підтримує температуру на вході в двигун не нижче 60 °С (для Vitobloc 200), що є критичним для виключення низькотемпературної корозії [3]. Важливим елементом АСК є алгоритм керування акумулятором тепла (буфером). Система контролює градієнт температури по висоті бака і дозволяє двигуну працювати в номінальному режимі (100 % потужності) навіть при зниженні поточного споживання, спрямовуючи надлишок у буфер. Це виключає режим «тактування» (частих запусків), що критично, оскільки для економічної доцільності установка має працювати понад 5000 годин на рік [1].

2. Електрокерований режим з модуляцією. При пріоритеті електричного навантаження АСК забезпечує плавну зміну потужності (зазвичай у діапазоні 50–100 %). Автоматика реалізує складний контур λ -регулювання, що коригує співвідношення «газ-повітря» за допомогою змішувачів з кроковими двигунами. Для запобігання детонації при різких накидах навантаження система контролю (наприклад, ТРЕМ від MWM) здійснює моніторинг кожного циліндра окремо, автоматично змінюючи кут випередження запалювання [4]. Це забезпечує динамічну стійкість енергосистеми підприємства.

3. Комбінований та острівний режими. АСК автоматично синхронізує генератор з мережею або переводить його в автономний (острівний) режим у разі аварії. У острівному режимі пріоритетом автоматики стає підтримання частоти 50 Гц при змінному навантаженні. Живлення самої АСК (контролерів ТЕМ/ТРЕМ та ПЛК) здійснюється від джерел постійного струму 24 В з акумуляторним резервуванням, що гарантує керовану зупинку установки навіть при повній втраті напруги.

Апаратна реалізація АСК базується на промислових контролерах, що об'єднують вхідні сигнали від датчиків температури (РТ100/РТ1000), тиску газу, датчиків детонації та параметрів мережі. Програмне забезпечення АСК виконує функцію захисту: автоматичне вимкнення при перегріві, падінні тиску мастила або виході частоти за межі допуску. Завдяки інтеграції інтерфейсів зв'язку (CAN-bus, LAN) здійснюється дистанційний моніторинг та візуалізація процесів у SCADA-системі.

Важливим аспектом комплексної автоматизації є також керування режимами утилізації теплової енергії. Для уникнення додаткового теплового забруднення навколишнього середовища, яке виникає при неефективному скиданні надлишкового тепла через аварійні радіатори в атмосферу, автоматична система повинна раціонально розподіляти теплові потоки. Це включає перенаправлення теплової енергії на потреби опалення та гарячого водопостачання (ГВП) підприємства в холодну пору року. Проте особливої уваги заслуговує використання абсорбційних холодильних машин (АХМ) для виробництва холоду в літній період (режим тригенерації). Завдяки АХМ, надлишкове тепло від двигуна трансформується у холод для потреб систем кондиціонування або технологічного охолодження на виробництві. Якщо це тепло не освоювати, відбувається не лише втрата економічного потенціалу установки, але й безпосереднє теплове забруднення навколишнього середовища. Таким чином, повна та автоматизована утилізація тепла дозволяє підтримувати максимальний ККД цілий рік.

Висновки. Ефективна автоматизація когенераційної установки в умовах змінного навантаження дозволяє досягти сумарного ККД понад 90%. Застосування інтелектуальних режимів керування, таких як модуляція потужності та буферизація тепла, забезпечує стабільність роботи обладнання та подовжує міжремонтний інтервал. Використання мікропроцесорних систем керування з функцією контролю детонації та адаптивного λ -регулювання є ключовою умовою для інтеграції КГУ в сучасні енергетичні комплекси підприємств, що дозволяє значно знизити питомі витрати палива та забезпечити надійне енергопостачання.

Перелік посилань:

1. В. В. Паньків, «Когенерація: як це працює. Огляд ринку», Мережі та бізнес, № 4, С. 96–101, 2010.
2. Ю. М. Куценко, В. М. Коломицев, «Аналіз основних чинників анаеробного метанового збродження для отримання біогазу», Праці ТДАТУ, Вип. 11, том 3, С. 49–56, 2011.
3. ТОВ «ВІССМАНН», «Інструкція з проектування Vitobloc 200/300. Компактна блочна когенераційна установка», Навчальний посібник, Київ, С. 14–28, 2024.
4. MWM Caterpillar Energy Solutions GmbH, “Layout of power plants. Installation directive. Gas engines series 3020; 3016.”, Технічний довідник, Mannheim, 362 p., 2024.

¹ Мол. вчений Никифорович О. Є.

¹ Проф., д.т.н. Волошук В. А.

<https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=26533723900>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ ПАКЕТУ ENERGYPLAN ДЛЯ РОЗРОБЛЕННЯ СЦЕНАРІЇВ РОЗВИТКУ ЕНЕРГОСИСТЕМ ТЕРИТОРІАЛЬНИХ ГРОМАД

Постановка проблеми та її актуальність. Енергетика України опинилася перед великим викликом через систематичні обстріли, що призвели до знищення значної частини енергогенеруючих потужностей. В умовах безперервних атак на критичну інфраструктуру постає гостра потреба у розробленні принципово нової концепції створення та експлуатації енергосистем, яка б за рахунок збалансованості та адаптивності систем до воєнних ризиків забезпечила необхідний рівень стійкості та захищеності енергопостачання територіальних громад.

Актуальною також залишається ініціатива України щодо підтримки зусиль ЄС, направлених на впровадження так званого Європейського зеленого курсу (The European Green Deal), загальною метою якого є зробити Європейський континент кліматично нейтральним до 2050 року [1].

Одним із актуальним напрямком подальшого розвитку енергетики як в країнах Європейського Союзу, так і в інших країнах світу є концепція Smart Energy Systems [2].

Для проведення досліджень щодо розвитку енергосистем є потреба у використанні спеціального програмного забезпечення.

Аналіз останніх досліджень. В теперішній час пропонується широкий спектр комп'ютерних програм, які дають можливість користувачам моделювати та аналізувати енергетичні системи на національному та регіональному рівнях для розроблення різноманітних сценаріїв подальшого розвитку енергетики [3–5].

Розроблення сценаріїв розвитку енергосистем України з урахуванням забезпечення їх стійкості має базуватися на впровадженні розподіленої генерації та з урахуванням використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), що вимагає використання спеціалізованого програмного забезпечення з розширеним функціоналом. Такий інструментарій повинен забезпечувати комплексний порівняльний аналіз інноваційних систем, які технічно й організаційно відрізняються від існуючих. Особливою вимогою до програмного комплексу є здатність адекватно враховувати стохастичну природу та нестабільність ВДЕ, гарантуючи точність прогнозів у межах розроблених стратегій енергетичної трансформації.

Однією із найбільш затребуваних комп'ютерних програм такого типу є пакет EnergyPLAN, який розроблено в університеті Ольборга (Данія). Станом на липень 2022 року програму EnergyPLAN було застосовано в 315 рецензованих статтях [6]. Разом з тим, в більшості випадках дана програма використовується для оцінювання енергосистем на рівні цілої країни чи навіть континенту.

Формулювання мети. Метою роботи є аналіз робіт, у яких програмний пакет EnergyPLAN використовується для розроблення та аналізу локальних енергосистем із врахуванням можливостей широкого залучення технологій використання відновлюваних та місцевих джерел енергії.

Основна частина. Аналіз показав, що програма EnergyPLAN широко використовується для проведення досліджень з розвитку локальних енергосистем на рівні окремих міст чи територіальних громад. Нижче наведено окремі приклади таких робіт.

В роботі [7] розроблено методологію створення систем із 100 % використанням ВДЕ, оптимізації використання біомаси та обміну електроенергією з національною системою. Запропонована методологія успішно протестована на прикладі альпійського міста Бозен-Больцано з метою створення сценарію переходу 100 % використання ВДЕ у 2050 році.

Автори [8] запропонували рішення для ідентифікації, розроблення та оцінювання систем теплозабезпечення міста Утрехт, Нідерланди, з урахуванням впливу на інші системи енергозабезпечення. Дослідження проводилися із застосуванням комп'ютерної програми EnergyPLAN. Аналіз показав, що можна досягти річної економії енергії на рівні 17 % за умови впровадження побутових ТНУ та ефективному використанню ВДЕ. Сценарій на базі централізованого теплозабезпечення є менш ефективним через втрати в розподільчих мережах. Однак він має потенціал для залучення більш стійких джерел теплоти. Економічний аналіз показує, що сценарій із використанням побутових ТНУ є найдорожчим і вимагає втричі більших інвестиційних витрат порівняно з базовим сценарієм. Найнижчі інвестиції спостерігаються для сценарію із централізованим теплозабезпеченням, який, разом з тим, є вдвічі дорожчим за інвестиції для базового сценарію.

В роботі [9] із використанням пакету EnergyPLAN досліджено можливість використання інтелектуальних електромобілів (EV) в італійському місті Озімо для балансування змінного й нестабільного виробництва електроенергії СЕС та скорочення викидів CO₂. Результати показують, що 10 % використання електромобілів за технологією Vehicle-to-Grid може усунути необхідність експорту надлишкової генерації електроенергії в умовах існуючої встановленої потужності фотоелектричних систем, знизивши викиди CO₂ на 3,5 %. У випадку 30 % використання технології V2G можна досягати того ж результату з подвійною потужністю фотоелектричних систем, зменшуючи викиди на 17,6 %.

Автори [10] оцінили можливості реалізації стратегії переведення до 2030 року італійського міста Альтавілла-Сілентіна на територію із нульовим викидом парникових газів. Аналіз було здійснено за допомогою програмних пакетів EnergyPLAN та TRNSYS. Поставлену ціль пропонуються досягнути за рахунок встановлення вітрової електростанції потужністю 15,5 МВт, сонячної електростанції потужністю 1,92 МВт та біогазової когенераційної установки електричною потужністю 456 кВт. Також пропонується замінити котли на викопному паливі теплонасосними установками та котлами на біомасі (пелети, тріска). В транспорті пропонується повністю перейти на електричні автомобілі.

Для муніципалітету Ольборг у Данії, із використанням пакету EnergyPLAN, було досліджено можливості забезпечення незалежності міста від викопних видів палива шляхом використання низькотемпературної геотермальної енергії, енергії вітру та біомаси [11]. Результати аналізу показують, що енергетичні потреби міста можна покрити за допомогою місцевих відновлюваних джерел енергії, якщо додаткові заходи із зменшення потреб в електроенергії та тепла поєднати із заміною палива у транспортному секторі.

У статті [12] із на основі пакету EnergyPLAN розроблено сценарій впровадження технологій відновлюваної енергетики для округу Вараждин, Хорватія, на 2050 рік з використанням концепції Smart Energy Systems. Дослідження показали, що перехід на 100 % ВДЕ є технічно можливим та економічно доцільним, оскільки загальні річні витрати залишаються на рівні існуючої системи на базі викопного палива. Проте це вимагає кардинальної зміни структури витрат: від переважання паливних витрат (змінні витрати) до значних капітальних інвестицій у технології (66 % від усіх витрат).

У роботі [13], із за допомогою пакету EnergyPLAN реалізовано техніко-економічне оцінювання різних сценаріїв досягнення вуглецевої нейтральності системи енергозабезпечення громади Векше (Швеція). Результати показали, що існуюча енергетична система є достатньою для задоволення майбутнього попиту на тепло. Однак задоволення попиту на електроенергію та палива для транспорту і промисловості потребує змін. У короткостроковій перспективі та за умови зростання попиту на енергію та ціни на

неї, вуглецева нейтральність є технічно можливою без значних змін у технологіях енергопостачання. Однак у довгостроковій перспективі інвестиції в ВДЕ, а також у системи зберігання вуглецю є фінансово вигідними.

Висновки. Отже, аналіз показав широке застосування програми EnergyPLAN для дослідження можливостей подальшого розвитку енергосистем в рамках концепції Smart Energy Systems не тільки країн, але і міст та громад. Причому, основний фокус досліджень був направлений на оцінювання потенціалу використання відновлюваних і місцевих джерел енергії та досягнення нульового викиду парникових газів. Дана програма може бути використана для дослідження щодо подальшого розвитку енергосистем територіальних громад України з можливістю підвищення їх стійкості та безпеки у теперішніх умовах війни та післявоєнної відбудови.

Перелік посилань:

1. Aszódi A.; Biró B.; Adorján L.; Dobos Á. C.; Illés G.; Tóth N. K.; Zagyi D.; Zsiborás Z. T. Comparative Analysis of National Energy Strategies of 19 European Countries in Light of the Green Deal's Objectives. *Energy Convers. Manag.* X 2021, 12, 100136, doi:10.1016/j.ecmx.2021.100136.
2. Lund H.; Østergaard P. A.; Connolly D.; Mathiesen B. V. Smart Energy and Smart Energy Systems. *Energy* 2017, 137, 556–565, doi:10.1016/j.energy.2017.05.123.
3. Oluah C. K.; Kerr S.; Maroto-Valer M. M. Applicable Models for Upscaling of Smart Local Energy Systems: An Overview. *Smart Energy* 2024, 13, 100133, doi:10.1016/j.segy.2024.100133.
4. Rossi M.; Jin L.; Monforti Ferrario A.; Di Somma M.; Buonanno A.; Papadimitriou C.; Morch A.; Graditi G.; Comodi G. Energy Hub and Micro-Energy Hub Architecture in Integrated Local Energy Communities: Enabling Technologies and Energy Planning Tools. *Energies* 2024, 17, 4813, doi:10.3390/en17194813.
5. Majidi H.; Hayati M. M.; Breyer C.; Mohammadi-ivatloo B.; Honkapuro S.; Karjunen H.; Laaksonen P.; Sihvonen V. Overview of Energy Modeling Requirements and Tools for Future Smart Energy Systems. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2025, 212, 115367, doi:10.1016/j.rser.2025.115367.
6. Østergaard P. A.; Lund H.; Thellufsen J. Z.; Sorknæs P.; Mathiesen B. V. Review and Validation of EnergyPLAN. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2022, 168, 112724, doi:10.1016/j.rser.2022.112724.
7. Menapace A.; Thellufsen J. Z.; Pernigotto G.; Roberti F.; Gasparella A.; Righetti M.; Baratieri M.; Lund H. The Design of 100 % Renewable Smart Urban Energy Systems: The Case of Bozen-Bolzano. *Energy* 2020, 207, 118198, doi:10.1016/j.energy.2020.118198.
8. Liu W.; Best F.; Crijns-Graus W. Exploring the Pathways towards a Sustainable Heating System – A Case Study of Utrecht in the Netherlands. *Journal of Cleaner Production* 2021, 280, 125036, doi:10.1016/j.jclepro.2020.125036.
9. Bartolini A.; Comodi G.; Salvi D.; Østergaard P. A. Renewables Self-Consumption Potential in Districts with High Penetration of Electric Vehicles. *Energy* 2020, 213, 118653, doi:10.1016/j.energy.2020.118653.
10. De Luca G.; Fabozzi S.; Massarotti N.; Vanoli L. A Renewable Energy System for a Nearly Zero Greenhouse City: Case Study of a Small City in Southern Italy. *Energy* 2018, 143, 347–362, doi:10.1016/j.energy.2017.07.004.
11. Alberg Østergaard P.; Mathiesen B. V.; Möller B.; Lund H. A Renewable Energy Scenario for Aalborg Municipality Based on Low-Temperature Geothermal Heat, Wind Power and Biomass. *Energy* 2010, 35, 4892–4901, doi:10.1016/j.energy.2010.08.041.
12. Bačević I.; Østergaard P. A. Local Smart Energy Systems and Cross-System Integration. *Energy* 2018, 151, 812–825, doi:10.1016/j.energy.2018.03.098.
13. Ahmed S.; Nguyen T. Analysis of Future Carbon-Neutral Energy System – The Case of Växjö Municipality, Sweden. *Smart Energy* 2022, 7, 100082, doi:10.1016/j.segy.2022.100082.

СЕКЦІЯ № 9

**Аспекти розвитку
інженерії програмного
забезпечення в
енергетиці**

¹ MS's programme 1st year Avanesov T. K.

¹ Assoc.prof., cand.eng.sc. Varava I. A.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=UgfWon8AAAAJ&hl=en>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

APPLICATION PROGRAMMING INTERFACE OF THE FILE DATA MANAGEMENT SUBSYSTEM OF THE SMARTENERGY SOFTWARE COMPLEX

Statement of the problem and its relevance

In the conditions of intensive development of distributed computing systems and energy modeling technologies, the integration of heterogeneous models into unified software platforms requires reliable mechanisms for storing and managing large volumes of file-based data. The SmartEnergy modeling complex integrates various computational modules that generate input, intermediate, and output data in multiple file formats.

The effective functioning of such a system requires not only physical data storage, but also structured, secure, and scalable access to these files. Direct interaction with the file system complicates integration between subsystems, reduces reliability, and limits deployment in cluster environments. Therefore, it is advisable to implement a unified application programming interface (API) that provides standardized interaction between users, modeling subsystems, and the data storage of the SmartEnergy complex.

Analysis of the latest research

Modern distributed software systems increasingly rely on REST-based architectural principles for organizing interaction between components. Representational State Transfer (REST) is a widely used architectural approach to designing web services in modern Web application development. It is simple, portable, and works well with HTTP, making it suitable for developing distributed systems that support various applications [1].

File storage in scientific computing and cloud setups often uses service-oriented or microservice designs. These designs simplify file tasks and control access through APIs. Still, some modeling systems, like those for energy simulation, handle file interactions on a local level without standard access points.

So, there's a need for a special API subsystem. This subsystem should fit the specific ways that modeling systems work in clustered settings and with different file types. Additionally, CephFS was selected as a distributed file system due to its proven scalability, high throughput, and efficient handling of large and diverse datasets. Performance studies demonstrate that CephFS can maintain consistent I/O performance across many concurrent clients while providing fault tolerance and flexible storage management, making it suitable for data-intensive modeling environments [2].

Goal formulation

The goal of this work is to develop and deploy on a computing cluster a service that provides structured and secure access to file-based data storage of the SmartEnergy modeling complex based on CephFS distributed file system.

To achieve this goal, it is necessary to:

- design the architecture of the file management subsystem;
- implement REST-based endpoints for file operations;
- ensure concurrency control and secure access;
- integrate the subsystem with existing modeling components;
- validate its performance under realistic workloads.

Main Part

General Architecture of the Subsystem

The developed subsystem follows a service-oriented architecture. The API acts as an intermediate layer between users, modeling modules, and the physical file storage.

The interaction model is based on standard HTTP methods:

- GET - retrieval of file content or metadata;
- POST - uploading new files;
- PUT - updating existing files;
- DELETE - removing files from storage.

Metadata are transferred in JSON format, while binary data are processed using multipart/form-data mechanisms.

File Identification Model

(Identifiers: S - scenario; E - experiment; U - user.)

Each file in the storage is uniquely identified by a tuple defined by a conceptual model. Different models can help in identifying and organizing files in the SmartEnergy complex.

Scenario-oriented model ($F = \{S, E, U, \text{FileType}, \text{Version}\}$) focuses on simulation scenarios and experiment groups, which makes managing model outputs easier.

UUID-based model ($F = \{\text{UUID}\}$) is lightweight and guarantees a unique identifier for each file, which is good for distributed environments and automated processes. However, it requires a separate place to store metadata for context.

Metadata-rich model ($F = \{U, S, E, \text{FileType}, \text{Timestamp}, \text{Version}, \text{Checksum}\}$) extends these ideas by including additional information such as file type, creation timestamp, and checksum for data integrity, making it particularly suitable for distributed and clustered environments where reproducibility, auditing, and fault tolerance are critical. However, it can introduce overhead in storing, indexing and implementation due to its complexity.

These models allow flexibility in planning the file management system, depending on whether the focus is on readability, workflow, or scalability.

Storage Abstraction Layer

To separate business logic from direct file system operations, an abstraction module was introduced. It implements:

- path validation and normalization;
- concurrency control mechanisms;
- file format validation;
- version management.

The versioning mechanism allows storing multiple revisions of simulation results and prevents data loss during concurrent updates.

Cluster-Oriented Design

The API service is designed with consideration of future deployment in a computing cluster (in particular via a Docker container). A stateless interaction model is selected to enable horizontal scaling, while compatibility with containerization technologies is taken into account at the design stage.

Special attention is given to defining requirements for load distribution, fault tolerance, and predictable response time under concurrent access conditions.

Functional Requirements of the Developed System

The main requirements of the developed subsystem are:

- accessibility through standardized REST endpoints;
- clear and structured interaction model;
- uninterrupted operation in a clustered environment;
- scalability under high load;
- support for heterogeneous file formats;
- extensibility for future modeling modules.

Results

The results of this research include:

- a formalized architecture of the API for file data management in SmartEnergy;
- a structured metadata and versioning model for simulation files;
- defined mechanisms for secure and concurrent access;
- technical specifications for cluster deployment;
- integration guidelines for modeling modules and user interfaces.

The designed solution is intended to improve maintainability, scalability, and interoperability of the SmartEnergy modeling complex compared to direct file system interaction.

Conclusions

The obtained results can be applied in distributed scientific computing platforms, energy system simulation environments, and other modeling complexes that require reliable and scalable file data management in clustered infrastructures.

References:

1. Gowda P., Gowda A. N. Best Practices in REST API Design for Enhanced Scalability and Security // *J Artif Intell Mach Learn & Data Sci.* – 2024. – Vol. 2, No. 1. – P. 827-830. – DOI: <https://doi.org/10.51219/JAIMLD/priyanka-gowda/2024>.
2. Peters A. J., van der Ster D. C. Evaluating CephFS performance vs. cost on high-density commodity disk servers // *Computing and Software for Big Science.* – 2021. – Vol. 5. – Article 25. – DOI: <https://doi.org/10.1007/s41781-021-00071-1>.

¹ Postgraduate 1st year Rudnikova N. S.

¹ Prof., doc.eng.sc. Barabash O. V.

<https://scholar.google.com/citations?user=PCPdRKwAAAAJ&hl=ua>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

TENSORFLOW, NEURAL NETWORKS, XGBOOST, SVM AS MACHINE LEARNING ALGORITHMS IN ROBOTICS

Statement of the problem and its relevance. In the context of rapid advancement in robotic technologies and artificial intelligence, timely and comprehensive study of machine learning algorithms for robotics applications is critically important [1,2]. The integration of intelligent systems into robotic platforms is increasingly focused on enabling autonomous decision-making, object recognition, and adaptive control in complex environments [4]. For deep understanding of any machine learning algorithm, it is necessary to create high-quality materials with correctly explained theoretical foundations and practical implementation examples. It is for this reason that it is advisable in technical documentation not only to provide algorithms for specific tasks but also to demonstrate practical applications and expected outcomes when implementing these algorithms in robotic systems.

Analysis of the latest research. Machine learning algorithms enable robots to perceive and interact with environments beyond traditional programming capabilities [2]. Combining neural networks, gradient boosting, and support vector machines creates intelligent robotic systems for complex behaviors [1].

Goal formulation. A variety of machine learning techniques can be employed to develop intelligent robotic systems. One common approach is to implement deep neural networks for visual perception tasks, then integrate these with reinforcement learning frameworks to create adaptive control policies. Another technique involves combining multiple algorithms, such as using convolutional neural networks for feature extraction and XGBoost for decision-making, to create more robust and accurate robotic systems.

Main Part. TensorFlow enables deep neural network implementation for robotic control [2]. Differentiable forward kinematics in TensorFlow 2 allow end-to-end learning of manipulator control [2] is given by equation (1):

$$p = f_{\text{kinematic}}(\theta), \quad (1)$$

where p is end-effector position and θ represents joint angles. Mölschl et al. [2] demonstrated differentiable kinematics enable efficient robotic learning.

It shall be notified that deep networks revolutionize robotic perception and autonomous driving [1]. General CNN form for robotic vision according to the formula (2):

$$C(u, v) = \sum (i) \sum (j) B_i^n(u) B_j^m(v) P_{ij}. \quad (2)$$

Convolution extracts spatial features for object recognition and navigation. Paniego et al. [1] showed optimized neural architectures significantly improve real-world performance. XGBoost excels in micro-robot motion prediction in complex environments [3] is given by formula (3):

$$\widehat{y}_i = \sum (k=1)^K f_k(x_i), \quad f_k \in \quad (3)$$

however, with regularized objective is defined by equation (4):

$$L(\phi) = \sum_i l(\widehat{y}_i, y_i) + \sum_k \Omega(f_k). \quad (4)$$

Zhao [3] demonstrated superior performance in learning motion dynamics from limited data. SVM provides robust grasping with limited training examples according to the equation (5):

$$\min 1/2|w|^2 + C \sum \xi_i. \quad (5)$$

Pelosoof et al. [4] developed SVM grasping with excellent generalization. Decision function for grasp is given by formula (6):

$$f(x) = \text{sign}(\sum \alpha_i y_i K(x_i, x) + b). \quad (6)$$

Implementation Examples. TensorFlow ROS Node, as shown in Algorithm 1:

```
class TensorFlowROSNode:
    def load_model(self):
        # Loading pre-trained InceptionV3 for object
        recognition
        self.model =
        tf.keras.applications.InceptionV3(weights='imagenet')

    def image_callback(self, msg):
        # Preprocessing image for the neural network
        img = tf.image.resize(cv_image, (299, 299))
        img =
        tf.keras.applications.inception_v3.preprocess_input(img)
        predictions =
        self.model.predict(np.expand_dims(img, axis=0))
```

For instance, SVM ROS Controller, as shown in Algorithm 2:

```
class SVMGraspController:
    def feature_callback(self, msg):
        # Vectorizing sensor data for SVM classification
        features = np.array(msg.data).reshape(1, -1)
        prediction =
        self.svm_model.predict(features_scaled)
        probability =
        self.svm_model.predict_proba(features_scaled)
```

Surgical Robotics Applications. In the demanding environment of robotic surgery, machine learning algorithms must balance high-precision classification with strict real-time

latency requirements. Table 1 highlights the performance metrics of various architectures applied to critical surgical tasks, including tissue classification and motion prediction.

Table 1 – ML algorithms for surgical robotics

Algorithm	Task	Precision	Recall	F1-Score	Time (ms)
XGBoost	Motion Prediction	0.89	0.91	0.90	8
SVM	SVM	0.87	0.87	0.86	5
ResNet-34	Tissue Classification	0.92	0.90	0.91	16
Ensemble	Multi-task	0.96	0.94	0.95	45

Conclusions. TensorFlow neural networks, XGBoost, and SVM provide powerful tools for intelligent robotic systems. Consequently, combining deep learning flexibility with gradient boosting efficiency and kernel method robustness enables complex perception and control tasks. To summarize, future research should optimize algorithms for real-time performance and develop standardized integration frameworks.

References:

1. Paniego S., Paliwal N., and Cañas J. M., "Model Optimization in Deep Learning Based Robot Control for Autonomous Driving," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 9, no. 1, p. 715–722, 2024, <https://doi.org/10.1109/LRA.2023.3336244>.
2. Mölschl L., Hollenstein J. J., and Piater J., "Differentiable Forward Kinematics for TensorFlow 2," *arXiv preprint* arXiv:2301.09954 [cs.RO], submitted Jan. 24, 2023; revised Mar. 10, 2023. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2301.09954>.
3. Zhao Q., "Study on the Motion Characteristics of Micro-Robots in Complex Environments Based on the VACPO-XGBoost Model," in *Proceedings of the 2024 4th International Conference on Artificial Intelligence, Robotics, and Communication*, IEEE, Dec. 27–29, 2024, Xiamen, China, 2025. <https://doi.org/10.1109/ICAIRC64177.2024.10900060>.
4. Pelosof R., Miller A., Allen P., and Jebara T., "An SVM Learning Approach to Robotic Grasping," in *Proceedings of the IEEE International Conference on Robotics and Automation*, IEEE, Apr. 26–May 1, 2004, New Orleans, LA, USA. <https://doi.org/10.1109/ROBOT.2004.1308797>.
5. Martins P., Sá F., Morgado F., and Cunha C., "Using Machine Learning for Cognitive Robotic Process Automation (RPA)," in *Proceedings of the 2020 15th Iberian Conference on Information Systems and Technologies*, IEEE, June 24–27, 2020, Seville, Spain. <https://doi.org/10.23919/CISTI49556.2020.9140440>.
6. Bai Q., Li S., Yang J., Song Q., Li Z., and Zhang X., "Object Detection Recognition and Robot Grasping Based on Machine Learning: A Survey," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 181855–181879, Oct. 2020. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3028740>.

¹ MS's programme 1st year Seikauskaite A. A.

¹ Sen. lect., cand.eng.sc. Bandurka O. I.

https://scholar.google.com/citations?user=Fge2xAsAAAAJ&citation_for_view=Fge2xAsAAAAA

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

INFORMATION TECHNOLOGIES FOR ENVIRONMENTAL MONITORING OF ENERGY FACILITIES: SECURITY AND RESILIENCE CHALLENGES OF ENERGY SYSTEMS

Statement of the problem and its relevance. The development of modern energy systems is increasingly influenced by the rapid integration of digital technologies and software-driven control infrastructures. Energy facilities are progressively transforming into complex cyber-physical environments where technological processes are closely connected with information systems, data processing platforms, and automated decision-support tools. In such conditions, software engineering plays a key role in ensuring reliable monitoring, safe operation, and sustainable development of energy infrastructure.

The accident at the Chernobyl Nuclear Power Plant demonstrated the catastrophic consequences that may arise from insufficient monitoring, delayed data processing, and inadequate information management within energy systems [1]. Modern digital technologies create opportunities to prevent similar incidents through the development of advanced monitoring platforms and intelligent information systems.

However, many existing environmental monitoring systems in the energy sector remain fragmented and rely on isolated software tools that lack integration, scalability, and predictive capabilities. Environmental data, operational indicators, and cybersecurity parameters are often processed separately, which reduces the effectiveness of safety management and decision-making.

These challenges highlight the importance of developing integrated software-oriented monitoring architectures capable of combining environmental data acquisition, analytical processing, and risk prediction within unified digital platforms.

Analysis of the latest research. Recent research emphasizes the importance of digital transformation in the energy sector and highlights the growing role of software platforms in managing energy infrastructure [2]. In particular, the use of Internet of Things (IoT) technologies allows continuous acquisition of environmental and operational data from distributed sensor networks installed at energy facilities [3]. Modern data processing systems increasingly rely on cloud computing and Big Data technologies, which enable large-scale data analysis and support predictive maintenance and risk detection mechanisms [4]. At the same time, cybersecurity research focuses on protecting digital energy infrastructures from cyber threats that could compromise monitoring systems and critical operational processes.

Despite significant progress in IoT technologies, data analytics, and cyber-physical system security, existing research often treats these elements separately. There is still a lack of integrated software engineering frameworks designed specifically for environmental safety monitoring in complex energy systems.

Goal formulation. The aim of this research is to analyze modern software engineering approaches used for environmental monitoring of energy facilities and to propose an integrated conceptual model for developing digital monitoring systems that enhance environmental and technological safety.

Main part. Modern environmental monitoring systems for energy facilities can be considered as multi-layer software architectures consisting of several functional components.

The data acquisition layer includes distributed sensor systems that measure environmental indicators such as radiation levels, air and water quality, temperature, and pressure. These sensors act as primary data sources that generate continuous information streams. The communication and data management layer is responsible for secure data transmission through industrial communication networks and internet protocols. At this stage, software mechanisms for encryption, authentication, and data integrity verification are essential to ensure the reliability of monitoring processes. The analytical software layer processes collected information using cloud platforms and data analytics tools. Advanced software modules perform anomaly detection, predictive analysis, and visualization of monitoring results, which significantly improves the ability to detect environmental risks in real time.

Within this research, a conceptual software-oriented framework called Energy Digital Safety Twin is proposed. This model represents a digital representation of an energy facility that integrates environmental monitoring data, operational parameters, and cybersecurity indicators into a unified software environment. Unlike traditional digital twins that focus mainly on equipment maintenance and operational optimization, the Energy Digital Safety Twin emphasizes environmental safety and system resilience. The model continuously updates its state based on incoming data streams and supports predictive analysis of potential environmental risks.

From a software engineering perspective, the proposed approach enables the integration of heterogeneous environmental and operational data within a unified digital platform, the development of scalable cloud-based monitoring architectures, the implementation of predictive analytics for early risk detection, and improved visualization and decision-support tools for operators. Such architectures support the transition from reactive monitoring toward proactive environmental safety management. The scientific contribution of this study is the conceptual development of a software-oriented monitoring framework that integrates environmental data acquisition, digital modeling, and predictive analytics within a unified information system.

The proposed Energy Digital Safety Twin concept demonstrates how software engineering principles can be applied to improve environmental monitoring and risk management in energy infrastructure. From a practical perspective, this approach may serve as a methodological foundation for developing modern monitoring software platforms for nuclear, thermal, and renewable energy facilities. The implementation of such systems can enhance operational transparency, improve environmental safety management, and increase the resilience of digital energy infrastructure.

Conclusions. Modern energy systems require integrated software capable of processing large volumes of environmental and operational data while ensuring reliability and cybersecurity. The proposed Energy Digital Safety Twin framework extends traditional monitoring by combining software engineering, digital modeling, and predictive risk analytics into a unified system. Considering the ongoing digital transformation of the energy sector and lessons from technological disasters such as the Chernobyl accident, such integrated monitoring solutions are essential for improving environmental safety and system resilience.

References:

1. United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation. *Sources and Effects of Ionizing Radiation: UNSCEAR 2008 Report to the General Assembly with Scientific Annexes*. New York: United Nations, 2008.
2. International Energy Agency. *Digitalisation and Energy*. Paris: International Energy Agency, 2017. 160 p.
3. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54, No. 15. P. 2787–2805.
4. Gandomi A., Haider M. Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics. *International Journal of Information Management*. 2015. Vol. 35, No. 2. P. 137–144.

¹ Аспірант 1 курсу Ахмедов М. Ш.

¹ Проф., д.т.н. Федорова Н. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=uRvUNAcAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

АКТУАЛЬНІСТЬ ТА ПРОБЛЕМИ ВИКОРИСТАННЯ ОПЕРАЦІЙНИХ СИСТЕМ РЕАЛЬНОГО ЧАСУ ДЛЯ ПІДТРИМКИ СТАБІЛЬНОСТІ ЕНЕРГОМЕРЕЖ SMART GRID

Постановка проблеми та актуальність дослідження. Динамічне балансування навантаження в Smart Grid у сучасних умовах формується як безпосередня відповідь на глибоку структурну трансформацію енергетичних систем у бік децентралізації, цифровізації та зростаючої неоднорідності режимів споживання й генерації. Локальні дисбаланси виникають значно частіше, ніж це було характерно для класичних централізованих мереж, і розвиваються настільки швидко, що традиційні ієрархічні контури керування не встигають сформувати коректний і своєчасний керувальний вплив.

У таких умовах визначальним стає часовий фактор: навіть незначне відхилення параметрів, якщо воно не компенсоване протягом перших мілісекунд, може спричинити каскадний перерозподіл потоків у суміжних гілках мережі, зростання втрат, перевантаження силових елементів та погіршення якості електроенергії. Отже, критичним є не лише наявність алгоритму балансування, а здатність системи виконати вимірювання, аналіз і компенсацію в межах одного часово узгодженого циклу без накопичення затримок у каналах передачі даних.

Актуальність проблеми зумовлена зростаючою часткою розподіленої генерації, накопичувачів енергії та активних споживачів, які перетворюють кожен сегмент мережі на автономний динамічний об'єкт із власною часовою специфікою. Це потребує впровадження операційних систем режиму реального часу та апаратно-програмних рішень, здатних забезпечити детерміновану реакцію на зміну режимів.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика інтелектуального керування енергосистемами активно розглядається в сучасних дослідженнях. У роботі [1] досліджено використання методів машинного навчання для балансування навантаження в режимі реального часу, що підтверджує тенденцію до цифровізації процесів керування. У публікації журналу [2] проаналізовано інтеграцію сонячної генерації до Smart Grid та окреслено виклики, пов'язані зі швидкоплинністю режимів і необхідністю локального реагування. Дослідження, опубліковані в [3], акцентують увагу на кіберзагрозах та атаках перерозподілу навантаження, що додатково підкреслює важливість детермінованого та захищеного локального керування. Огляд у роботі [4] демонструє потенціал edge- та fog-обчислень для Smart Grid, де рішення приймаються максимально близько до джерела даних. Водночас у [5] розглянуто алгоритми глибинного підкріплювального навчання для керування енергосистемами, однак підкреслено проблему обчислювальних затримок і складності впровадження.

Аналіз літератури свідчить, що більшість сучасних підходів орієнтована на вдосконалення алгоритмічної складової, тоді як питання гарантованої часової реакції на рівні локального вузла розглядається недостатньо комплексно.

Формулювання мети. Обґрунтування доцільності використання операційних систем режиму реального часу для забезпечення детермінованого динамічного балансування навантаження в Smart Grid, а також розроблення архітектурного підходу до побудови локального вузла з використанням мікроконтролера, RTOS та суперконденсаторного буфера енергії.

Основна частина. Розподілена генерація, накопичувачі енергії та активні споживачі фактично перетворюють кожен сегмент мережі на окремий динамічний об'єкт, у якому режим може змінюватися незалежно від загального стану енергосистеми. Домогосподарства з фотоелектричними установками, зарядні станції електромобілів, малі когенераційні установки, локальні накопичувачі – усі ці елементи одночасно можуть виступати як споживачами, так і джерелами енергії. Це означає, що балансування перестає бути суто глобальною задачею й набуває локального характеру, коли кожен вузол повинен мати елементарні засоби автономного реагування. За відсутності таких засобів будь-яка різка зміна режиму на периферії неминуче передається вгору по ієрархії керування, створюючи додаткове навантаження на центральні системи й збільшуючи час реакції. Саме тому виникає необхідність впровадження таких мікроконтролерних платформ, які здатні працювати безпосередньо з вимірювальними даними та формувати керувальні сигнали в масштабі мілісекунд, тобто на рівні, де виникає сам дисбаланс.

Особливістю запропонованого підходу є використання суперконденсаторів як швидкодіючих буферів енергії. На відміну від акумуляторів, які оптимізовані під відносно повільні цикли заряджання-розряджання, суперконденсатори орієнтовані на приймання та віддачу великих імпульсних потужностей за дуже короткий час. У контексті балансування це означає, що система отримує фізичний інструмент згладжування піків, а не лише програмний механізм перерозподілу потоків. Буферна ланка фактично приймає на себе «удар» різкої зміни навантаження, дозволяючи основному джерелу живлення або мережі адаптуватися поступово, без перевантаження силових елементів. Таким чином, частина проблеми балансування вирішується на рівні енергетичної фізики, а не лише на рівні обчислень.

Архітектура локального вузла може бути узагальнено подана як замкнений контур із чітко визначеними ролями компонентів (рис. 1). На рис. 1 вимірювальний блок формує первинні дані про струм, напругу та їх зміну в режимі реального часу, мікроконтролер виконує аналіз і прийняття рішення, силовий тракт реалізує керувальний вплив, а суперконденсатор забезпечує короткочасну енергетичну підтримку. Важливо, що всі ці елементи інтегровані в єдиний програмно-апаратний контур, у межах якого інформаційні та енергетичні потоки тісно пов'язані між собою.

Використання FreeRTOS у такій системі не зводиться до спрощення розробки програмного забезпечення. Операційна система режиму реального часу виконує роль механізму часової дисципліни, який гарантує, що критичні задачі, такі як опитування датчиків, обчислення миттєвої потужності, оцінка швидкості її зміни та формування сигналу на перетворювач, будуть виконані у визначені інтервали, незалежно від поточного навантаження процесора. Це створює детермінований характер керування, коли поведінка системи прогнозована навіть за зростання кількості фонових процесів. Детермінованість у цьому контексті стає не програмною опцією, а фундаментальною властивістю архітектури.

Низькорівневі протоколи комунікації між вузлами забезпечують мінімальні затримки та дозволяють організувати обмін станами без складних мережових стеків. Такий підхід відповідає сучасним fog- і edge-орієнтованим моделям систем Smart Grid, у яких обчислення та прийняття рішень максимально наближені до джерела даних. Взаємодія між вузлами в цьому випадку не спрямована на централізований перерахунок режимів, а забезпечує узгодженість локальних дій: кожен вузол повідомляє про свій стан, а не очікує детальної команди згори.

Крім того, запропонований метод розглядає балансування не як оптимізаційну задачу з великим горизонтом планування, а як інженерну проблему часової синхронізації. Навіть прості алгоритми можуть бути ефективними, якщо вони виконуються вчасно, тоді як складні моделі втрачають практичну цінність за наявності затримок. Тому основна увага приділяється не ускладненню математичного апарату, а забезпеченню гарантованої реакції системи в кожному окремому вузлі.

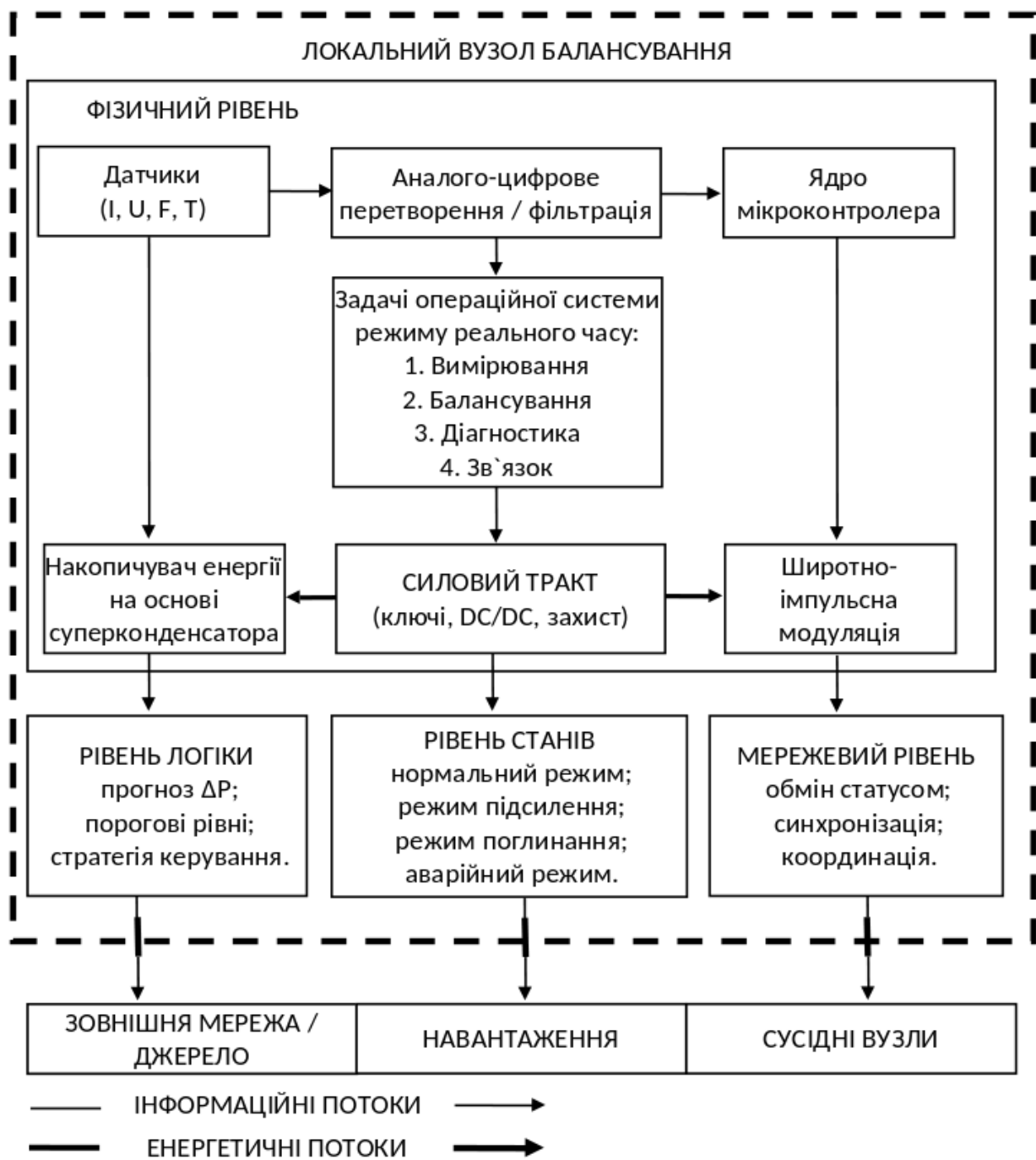


Рисунок 1 – Локальний вузол динамічного балансування навантаження з використанням суперконденсатора як буфера енергії

Таким чином, розширений підхід до динамічного балансування навантаження поєднує програмні та апаратні засоби в єдиний контур, де мікроконтролер, FreeRTOS і суперконденсатор працюють як взаємодоповнювальні елементи. Така конфігурація дозволяє локально гасити короточасні дисбаланси, зменшувати навантаження на силові компоненти, знижувати втрати енергії та підтримувати стабільність параметрів мережі без постійного втручання центрального рівня керування. Саме це створює передумови для подальшого розвитку Smart Grid в умовах зростаючої складності, високої частки розподілених ресурсів і постійного підвищення вимог до надійності та якості електропостачання.

Висновки. Динамічне балансування навантаження в Smart Grid є критично залежним від часових характеристик системи керування. Більшість сучасних досліджень зосереджені на алгоритмічних методах оптимізації, однак недостатньо уваги приділяється детермінованості виконання задач. Використання RTOS, зокрема FreeRTOS, забезпечує гарантовану часову реакцію та підвищує передбачуваність роботи локальних вузлів. Інтеграція суперконденсаторного буфера дозволяє реалізувати фізичне згладжування короткочасних дисбалансів, зменшуючи навантаження на силові елементи. Поєднання програмних і апаратних засобів у єдиному локальному контурі створює передумови для підвищення стійкості та надійності Smart Grid в умовах зростаючої складності та децентралізації енергосистем.

Перелік посилань:

1. Udo W. S., Kwakye J. M., Ekechukwu D. E., Ogundipe O. B. Smart grid innovation: machine learning for real-time energy management and load balancing. *International Journal of Smart Grid Applications*. 2024. Vol. 22, № 4. P. 405–423. DOI: <https://doi.org/10.51594/estj.v4i6.1395>
2. Rajendran G., Raute R., Caruana C. A comprehensive review of solar PV integration with smart-grids: Challenges, standards, and grid codes. *Energies*. 2025. Vol. 18, № 9. P. 2221. DOI: <https://doi.org/10.3390/en18092221>
3. Verma P., Chakraborty C. Load redistribution attacks against smart grids—models, impacts, and defense: A review. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2024. Vol. 20, № 8. P. 10192–10208. DOI: <https://doi.org/10.1109/TII.2024.3393005>
4. Gooi H. B., Wang T., Tang Y. Edge intelligence for smart grid: A survey on application potentials. *CSEE Journal of Power and Energy Systems*. 2023. Vol. 9, № 5. P. 1623–1640. DOI: <https://doi.org/10.17775/CSEEJPES.2022.02210>
5. Li Y., Yu C., Shahidehpour M., Yang T., Zeng Z., Chai T. Deep reinforcement learning for smart grid operations: Algorithms, applications, and prospects. *Proceedings of the IEEE*. 2023. Vol. 111, № 9. P. 1055–1096. DOI: <https://doi.org/10.1109/JPROC.2023.3303358>

¹ Магістрант 1 курсу Войтко Ю. В.

¹ Ст.викл. Бандурка О. І.

<https://scholar.google.com/citations?user=OVJOuJUAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОДЕЛЮВАННЯ СИСТЕМ ПРОСТОРОВОЇ РАДІОПЕЛЕНГАЦІЇ НА БАЗІ БПЛА

Постановка проблеми та її актуальність. Віртуальні персонажі, які ведуть діалог із користувачем, стали невід'ємною частиною багатьох програмних продуктів – від відеоігор до чат-ботів із візуальним аватаром. Однак переконливість такої взаємодії значною мірою залежить від того, наскільки природно персонаж реагує мімікою на зміст розмови. На практиці це залишається проблемою: або аніматор вручну створює вирази для кожної репліки (що дорого та довго), або система підставляє один із кількох заготовлених виразів – «радість», «сум», «злість» – що виглядає штучно і одноманітно.

Особливо гостро ця проблема відчувається у відеоіграх, де може бути кілька тисяч рядків діалогу і фізично неможливо анімувати кожен вручну. Подібна ситуація і з віртуальними асистентами – цифровими аватарами в банках, сервісних центрах чи онлайн-освіті. Без адекватної міміки вони сприймаються як «мертві» і не викликають довіри. При цьому реальні емоції рідко бувають однозначними: людина може одночасно виражати подив і радість, або іронію і скепсис. Просте зіставлення «одна репліка – одна емоція» цього не відображає.

Аналіз останніх досліджень. Задачі розпізнавання емоцій з тексту та анімації обличчя досить добре досліджені окремо, але їх поєднання в єдиний автоматизований конвеєр, що працює в реальному часі, вивчено значно менше. Основна складність полягає у двох моментах. По-перше, типові класифікатори емоцій видають лише одну мітку на вхідний текст, тоді як для правдоподібної міміки потрібно враховувати одночасну присутність кількох емоцій. По-друге, відображення розпізнаної емоції на параметри обличчя зазвичай реалізується через статичні таблиці відповідності, що дає шаблонний і повторюваний результат без плавних переходів.

Для розпізнавання емоцій з тексту найбільш ефективними на сьогодні є моделі на базі архітектури трансформерів. Зокрема, модель RoBERTa [1] є оптимізованим варіантом BERT і показує високі результати на широкому спектрі задач розуміння природної мови. Для тренування класифікатора емоцій у нашій роботі використовується датасет GoEmotions [2], що містить близько 58 тисяч коментарів з Reddit, розмічених за 27 категоріями емоцій та нейтральною міткою. Важлива особливість цього датасету – один текст може мати кілька міток одночасно, що дозволяє моделювати ситуації, коли людина виражає складну комбінацію почуттів. Для опису виразів обличчя у роботі використовується система блендшейпів ARKit [3], що параметризує стан обличчя через 52 числових коефіцієнти. Ця система базується на принципах Facial Action Coding System (FACS), запропонованій Ekman та Friesen [4], де кожен рух обличчя описується через так звані Action Units – окремі дії м'язів. Lewis та ін. [5] у своєму огляді показали, що блендшейпи є основним підходом до реалістичної анімації обличчя у індустрії, і що ними можна керувати програмно через зважені комбінації базових виразів.

Формулювання мети. Мета роботи – розробити систему, яка за текстом репліки діалогу автоматично класифікує емоції з підтримкою кількох емоцій одночасно, перетворює розподіл емоцій у набір коефіцієнтів блендшейпів ARKit та відображає результат на 3D-моделі персонажа в реальному часі.

Основна частина. Запропонований підхід складається з трьох етапів. На першому етапі текст репліки подається на вхід дотренованої моделі RoBERTa, яка виконує

багатоміткову класифікацію і повертає вектор ймовірностей для 28 категорій емоцій. Тобто на виході ми отримуємо не одну мітку, а повний розподіл – наприклад, для фрази «Не може бути, це справді ти?! Скільки років не бачились!» модель може видати високу ймовірність для «подиву» і помірну для «радості».

На другому етапі вектор емоцій відображається на 52 коефіцієнти блендшейпів ARKit. Для кожної з 28 емоцій підготовлений шаблон – набір значень коефіцієнтів, що описує типовий вираз обличчя для цієї емоції. Підсумковий набір коефіцієнтів обчислюється як зважена сума шаблонів, де вагами слугують ймовірності відповідних емоцій. Це дозволяє генерувати змішані вирази – скажімо, поєднання здивованих очей із легкою посмішкою. Для згладжування переходів між послідовними виразами застосовується експоненціальне ковзне середнє. Підбір шаблонів для деяких емоцій виявився непростим завданням: якщо для базових емоцій на кшталт «радості» чи «злості» існують загальноприйняті описи рухів обличчя у рамках FACS [4], то для таких категорій як «вдячність», «цікавість» чи «оптимізм» однозначного зіставлення з м'язами обличчя в літературі немає, тому частину шаблонів було визначено експериментальним шляхом.

На третьому етапі отримані коефіцієнти передаються у модуль візуалізації, де вони застосовуються до 3D-моделі персонажа з підтримкою блендшейп-цілей ARKit. Рендеринг виконується у веб-браузері, що забезпечує доступність системи без встановлення додаткового програмного забезпечення. Модулі системи взаємодіють через мікросервісну архітектуру, що дозволяє розвивати та масштабувати кожен компонент незалежно.

Очікується, що класифікатор емоцій досягне зваженої F1-міри не нижче 0,45 на тестовій вибірці GoEmotions, що відповідає результатам аналогічних моделей. Згенеровані анімації мають демонструвати плавні переходи між виразами та відповідати емоційному контексту діалогу. Затримка від введення тексту до відображення кадру анімації не повинна перевищувати 500 мс, що є прийнятним для інтерактивних застосунків.

Висновки. У роботі запропоновано підхід до автоматичної генерації мімік віртуальних персонажів, який поєднує багатоміткову класифікацію емоцій тексту на основі трансформерної моделі з параметричною анімацією обличчя через блендшейпи ARKit. Ключова відмінність від існуючих рішень – замість дискретного зіставлення «одна емоція – один вираз» використовується безперервне відображення вектора ймовірностей емоцій на простір блендшейп-коефіцієнтів. Це дає змогу генерувати комбіновані вирази обличчя, що краще відображають складну природу людських емоцій у діалозі. Результати роботи можуть бути використані у розробці відеоігор, віртуальних асистентів, освітніх платформ, а також адаптовані для навчальних тренажерів у різних галузях.

Перелік посилань:

1. Liu Y., Ott M., Goyal N. et al. RoBERTa: A Robustly Optimized BERT Pretraining Approach. arXiv preprint arXiv:1907.11692, 2019.
2. Demszky D., Movshovitz-Attias D., Ko J. et al. GoEmotions: A Dataset of Fine-Grained Emotions. Proceedings of the 58th Annual Meeting of the ACL, 2020, pp. 4040–4054.
3. Apple Inc. ARKit Face Tracking. Apple Developer Documentation. URL: <https://developer.apple.com/documentation/arkit/arfaceanchor/blendshapelocation> (дата звернення: 20.02.2026).
4. Ekman P., Friesen W. V. Facial Action Coding System: A Technique for the Measurement of Facial Movement. Consulting Psychologists Press, Palo Alto, CA, 1978.
5. Lewis J. P., Anjyo K., Rhee T., Zhang M., Pighin F., Deng Z. Practice and Theory of Blendshape Facial Models. Eurographics State of the Art Reports, 2014, pp. 199–218.

Магістрант 1 курсу Домненко З. О.

Доц., к.т.н. Шпурик В. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СИСТЕМА ЗБОРУ ТА ЗБЕРЕЖЕННЯ ДАНИХ ДЛЯ РОБОТИ БЕЗПІЛОТНИХ ЗАСОБІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні безпілотні літальні апарати (БПЛА) широко застосовуються у різних галузях діяльності, зокрема у моніторингу територій, інженерних дослідженнях, інфраструктурному контролі та логістиці. У процесі роботи дрон генерує значний обсяг телеметричних даних, які містять інформацію про координати польоту, швидкість, висоту, параметри навколишнього середовища та стан внутрішніх систем апарата.

Зазвичай такі дані використовуються лише для відображення маршруту польоту або ведення журналу польотів. Проте у більшості існуючих систем відсутні інструменти для комплексного аналізу телеметрії та прогнозування можливих сценаріїв руху дрона. Це створює ситуацію, коли оператор отримує лише поточну інформацію, але не має можливості оцінити потенційні ризики або прогнозовані межі польоту.

Додатковою проблемою є вплив зовнішніх факторів, зокрема швидкості та напрямку вітру, які можуть суттєво змінювати траєкторію руху дрона та його фактичну дальність польоту. Більшість систем ігнорують ці фактори або використовують надто спрощені моделі, що призводить до неточних прогнозів.

Актуальність даної проблеми полягає у необхідності створення програмних інструментів, здатних виконувати інтелектуальний аналіз телеметричних даних, оцінювати технічний стан апарата та прогнозувати можливі зони досяжності з урахуванням фізичних параметрів польоту.

Мета дослідження. Метою дослідження є розробка програмної системи для аналізу телеметричних даних безпілотного літального апарата, оцінки технічного стану його агрегатів та прогнозування можливих зон польоту на основі математичних моделей руху.

Основна частина. Аналіз телеметричних даних безпілотних літальних апаратів ґрунтується на використанні методів математичного моделювання, обробки часових рядів та просторового аналізу. Телеметрія містить інформацію про координати, швидкість, висоту польоту, рівень заряду батареї, параметри навколишнього середовища та стан внутрішніх систем дрона. Сукупність цих параметрів формує багатовимірний потік даних, який потребує системного підходу до аналізу та інтерпретації.

Одним із ключових аспектів аналізу є визначення фактичної швидкості переміщення апарата відносно земної поверхні. У реальних умовах польоту на траєкторію руху істотно впливає вітер, який змінює результуючий напрямок і швидкість руху дрона. Для врахування цього фактору використовується модель трикутника швидкостей, що описує взаємодію вектора швидкості дрона у повітряному середовищі та вектора швидкості вітру. Така модель дозволяє визначити результуючу швидкість руху відносно земної поверхні для будь-якого напрямку польоту.

Врахування аеродинамічних факторів дозволяє отримувати більш точне уявлення про можливі межі польоту. На відміну від спрощених моделей, у яких зона досяжності розглядається як коло, реальні умови формують асиметричну область доступних напрямків руху. У випадку руху за напрямком вітру можливе збільшення фактичної дистанції польоту, тоді як політ проти вітру супроводжується зменшенням ефективної швидкості та відповідним скороченням максимальної дальності.

Окремою складовою аналізу є оцінка технічного стану безпілотного апарата. Надійність польоту визначається не лише запасом енергії батареї, але й стабільністю роботи внутрішніх систем. До таких систем належать навігаційні модулі, сенсори інерційної навігації, канали зв'язку та силова установка. Параметри цих компонентів формують набір показників, які можуть використовуватися для визначення рівня ризику під час виконання польоту.

Оцінювання стану агрегатів може здійснюватися на основі порогового аналізу параметрів, коли значення окремих показників порівнюються з допустимими технічними межами. Такий підхід дозволяє своєчасно виявляти відхилення у роботі систем і запобігати потенційним відмовам обладнання. Додатково можливе використання інтегральних показників, які враховують одночасний вплив декількох параметрів та дозволяють формувати узагальнену оцінку технічного стану апарата.

Значну роль у процесі аналізу відіграють геопросторові методи обчислення. Координати польоту зазвичай представлені у географічній системі координат, що потребує застосування спеціалізованих алгоритмів для обчислення відстаней та нових позицій на поверхні Землі. Для таких задач використовуються формули сферичної тригонометрії, які дозволяють визначати координати точки за відомим азимутом і відстанню від початкового положення. Застосування цих формул забезпечує коректність розрахунків навіть на значних дистанціях і запобігає накопиченню помилок, характерних для спрощених лінійних моделей [1].

Поєднання математичних моделей руху, аналізу технічного стану систем та геопросторових обчислень створює основу для комплексного аналізу телеметричних даних безпілотних літальних апаратів. Такий підхід дозволяє не лише інтерпретувати поточні параметри польоту, але й формувати прогностичні оцінки можливих сценаріїв руху та потенційних обмежень експлуатації апарата.

Висновки. Аналіз телеметричних даних безпілотних літальних апаратів потребує використання комплексного підходу, що поєднує математичні методи моделювання руху, аналіз технічного стану агрегатів та геопросторові обчислення. Використання моделі трикутника швидкостей дозволяє враховувати вплив вітру на результуючу швидкість руху дрона та більш точно визначати можливі межі польоту.

Оцінювання технічного стану апарата на основі телеметричних параметрів дає можливість визначати потенційні відхилення у роботі систем та формувати узагальнену оцінку ризику під час виконання польоту. Застосування геопросторових методів розрахунку координат забезпечує коректне відображення результатів аналізу на картографічних сервісах.

Перелік посилань:

1. Anomaly Detection in Unmanned Aerial Vehicle Telemetry Using Automated Machine Learning

URL: https://www.researchgate.net/publication/395679442_Anomaly_Detection_in_Unmanned_Aerial_Vehicle_Telemetry_Using_Automated_Machine_Learning (дата звернення 25.02.2026).

¹ Аспірант 1 курсу Дячук А. О.

¹ Доц., к.т.н. Верлань А. А.

<https://scholar.google.com/citations?user=MT-iHwoAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ ГЕНЕРАТИВНИХ РЕКУРЕНТНИХ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ І МІКРОСЕРВІСНОЇ АРХІТЕКТУРИ ДЛЯ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯМ

Постановка проблеми та її актуальність. Підвищення енергоефективності житлових об'єктів є одним із ключових напрямів розвитку сучасних інтелектуальних систем, оскільки енергоспоживання в розумному будинку формується під впливом багатьох змінних факторів: поведінки мешканців, погодних умов, теплової інерції будівлі, режимів роботи обладнання та випадкових пікових навантажень. За таких умов керування, побудоване лише на фіксованих правилах або статичних розкладах, втрачає ефективність, оскільки не враховує невизначеність майбутнього навантаження та недостатньо швидко адаптується до змін середовища. Саме тому задача розроблення інтелектуальних засобів адаптивного керування енергоспоживанням для систем «розумного будинку» є актуальною як з наукової, так і з прикладної точки зору.

Аналіз останніх досліджень. В останні роки спостерігається суттєвий прогрес у застосуванні моделей машинного навчання для прогнозування навантаження та оптимізації споживання енергії. Систематичний огляд літератури щодо тенденцій, прогалин та майбутніх напрямків досліджень [1] охоплює праці 2018-2024 рр. і показує, що попри активний розвиток HEMS-рішень, напрями demand-side management, а також AI/ML-орієнтовані алгоритми керування все ще залишаються недостатньо опрацьованими. Автори вказують, що сучасні моделі добре розв'язують локальні задачі оптимізації, але не закривають питання повноцінного, гнучкого й стійкого керування з урахуванням поведінкової мінливості та невизначеності.

Водночас праці, присвячені саме прогнозуванню, підтверджують високу ефективність рекурентних нейронних мереж, насамперед ДКЧП (LSTM), для часових рядів енергоспоживання [2]. Розглянута ДКЧП-модель використовує історичні дані споживання, моделі присутності мешканців та погодні фактори. Порівнюючи з лінійною регресією, деревами рішень і random forest, автори отримали найкращі показники якості саме для LSTM-підходу, зокрема високий R^2 та низьку MAE. Це підтверджує доцільність застосування ДКЧП для коротко- і середньострокового прогнозування навантаження.

Невирішеним завданням у межах окресленої проблеми залишається перехід від ізолюваного прогнозування до повноцінного адаптивного керування, у якому прогнозна модель не просто видає одне очікуване значення, а формує множину можливих сценаріїв майбутнього енергоспоживання. У багатьох підходах прогнозування існує окремо від контуру керування та слабо підтримує прийняття стійких рішень при невизначеності. Крім того, залишається відкритим і програмно-архітектурний аспект: навіть якісна ML-модель не забезпечить практичного ефекту без системи, здатної працювати в реальному часі, масштабуватися й залишатися працездатною при часткових відмовах компонентів.

Формулювання мети. Метою дослідження є підвищення точності та оперативності адаптивним керуванням у технології «розумного будинку» за рахунок поєднання сценарного прогнозування на основі довгої короткочасної пам'яті та оптимізованої мікросервісної архітектури програмного забезпечення.

Основна частина. Методична основа дослідження поєднує методи інтелектуального аналізу та прогнозування за допомогою рекурентних нейронних мереж, сценарний аналіз і принципи сервісно-орієнтованого проєктування розподілених систем.

ДКЧП (LSTM) використовується як базова модель для опрацювання часових рядів, оскільки її внутрішня комірка пам'яті та система вентилів дозволяють зберігати релевантний контекст і зменшувати вплив затухання градієнта при навчанні. Для задачі енергоспоживання це особливо важливо, адже навантаження має виражені періодні патерни, залежить від інерційних процесів і містить нерегулярні сплески. На відміну від традиційного детермінованого прогнозу, у запропонованому підході ДКЧП використовується для формування множини можливих траєкторій на заданому горизонті, тобто для сценарного аналізу, що створює основу для стійкішого прийняття рішень з урахуванням ризику пікових навантажень.

Сучасні дослідження підтверджують, що для реальних IoT-сценаріїв важливо поєднувати не лише короткострокове прогнозування, а й контроль аномалій, безпечне розгортання та edge/cloud-компоненти; вказується на прогалину в роботах, де відсутня інтеграція реального прогнозування, захищеного середовища та практичного розгортання [3].

Програмна реалізація запропонованого підходу ґрунтується на мікросервісній архітектурі, яка передбачає структурну декомпозицію системи на сукупність автономних функціональних компонентів із чітко визначеними зонами відповідальності та формалізованими механізмами міжсервісної взаємодії. Така організація програмного забезпечення забезпечує зниження рівня структурної зв'язаності між окремими модулями, підвищує модульність, спрощує супровід і розвиток системи, а також створює передумови для незалежного тестування, оновлення та розгортання її складових.

Однією з ключових переваг мікросервісного підходу є можливість вибіркового масштабування, за якого обчислювальні ресурси перерозподіляються насамперед на найбільш навантажені або критично важливі сервіси без необхідності пропорційного розширення всієї системи. Це є принципово важливим для програмних комплексів, у яких одночасно функціонують обчислювально інтенсивні аналітичні модулі та компоненти, чутливі до часових затримок. Крім того, мікросервісна архітектура сприяє підвищенню відмовостійкості та експлуатаційної надійності, оскільки локалізація можливих збоїв у межах окремих сервісів зменшує ймовірність каскадного порушення працездатності всієї системи. У сукупності маємо поєднання ресурсоемного моделювання з заданими вимогами до оперативності прийняття та реалізації рішень.

Таке архітектурне рішення також узгоджується з сучасними дослідженнями в галузі IoT-систем. Мікросервісна архітектура долає обмеження монолітних систем через декомпозицію на незалежні сервіси, які взаємодіють через механізми зв'язку, що безпосередньо покращує масштабованість і придатність до виконання нефункціональних вимог енергетичних кіберфізичних систем, зокрема щодо доступності, надійності, інтероперабельності та затримки [4].

Крім того, новіші дослідження HEMS-архітектур підтримують поєднання подієвого та мікросервісного підходів. У концептуальній моделі хмарної архітектури HEMS сучасні системи керування домашнім енергоспоживанням мають спиратися не лише на алгоритми, а й на продуману інженерію даних і модульну програмну структуру. Подієво-орієнтовані та мікросервісні рішення забезпечують моніторинг у реальному часі, керування пристроями та інтеграцію із зовнішніми сервісами [5]. Подібно до цього, у дослідженні про застосування мікросервісної архітектури для моніторингу енергоефективності житлових об'єктів прямо вказують на зростання ефективності, керованості та гнучкості систем енергоменеджменту при переході до мікросервісної моделі [6].

Наукова новизна. Запропоноване рішення поєднує три компоненти у межах єдиного контуру керування енергоспоживанням: сценарне прогнозування на базі рекурентної нейронної мережі, ризик-орієнтоване прийняття рішень та мікросервісна

архітектура. На відміну від поширених рішень, де прогнозування виконується як окремий аналітичний модуль, у такому підході модель стає частиною адаптивної системи керування. На відміну від суто правилкових підходів, запропонований метод враховує невизначеність майбутнього навантаження. На відміну від складних DRL-схем, він зберігає кращу практичну впроваджуваність та прозорішу інженерну реалізацію. Це дає підстави розглядати запропонований підхід як збалансований компроміс між адаптивністю, обчислювальною доцільністю та надійністю.

Висновки. Використання методів сценарного прогнозування на основі рекурентних нейронних мереж у поєднанні з мікросервісною архітектурою є ефективним підходом до побудови сучасних систем адаптивного керування енергоспоживанням. Поєднання можливостей інтелектуального аналізу часових рядів із гнучкістю та масштабованістю мікросервісної організації програмного забезпечення дає змогу створювати надійні та функціонально складні системи, здатні оперативно реагувати на зміни навантаження, враховувати невизначеність вхідних даних і забезпечувати ефективніше використання енергоресурсів. Такий підхід відкриває перспективи для практичного впровадження інтелектуальних рішень у системах «розумного будинку» та інших енергоорієнтованих програмно-технічних комплексах.

Перелік посилань:

1. Future of Energy Management Models in Smart Homes: A Systematic Literature Review of Research Trends, Gaps, and Future Directions / U. u. Rehman та ін. *Process Integration and Optimization for Sustainability*. 2025. URL: <https://doi.org/10.1007/s41660-025-00506-x> (дата звернення: 26.02.2026).
2. Mishra A., Lone H. R., Mishra A. DECODE: Data-driven Energy Consumption Prediction leveraging Historical Data and Environmental Factors in Buildings. *Energy and Buildings*. 2024. С. 113950. URL: <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2024.113950> (дата звернення: 26.02.2026).
3. A Secure IIoT Environment That Integrates AI-Driven Real-Time Short-Term Active and Reactive Load Forecasting with Anomaly Detection: A Real-World Application / M. I. Joha та ін. *Sensors*. 2024. Т. 24, № 23. С. 7440. URL: <https://doi.org/10.3390/s24237440> (дата звернення: 26.02.2026).
4. Exploring the Potential of Microservices in Internet of Things: A Systematic Review of Security and Prospects / A. El Akhdar та ін. *Sensors*. 2024. Т. 24, № 20. С. 6771. URL: <https://doi.org/10.3390/s24206771> (дата звернення: 26.02.2026).
5. A cloud architecture for home energy management systems: a conceptual model / L. L. Motta та ін. *Energy Informatics*. 2025. Т. 8, № 1. URL: <https://doi.org/10.1186/s42162-025-00599-1> (дата звернення: 26.02.2026).
6. Design of a microservices-based architecture for residential energy efficiency monitoring / I. Nuñez та ін. *International Journal of Electronics and Telecommunications*. 2024. С. 1089. URL: <https://doi.org/10.24425/ijet.2024.152511> (дата звернення: 26.02.2026).

¹ Аспірант 1 курсу Єрмосін О. О.¹ Проф., д.т.н. Коваль О. В.<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=zI4-oasAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ ТА ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ ПОБУДОВИ, ВЕРИФІКАЦІЇ, ВАЛІДАЦІЇ КЛАСИЧНИХ І НЕЧІТКИХ ОНТОЛОГІЙ У СЕМАНТИЧНОМУ МОДЕЛЮВАННІ МУЛЬТИАГЕНТНИХ СИСТЕМ

Постановка проблеми та актуальність. Критична інфраструктура сьогодні – це енергетика, водопостачання, транспорт, телекомунікації. Це складна мережа систем, що функціонує у динамічному та часто невизначеному середовищі [1]. З початком поєднання кібернетичних та фізичних компонентів з'явилися нові типи вразливостей, де локальний збій в одній підсистемі може миттєво спричинити глобальні каскадні ефекти, що поширюються через логічні, фізичні та кібернетичні зв'язки.

У контексті інженерії програмного забезпечення управління такими системами вимагає переходу від жорстких централізованих алгоритмів до децентралізованих мультиагентних систем та когнітивних архітектур, здатних до автономного прийняття рішень. Онтології можуть стати основою для того, щоб агенти могли працювати разом і «розуміти» контекст ситуації. Однак, їх класичні версії, побудовані на бінарній логіці, є недостатніми для опису невизначеності, притаманної кризовим ситуаціям (наприклад, стани «високий ризик» або «значне перевантаження»). Це зумовлює об'єктивну необхідність використання нечітких онтологій [2].

Аналіз останніх досліджень. Огляд існуючих підходів до семантичного моделювання показує, що класичні онтології широко використовуються для гармонізації термінології та формалізації концептів «Загроза», «Актив», «Вразливість» за допомогою методологій, таких як SaBiO. Для їх розробки використовується інструментарій Protégé, HermiT та сканер OOPS! [3]. Однак, в умовах відмов стан елементів неможливо адекватно описати без втрати критичної інформації, а жорсткі правила часто призводять до помилкових тривог.

Нечіткі онтології допомагають вирішити цю проблему, дозволяючи концептам мати ступінь належності. Методологія Fractal Fuzzy Ontology Modeling забезпечує масштабованість через фрактальні структури та інтеграцію часових міток. Проте, існує суттєвий розрив між наявними методами побудови онтологій та відсутністю ефективних інструментів для їх автоматизованої динамічної верифікації та валідації у системах реального часу. Аналіз наявного програмного забезпечення наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Аналіз існуючих систем

Назва	Тип	Призначення	Виявлені обмеження
Protégé FuzzyOWL [4]	IDE	Проектування базової онтології.	Не підтримує динамічні зміни у процесі моделювання.
FuzzyDL [5]	Reasoner	Основний рушій логічного виводу.	Складність динамічної інтеграції з потоковими даними.

Продовження табл. 1

mOWL [6]	Бібліотека	Інтеграція онтологій з машинним навчанням.	Орієнтована переважно на біомедицину, потребує адаптації.
OOPS!	Сканер	Виявлення помилок моделювання.	Працює виключно зі статичними файлами моделей.

Таким чином, можна зробити висновок, що наявні інструменти є статичними (перевіряють модель лише до запуску в експлуатацію), вимагають ручного втручання експертів в умовах аварій та повністю ізольовані від процесів верифікації поведінки когнітивних агентів. До того ж, застосування новітніх автономних агентів на базі великих мовних моделей вносить критичну проблему недетермінованості та «галюцинацій», що потребує впровадження спеціальних механізмів семантичного контролю [7]. Головне питання, яке досі не вирішене – це забезпечення надійності таких систем. Для цього можна використати динамічну нечітку онтологію, яка повинна оновлюватися та верифікуватися безпосередньо під час кризової ситуації.

Формулювання мети. Метою дослідження є створення гібридного механізму динамічної верифікації та валідації нечітких онтологій у когнітивних мультиагентних системах управління критичною інфраструктурою. Цей механізм має поєднувати формальну верифікацію для гарантування безпеки та потокову валідацію для виявлення розбіжностей між онтологічною моделлю та даними сенсорів у реальному часі. Інструментарій повинен бути інтегрований у цикл прийняття рішень когнітивних агентів як «семантичний запобіжник».

Основна частина. Для вирішення поставленої проблеми на етапі концептуального моделювання запропоновані наступні методи.

1. Удосконалення методу побудови нечітких онтологій шляхом введення фрактальних темпоральних шаблонів, що дозволить автоматизувати опис самоподібних структур енергомереж та їхньої динаміки в часі.

2. Розробка алгоритму інкрементної верифікації, що дозволить при отриманні нових даних від сенсорів перевіряти лише змінені підграфи онтології, а не весь граф цілком. Це дозволить кардинально знизити обчислювальне навантаження та забезпечити швидкодію в режимі реального часу.

3. Впровадження онтологічно-керованих обмежень, що перевіряють рішення генеративних агентів на відповідність безпековим правилам (зафіксованим в онтології) перед їх виконанням на фізичному рівні.

4. Валідація через симуляцію, що може бути реалізована за допомогою підключення онтології до зовнішніх симуляторів для порівняння семантичних передбачень агента з результатами об'єктивного фізичного моделювання.

На поточному етапі розроблено концептуальну архітектуру гібридної системи верифікації та валідації. Замість традиційного підходу, де онтологія є лише пасивним словником, архітектура передбачає, що вона виступатиме «контрольним шаром», який керує симуляцією та інтерпретує її результати для агентів. Планується реалізація окремого модуля «Fuzzy Validator», що працює як мікросервіс і може бути безпосередньо інтегрований у популярні фреймворки розробки (наприклад, JADE або SPADE). Цей модуль забезпечить безперервну валідацію, виявляючи аномалії до того, як хибні рішення агентів призведуть до поглиблення каскадної аварії.

Висновки. Перехід від статичного опису інфраструктури до динамічних, самоверифікованих семантичних моделей є необхідним кроком для створення надійних автономних систем захисту критичної інфраструктури. Наукова новизна отриманих концептуальних результатів полягає у розробці методу інкрементної верифікації нечітких онтологій, який аналізує лише змінені підграфи, а також в удосконаленні методу побудови нечітких онтологій через впровадження фрактальних темпоральних шаблонів. Практичне

значення проведеного дослідження полягає в тому, що його результати мають стати основою програмного фреймворку, який дозволить інженерам створювати надійні системи управління енергетикою та іншими галузями. Завдяки цьому створювані системи стануть більш стійкими до каскадних відмов.

Перелік посилань

1. A domain ontology on cascading effects in critical infrastructures based on a systematic literature review / B. Toscano та ін. *International Journal of Critical Infrastructures*. 2022. Т. 18, № 1. С. 79.
2. Ontology Modeling Using Fractal and Fuzzy Concepts to Optimize Metadata Management. URL: <https://www.mdpi.com/2076-3417/15/13/7193> (дата звернення: 22.02.2026).
3. Poveda-Villalón M., Gómez-Pérez A., Suárez-Figueroa M.C. OOPS! (OntOlogy Pitfall Scanner!). *International Journal on Semantic Web and Information Systems*. 2014. Т. 10, № 2. С. 7–34.
4. FuzzyOWL2: Fuzzy Ontology Representation using OWL2. URL: <http://www.umbertostraccia.it/cs/software/FuzzyOWL/> (дата звернення: 22.02.2026).
5. Bobillo F., Straccia U. FuzzyDL: An Expressive Fuzzy Description Logic Reasoner. *2008 IEEE 16th International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE)*, м. Гонконг, 1–6 черв. 2008 р.
6. mOWL: Python library for machine learning with biomedical ontologies. PMC. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC9848046/> (дата звернення: 22.02.2026).
7. Prioritizing Real-Time Failure Detection in AI Agents. Partnership on AI. URL: <https://partnershiponai.org/wp-content/uploads/2025/09/agents-real-time-failure-detection.pdf> (дата звернення: 22.02.2026).

¹ Аспірант 1 курсу Єрмосіна О. О.¹ Проф., д.т.н. Коваль О. В.<https://scholar.google.com/citations?hl=uk&user=zI4-oasAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ І ПРОГРАМНЕ ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СИНТЕЗУ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ СЦЕНАРІЇВ У ПРОЦЕСІ СЕМАНТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ВАРІАНТНОСТІ РОЗВИТКУ ПОДІЙ ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ ІІІ

Постановка проблеми та актуальність. Сучасні енергетичні системи та об'єкти критичної інфраструктури характеризуються високим рівнем взаємозалежності, складністю структури та наявністю нелінійних причинно-наслідкових зв'язків. Порушення в одному елементі системи можуть спричинити каскадні ефекти, що призводять до збоїв у функціонуванні інших підсистем. У таких умовах особливої актуальності набувають методи сценарного аналізу, які дозволяють досліджувати можливі варіанти розвитку подій та оцінювати їх наслідки.

Існуючі підходи до моделювання та аналізу каскадних ефектів базуються переважно на імітаційному моделюванні, системній динаміці, аналізі ризиків або експертних оцінках. Вони дозволяють досліджувати окремі аспекти функціонування систем, однак здебільшого не забезпечують формалізованого представлення знань і не підтримують синтез нових сценаріїв. З іншого боку, сучасні системи штучного інтелекту орієнтовані на статистичне навчання на великих масивах даних, що є проблематичним у сфері критичних інфраструктур через обмеженість вибірок і необхідність інтерпретованості результатів.

Таким чином, актуальною є розробка методів і програмного забезпечення, які поєднують процесне моделювання, семантичне представлення знань та алгоритми штучного інтелекту для автоматизованого синтезу й прогнозування сценаріїв розвитку подій.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз наукових джерел, присвячених онтологічному моделюванню знань [1], сценарному аналізу каскадних ефектів [2] і архітектурам платформ моделювання взаємозалежностей [3], показує, що дослідження охоплюють окремі складові проблеми: формалізацію знань, імітаційне моделювання або аналіз ризиків. У роботах щодо систем сценарного моделювання захищеності об'єктів критичної інфраструктури [4] запропоновано knowledge-based підходи до формування сценаріїв, проте відсутня інтеграція з процесними моделями типу BPMN [5] та механізмами прогнозування варіантності розвитку подій. Існуючі BPMN-орієнтовані платформи автоматизації процесів забезпечують виконання сценаріїв, але не враховують їх семантичну узгодженість із моделлю предметної області та не підтримують автоматичний синтез нових сценаріїв. У табл. 1 наведено аналіз існуючих систем, що містять компоненти моделювання або виконання сценаріїв, семантики, методів штучного інтелекту.

Таблиця 1 – Аналіз існуючих систем

Система	Призначення	Сценарне моделювання	Семантичні моделі	ІІІ / прогнозування	Виконання процесів
Camunda [6], Bizagi [7], IBM BPM [8], Signavio [9]	Виконання BPMN-процесів	так	ні	ні	так

Продовження табл. 1

CAESAR [10]	Аналіз каскадних ефектів критичної інфраструктури	так	ні	частково	ні
Інтелектуальна система ПІММС	Сценарний аналіз об'єктів критичної інфраструктури	так	ні	так	ні
ETMA [11]	Аналіз дерева подій	так	ні	імовірнісне	ні
Vensim [12]	Системна динаміка	так	ні	симуляційне	ні
Запропонована система	Синтез і прогнозування сценаріїв	так	так	так	так

Отже, невирішеним залишається завдання інтеграції онтологічного семантичного моделювання, процесних моделей та інтелектуальних алгоритмів у єдину технологію автоматизованого синтезу та прогнозування сценаріїв розвитку каскадних ефектів.

Формулювання мети. Метою дослідження є підвищення ефективності аналізу, синтезу та прогнозування сценаріїв розвитку каскадних ефектів у складних системах за рахунок використання семантичного моделювання та інтелектуальних методів обробки знань.

Основна частина. Основна наукова ідея полягає в інтеграції трьох взаємодоповнюючих складових: структурної, семантичної та інтелектуальної.

Структурна складова базується на використанні нотації BPMN для формального опису сценаріїв розвитку подій. Процесні моделі дозволяють задавати послідовність подій, альтернативні гілки розвитку та взаємодію підсистем.

Семантична складова передбачає побудову онтології предметної області, яка формалізує поняття, типи об'єктів, ресурси, залежності та причинно-наслідкові зв'язки. Для цього використовуються підходи онтологічного інжинірингу та логічного виведення.

Інтелектуальна складова передбачає застосування алгоритмів машинного навчання для прогнозування розвитку подій. Планується використання методів аналізу послідовностей та генеративних підходів для оцінювання можливих варіантів продовження сценарію. На відміну від класичних ML-підходів, алгоритми мають бути інтегровані з онтологічними обмеженнями, що забезпечить логічну коректність прогнозів.

У межах дослідження передбачається формалізація методу автоматизованого синтезу сценаріїв на основі поєднання BPMN-моделей, онтологічних правил і даних про функціонування системи.

Очікувані результати та наукова новизна

Наукова новизна полягає у:

- 1) розробленні семантичної моделі каскадних ефектів критичних інфраструктур на основі онтологій;
- 2) формалізації методу синтезу сценаріїв із урахуванням логічних обмежень предметної області;
- 3) розробленні підходу до прогнозування варіантів розвитку подій на основі поєднання семантики та алгоритмів машинного навчання;
- 4) обґрунтуванні інтегрованої технології, що поєднує онтології, процесне моделювання та штучний інтелект.

Очікується, що запропоновані методи можуть бути використані для підтримки прийняття рішень у сфері управління ризиками критичних інфраструктур, аналізу

надзвичайних ситуацій, а також при розробленні інтелектуальних систем моніторингу та прогнозування.

Висновки. Запропонований підхід спрямований на подолання обмежень існуючих інструментів сценарного аналізу шляхом інтеграції семантичного моделювання та алгоритмів штучного інтелекту. Поєднання онтологій, BPMN і методів штучного інтелекту створює передумови для переходу від ручного формування сценаріїв до їх автоматизованого синтезу та прогнозування. Це відкриває можливості підвищення обґрунтованості рішень і стійкості критичних інфраструктур в умовах складних каскадних ефектів.

Перелік посилань

1. Додонов О. Г., Сенченко В. Р., Коваль О. В. Аналітика та знання в комп'ютерних системах : монографія. Київ : ІПРІ НАН України, 2025. 326 с.
2. Сенченко В. Р., ін. Огляд методів і технологій сценарного аналізу каскадних ефектів. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2024. Т. 26, № 1. С. 24–54.
3. Сенченко В. Р., ін. Методологія та архітектура платформи моделювання взаємозалежностей у критичних інфраструктурах при виникненні каскадних ефектів. *Реєстрація, зберігання і обробка даних*. 2025. Т. 27, № 1. С. 28–41.
4. Гречанінов В. Інтелектуальна система сценарного моделювання оцінки захищеності об'єктів критичної інфраструктури. *Технічні науки та технології*. 2025. № 3. С. 131–145.
5. Walters E. Using BPMN to Model Business Processes: Handbook for Practitioners. Independently Published, 2020. 221 с.
6. The Universal Process Orchestrator. Camunda. URL: <https://camunda.com/> (дата звернення: 22.02.2026).
7. Bizagi Modeler. URL: <https://www.bizagi.com/en/platform/modeler> (дата звернення: 22.02.2026).
8. IBM Business Process Manager. International Business Machines Corporation. URL: <https://www.ibm.com/docs/en/bpm/8.6.0?topic=manager-business-process-overview> (дата звернення: 22.02.2026).
9. SAP Signavio. Business Process Transformation Suite. URL: <https://www.signavio.com/> (дата звернення: 22.02.2026).
10. Analysis of the cascade effects in supply networks – software tool CAESAR. Fraunhofer EMI. URL: <https://www.emi.fraunhofer.de/en/business-units/security/research/analysis-of-the-cascade-effects-in-supply-networkssoftwaretool-c.html> (дата звернення: 22.02.2026).
11. ETMA: A New Software for Event Tree Analysis with Application to Power Protection. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2006.12383> (дата звернення: 22.02.2026).
12. Ventana Systems. URL: <https://vensim.com/> (дата звернення: 22.02.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Кравчук І. В.

¹ Асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОНТЕЙНЕРНІ ТЕХНОЛОГІЇ ЯК ІНСТРУМЕНТ РОЗШИРЕННЯ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ КОРПОРАТИВНИХ ХМАРНИХ ПЛАТФОРМ

Постановка проблеми та її актуальність. Цифрова трансформація енергетичної галузі зумовлює зростання ролі корпоративних хмарних платформ, які використовуються для інтеграції інформаційних систем, обробки технологічних та бізнес-даних, автоматизації розрахунків і підтримки управлінських рішень. Сучасні хмарні платформи, зокрема корпоративного рівня, надають широкий набір стандартних сервісів, однак їх функціональні можливості не завжди повністю відповідають специфічним вимогам прикладних задач енергетики, таких як періодична обробка даних, фонові обчислення, інтеграція з застарілими системами або виконання допоміжних технічних процесів. Крім того, використання стандартних керованих сервісів може бути економічно необґрунтованим у випадках, коли їх функціональність значно перевищує реальні потреби конкретного проекту. У цьому контексті актуальним є застосування контейнерних технологій як універсального інструменту розширення функціональних можливостей корпоративних хмарних платформ, що забезпечує гнучкість архітектури, зниження витрат на експлуатацію та можливість швидкої адаптації програмних рішень до прикладних задач енергетичної галузі [1].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері хмарних обчислень і контейнеризації підтверджують доцільність використання контейнерних технологій для побудови масштабованих і керованих інформаційних систем. У роботі [1] проаналізовано вплив контейнеризованих середовищ на ефективність використання ресурсів та енергоспоживання, що є важливим для оптимізації витрат у корпоративних системах. Дослідження [2] присвячені питанням безпеки контейнерних платформ і механізмам мінімізації ризиків у розподілених хмарних середовищах. Водночас економічна доцільність застосування контейнерних розширень у корпоративних хмарних платформах прикладного рівня потребує додаткового обґрунтування.

Формулювання мети. Метою даного дослідження є обґрунтування доцільності застосування контейнерних технологій для розширення функціональних можливостей корпоративних хмарних платформ шляхом аналізу архітектурних особливостей, практичних сценаріїв використання та економічної ефективності такого підходу.

Основна частина. Корпоративні хмарні платформи забезпечують базову інфраструктуру для розробки, розгортання та експлуатації прикладних інформаційних систем, що використовуються в енергетичній галузі. Вони виконують роль інтеграційного та обчислювального шару між виробничими, обліковими й аналітичними системами, забезпечуючи обробку даних, автоматизацію розрахунків і підтримку управлінських рішень. Однією з таких платформ є SAP Business Technology Platform (SAP BTP), яка поєднує засоби інтеграції, обробки даних, аналітики та розширення функціональних можливостей корпоративних систем [3].

Платформа SAP BTP надає значну кількість стандартних керованих сервісів, орієнтованих на типові бізнес-сценарії, які доступні через централізований каталог рішень [4]. Водночас у практичних проектах, зокрема в інформаційних системах енергетики, часто виникають задачі допоміжного або технічного характеру, такі як періодична обробка даних, фонові перевірки, підготовка звітів, виконання пакетних

розрахунків або інтеграція з застарілими системами. Реалізація таких задач із використанням керованих сервісів платформи може бути надмірно складною або економічно недоцільною, особливо у випадках низької частоти виконання або обмеженої складності логіки.

У межах SAP BTP широко застосовується середовище виконання Cloud Foundry (CF), яке реалізує модель платформи як сервісу та підтримує розгортання застосунків у вигляді ізольованих компонентів [3]. Особливістю цього середовища є відсутність власного реєстру контейнерних образів, що зумовлює використання зовнішніх репозиторіїв для зберігання та постачання контейнерів. Такий підхід дозволяє інтегрувати хмарну платформу з існуючими процесами безперервної інтеграції та розгортання, а також повторно використовувати контейнерні образи в різних проєктах і середовищах без прив'язки до конкретної платформи.

Розгортання контейнеризованих застосунків у середовищі CF має низку технічних особливостей. Застосунок описується за допомогою конфігураційного файлу manifest.yml, у якому визначаються параметри пам'яті, дискового простору, кількість екземплярів і змінні середовища. Контейнер запускається як окремий застосунок CF, а платформа автоматично забезпечує маршрутизацію HTTP-запитів, централізоване логування та базові механізми масштабування. Конфігурація застосунку передається через змінні середовища та механізми прив'язки сервісів, що спрощує управління параметрами без зміни контейнерного образу. Попри певні обмеження, зокрема відсутність прямого доступу до рівня операційної системи та обмежений контроль мережевих налаштувань, CF надає стабільне та кероване середовище, придатне для розгортання технічних і сервісних контейнерів.

Показовим прикладом застосування контейнерних технологій є реалізація періодичних фонових завдань. У SAP BTP для цього передбачено стандартний сервіс планування завдань SAP Job Scheduling Service, який надає готовий механізм запуску задач за розкладом [4]. Водночас сервіс має низку технічних обмежень, зокрема мінімальний інтервал виконання завдань становить п'ять хвилин, а також встановлені обмеження на час виконання синхронних і асинхронних запитів.

Для задач, які потребують частішого запуску або складнішої логіки, доцільним є використання власного контейнерного рішення з планувальником завдань на рівні операційної системи. Такий підхід забезпечує повний контроль над середовищем виконання, що підтверджується сучасними дослідженнями у сфері контейнеризованих хмарних систем [1, 2].

Функціональне порівняння двох підходів наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння реалізації періодичних фонових завдань

Критерій	Сервіс планування завдань SAP	Контейнер з планувальником завдань
Швидкість старту	Висока	Висока
Гнучкість логіки	Обмежена інтерфейсом сервісу	Повна
Контроль середовища виконання	Обмежений	Повний
Інтеграція з процесами розробки	Часткова	Повна
Складність супроводу	Низька	Середня

Для оцінки економічної ефективності розглянемо сценарій, у якому періодичне фонове завдання виконується щохвилини в робочий час та кожні п'ять хвилин у неробочий і святковий час. Для розрахунків приймемо типовий місяць тривалістю 30 днів, з яких 22 дні є робочими, а тривалість робочого часу становить 8 годин на добу.

Загальна кількість хвилин у місяці становить 43 200. Кількість хвилин у робочий час дорівнює 10 560, у неробочий – 32 640. Таким чином, кількість запусків завдання за місяць становить 10 560 у робочий час та 6 528 у неробочий час, тобто 17 088 запусків на місяць.

Стандартний сервіс планування завдань корпоративної хмарної платформи тарифікується за кількістю запусків, що обліковуються блоками по 10 000. За такого навантаження необхідно два тарифні блоки, що відповідає вартості близько 28 євро на місяць. При цьому слід враховувати технічне обмеження сервісу щодо мінімального інтервалу запуску, який становить п'ять хвилин, що унеможливорює безпосередню реалізацію сценарію з щохвилинним виконанням без додаткових обхідних рішень [4].

Альтернативним підходом є використання власного контейнерного застосунку з планувальником завдань, розгорнутого в середовищі CF. У цьому випадку вартість експлуатації визначається обсягом виділених обчислювальних ресурсів. Практична реалізація показує, що контейнер із планувальником завдань може стабільно працювати з обсягом оперативної пам'яті 32 МБ. За умови, що вартість 1 ГБ оперативної пам'яті у середовищі виконання становить приблизно 85 євро на місяць [4], пропорційна вартість контейнерного рішення складає близько 2,7 євро на місяць.

Узагальнене порівняння технічних та економічних характеристик двох підходів наведене в табл. 2.

Таблиця 2 – Порівняння підходів до реалізації періодичних фонових завдань

Параметр	Сервіс планування завдань	Контейнер з планувальником завдань
Сценарій запуску	~17 000 виконань/місяць	
Модель тарифікації	За кількістю виконань	За споживанням пам'яті
Мінімальні технічні обмеження	Інтервал ≥ 5 хв	Відсутні
Споживання пам'яті	Не застосовується	32 МБ
Орієнтовна вартість, євро/місяць	~28	~2,7

Наведене порівняння свідчить про те, що контейнерний підхід до реалізації періодичних фонових завдань дозволяє усунути низку технічних обмежень стандартних сервісів і забезпечує помітну економічну перевагу, що обґрунтовує його доцільність для використання в корпоративних хмарних платформах.

Висновки. У результаті проведеного дослідження встановлено, що застосування контейнерних технологій є ефективним інструментом розширення функціональних можливостей корпоративних хмарних платформ. Контейнерні програмні розширення забезпечують гнучкість архітектурних рішень, спрощують процес розгортання та супроводу прикладних застосунків, а також дозволяють оптимізувати витрати на експлуатацію хмарної інфраструктури. Використання контейнерів у середовищі платформи як сервісу, зокрема на прикладі корпоративних хмарних платформ, є доцільним для реалізації допоміжних і технічних задач, характерних для інформаційних систем енергетичної галузі. Запропонований підхід сприяє підвищенню адаптивності та масштабованості цифрових рішень і може бути рекомендований для практичного впровадження в сучасних корпоративних інформаційних системах.

Перелік посилань:

1. Centofanti C., Santos J., Gudepu V., Kondepu K. Impact of power consumption in containerized clouds: A comprehensive analysis of open-source power measurement tools // Computer Networks. – 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2024.110371>.
2. Devi Priya V. S., Sibi Chakkaravarthy Sethuraman, Muhammad Khurram Khan. Container security: Precaution levels, mitigation strategies, and research perspectives // Computers & Security. – 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2023.103490>.
3. “SAP Business Technology Platform: Integration and Application Development Guide.” URL: <https://www.sap.com/products/business-technology-platform.html> (дата звернення 29.01.2026).
4. “SAP Discovery Center”. URL: <https://discovery-center.cloud.sap> (дата звернення 30.01.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Перебийніс М. В.

¹ Асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЦИФРОВИЙ ДВІЙНИК ERP-СИСТЕМИ ЯК АНАЛІТИЧНИЙ КОНТУР ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ СТІЙКОСТІ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПІДПРИЄМСТВ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні енергетичні підприємства функціонують в умовах підвищеної невизначеності, кіберзагроз, техногенних ризиків та дестабілізації інфраструктури, що актуалізує проблему забезпечення стійкості не лише фізичних об'єктів, але й інформаційних систем управління.

Ключовим елементом цифрової інфраструктури підприємства є ERP-система, яка інтегрує фінансові, виробничі, логістичні та ремонтні процеси в єдиному середовищі управління. Порушення її функціонування або некоректна оцінка стану бізнес-процесів можуть призвести до управлінських помилок, втрат ресурсів та зниження операційної ефективності. Традиційні підходи до адміністрування ERP-систем базуються переважно на технічному моніторингу продуктивності, аудиті транзакцій та ретроспективній аналітиці, що не забезпечує можливості прогнозування наслідків змін або сценарного моделювання управлінських рішень.

У контексті підвищення стійкості енергетичних підприємств виникає потреба у формуванні додаткового аналітичного контуру, здатного відображати динаміку бізнес-процесів, інтеграційні взаємозв'язки та поведінку системи в умовах змінного навантаження. Одним із перспективних напрямів є застосування концепції цифрового двійника, яка передбачає створення динамічної моделі об'єкта з можливістю аналізу та прогнозування його стану на основі актуальних даних [1]. Таким чином, актуальним є обґрунтування підходу до формування цифрового двійника ERP-системи як інструменту забезпечення інформаційної та управлінської стійкості енергетичного підприємства.

Аналіз останніх досліджень. У наукових дослідженнях концепція цифрового двійника активно застосовується для моделювання фізичних об'єктів інфраструктури, енергетичних мереж, виробничого обладнання та кіберфізичних систем [2, 3], зокрема в контексті стандартизації та формування єдиних підходів до їх реалізації [4].

Значна частина робіт присвячена використанню сенсорних даних, IoT-технологій та предиктивної аналітики для підвищення надійності технічних систем. Окремі дослідження розглядають цифрові двійники бізнес-процесів як інструмент процесного дослідження та оптимізації організаційної діяльності із застосуванням методів опрацювання журналів подій та машинного навчання [5].

Водночас ERP-системи у більшості публікацій трактуються як джерело даних або як складова цифрової трансформації підприємства, а не як самостійний об'єкт цифрового моделювання [5]. Питання формування цифрового двійника інформаційного контуру підприємства, який би відображав поведінку бізнес-процесів, транзакційні потоки та інтеграційні зв'язки ERP-ландшафту, залишаються недостатньо опрацьованими. Особливо актуальною є ця проблема в умовах гібридних IT-архітектур, де поєднуються локальні та хмарні компоненти системи. Отже, існує наукова прогалина щодо концептуального обґрунтування цифрового двійника ERP-системи як аналітичного контуру забезпечення стійкості підприємства.

Формулювання мети. Метою роботи є обґрунтування концепції цифрового двійника ERP-системи як аналітичного контуру забезпечення стійкості енергетичних підприємств шляхом аналізу існуючих підходів до цифрового моделювання, визначення

структурних складових цифрового двійника інформаційного контуру, формалізації його рівнів (даних, бізнес-процесів, аналітики та прогнозування) та окреслення можливостей сценарного моделювання і підтримки управлінських рішень в умовах ризиків і невизначеності.

Основна частина. У межах запропонованого підходу цифровий двійник ERP-системи розглядається як аналітичний контур, що відображає структуру, стан та динаміку функціонування інформаційної системи підприємства без втручання у її продуктивне середовище. На відміну від традиційного моніторингу, цифровий двійник передбачає формування інтегрованої моделі, здатної не лише фіксувати поточні показники, а й здійснювати сценарне моделювання та прогнозування наслідків змін.

Об'єктом моделювання виступає не окремий технічний компонент ERP, а сукупність взаємопов'язаних елементів: бізнес-процеси, транзакційні потоки, довідникові структури, ролі користувачів, інтеграційні інтерфейси та часові параметри виконання операцій. Таким чином, цифровий двійник ERP-системи формує динамічне відображення поведінки інформаційного контуру підприємства.

Структурно модель цифрового двійника ERP доцільно представити як багаторівневу систему, що включає:

1. Рівень даних (D) – транзакційні записи, журнали подій, показники продуктивності, довідникові структури.
2. Процесний рівень (P) – формалізовані бізнес-процеси та їхні зв'язки.
3. Інтеграційний рівень (I) – взаємодія ERP з зовнішніми системами та сервісами.
4. Аналітико-прогнозний рівень (A) – алгоритми оцінювання стану, сценарного моделювання та прогнозування.

Узагальнено цифровий двійник ERP-системи можна представити у вигляді функціональної моделі:

$$DT_{ERP}(t) = F(D(t), P(t), I(t), A), \quad (1)$$

де $DT_{ERP}(t)$ – стан цифрового двійника в момент часу t ;

$D(t)$ – множина актуальних даних системи;

$P(t)$ – конфігурація та динаміка бізнес-процесів;

$I(t)$ – стан інтеграційних взаємодій;

A – аналітичний апарат оцінювання та прогнозування;

F – оператор відображення станів ERP у простір узагальнених показників стану цифрового двійника.

Для формалізованого оцінювання рівня стійкості підприємства доцільно визначити відповідний функціонал:

$$R = \Phi(DT_{ERP}(t), \Theta), \quad (2)$$

де R – інтегральний показник стійкості інформаційного контуру;

Θ – множина зовнішніх і внутрішніх збурень (навантаження, відмови, зміни конфігурацій, кіберінциденти);

Φ – оператор оцінювання впливу збурень на стан системи.

Модель має концептуальний характер і передбачає подальшу математичну конкретизацію функцій F та Φ . У подальших дослідженнях передбачається формалізація метрик процесної інерційності, транзакційної щільності, інтеграційної залежності та їх впливу на інтегральний показник R ERP-системи.

Таким чином, цифровий двійник ERP-системи розглядається як узагальнена динамічна модель інформаційного середовища підприємства, що створює передумови для переходу від реактивного управління до прогнозно-орієнтованого забезпечення операційної надійності енергетичних підприємств.

Висновки. У роботі обґрунтовано доцільність розгляду ERP-системи енергетичного підприємства як об'єкта цифрового двійника та запропоновано концепцію її функціонування як окремого аналітичного контуру забезпечення стійкості. Наукова новизна полягає у формалізації цифрового двійника ERP-системи у вигляді функціональної моделі, що поєднує рівень даних, бізнес-процесів, інтеграцій та аналітичного апарату в єдину динамічну структуру. Запропоновано узагальнену модель стану цифрового двійника в момент часу, яка створює методологічну основу для подальшого математичного уточнення функцій переходу станів та метрик стійкості. На відміну від традиційного моніторингу, запропонований підхід орієнтований не лише на фіксацію параметрів, а на моделювання поведінки системи та оцінювання впливу збурень на її функціонування.

Практичне значення результатів полягає у можливості застосування цифрового двійника ERP для сценарного моделювання змін, прогнозування наслідків збоїв та підтримки управлінських рішень без втручання у продуктивний контур системи. Використання запропонованого підходу сприятиме підвищенню прозорості управління, зниженню ризиків каскадних відмов та формуванню прогнозно-орієнтованої моделі забезпечення стабільності функціонування енергетичних підприємств в умовах невизначеності та зовнішніх загроз. Подальші дослідження можуть бути спрямовані на конкретизацію математичного апарату оцінювання та апробацію моделі в реальному ERP-ландшафті.

Перелік посилань:

1. Rosen R., von Wichert G., Lo G., Bettenhausen K. D. About the importance of autonomy and digital twins for the future of manufacturing // IFAC-PapersOnLine. 2015. Vol. 48, No. 3. P. 567–572. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.141.
2. Fuller A., Fan Z., Day C., Barlow C. Digital twin: enabling technologies, challenges and open research // IEEE Access. 2020. Vol. 8. P. 108952–108971. DOI: 10.1109/ACCESS.2020.2998358.
3. Tao F., Qi Q., Liu A., Kusiak A. Data-driven smart manufacturing // Journal of Manufacturing Systems. 2018. Vol. 48, Part C. P. 157–169. DOI: 10.1016/j.jmsy.2018.01.006.
4. Пупена О. М., Клименко О. М., Полупан В. В., «Систематизація ключових стандартів для цифрових двійників у промисловому виробництві», Наукові вісті КПП, № 3, с. 60–73, 2025. DOI: <https://doi.org/10.20535/kpism.2025.3.337306>.
5. Семененко Ю. С. Цифровий двійник бізнес-процесів як інтелектуальна система управління // Наукові записки НУ «Острозька академія». Серія Економіка. 2025. Vol. 38 (66). P. 99–106. DOI: 10.25264/2311-5149-2025-38(66)-99-106.

¹ Магістрант 1 курсу Поліщук В. В.

¹ Доц., к.ф.-м.н. Свинчук О. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=5SMpj8cAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЕВОЛЮЦІЯ РОЗВИТКУ СИСТЕМ ІНФОРМАЦІЙНОГО СУПРОВОДУ АБІТУРІЄНТІВ: ВІД ДЕТЕРМІНОВАНИХ ЧАТ-БОТІВ ДО ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ АСИСТЕНТІВ НА БАЗІ RAG-АРХІТЕКТУРИ

Постановка проблеми та її актуальність. Щороку тисячі абітурієнтів стикаються з необхідністю вибору майбутньої професії та навчального закладу. Цей процес вважається одним із найважливіших етапів у житті людини, адже саме від нього значною мірою залежить подальший професійний та особистий розвиток. Разом з тим, він супроводжується великим обсягом інформації, яку потрібно зібрати, проаналізувати і засвоїти. Сучасні технології відкривають нові можливості для автоматизації процесу інформаційного супроводу абітурієнтів. Одним із ефективних рішень є використання чат-ботів – програм, які імітують живе спілкування з користувачами та можуть швидко надавати необхідні відповіді на їх запити.

Аналіз останніх досліджень. Попередні дослідження ефективності впровадження чат-ботів у процес вступної кампанії засвідчили їх високий потенціал щодо зниження навантаження на приймальні комісії та підвищення оперативності інформування вступників [1]. Детерміновані чат-боти, побудовані на основі ключових слів та жорстких сценаріїв, успішно справляються з типовими задачами. Однак практика показує, що такі системи мають критичні обмеження: вони не здатні обробляти нестандартні формулювання, граматичні помилки та складні комплексні запити (наприклад, перехресні умови вступу на різні спеціальності). Крім того, динамічність нормативної бази вимагає постійного ручного оновлення алгоритмів бота. Пряме використання великих мовних моделей (LLM) для цих цілей також є ризикованим через явище «галюцинацій» – генерування правдоподібної, але фактично хибної інформації, що є неприпустимим, зважаючи на юридичну строгість правил прийому [2].

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка моделі інтелектуальної системи інформаційного супроводу, яка поєднує гнучкість комунікації великих мовних моделей із фактологічною точністю бази знань університету шляхом впровадження RAG-архітектури.

Основна частина. Для подолання семантичного бар'єра між абітурієнтом та інформаційною системою пропонується модернізувати архітектуру чат-бота, перевівши її від алгоритмічної до генеративної основи з доповненим пошуком – Retrieval-Augmented Generation (RAG). Цей підхід дозволяє розділити такі процеси як розуміння природної мови та зберігання знань [3].

Функціонування запропонованої системи поділяється на два паралельні процеси: актуалізація знань та обробка запитів. Проблема швидкого втрати актуальності інформації, яка була властива попереднім поколінням чат-ботів, вирішується розробкою модуля автоматизованого парсингу. Використовуючи інструменти веб-скрейпінгу, система регулярно сканує офіційні ресурси закладу вищої освіти, вилучає оновлені правила прийому, розклади іспитів та обсяги держзамовлення, після чого структурує їх та зберігає у базі даних.

Процес обробки запиту абітурієнта реалізується через конвеєр обробки природної мови (NLP). Замість пошуку точних збігів, система використовує бібліотеки семантичного аналізу, адаптовані для української мови, що дозволяє виконувати токенизацію та

лематизацію вхідного тексту. Розпізнавання змісту спирається на сучасні архітектури трансформерів, які забезпечують глибоке двоспрямоване розуміння контексту повідомлення, аналізуючи зв'язки між словами у всьому реченні, а не лише окремі лексеми [4]. Завдяки цьому чат-бот здатен розуміти намір користувача незалежно від використаного сленгу чи граматичних неточностей.

Важливим технологічним етапом, що забезпечує точність системи, є процес векторизації (створення ембедингів) як запитів користувача, так і нормативних документів. Перетворення текстової інформації у багатовимірний векторний простір дозволяє системі знаходити смислові відповідності навіть тоді, коли абітурієнт використовує синоніми або неформальні описові конструкції, відсутні в офіційних документах. Наприклад, нестандартний запит про необхідні «бумажки» для вступу буде автоматично наближений до відповідного розділу бази знань із переліком документів, що було б неможливо реалізувати традиційним пошуком за ключовими словами.

Крім того, перехід від детермінованої до генеративної архітектури відкриває широкі можливості для глибокої персоналізації діалогу. Інтелектуальний асистент здатний утримувати контекст бесіди, запам'ятовуючи попередні репліки вступника, його обрану спеціальність чи наявний рівень освіти. Це трансформує процес взаємодії з формального формату «запитання-відповідь» у повноцінний індивідуальний супровід, де система може проактивно фокусувати увагу користувача на специфічних вимогах конкретної освітньої програми, спираючись на історію їхньої комунікації.

Ключова інновація RAG-архітектури у даному контексті полягає у використанні алгоритму генерації відповіді. Отримавши запит, система спочатку виконує семантичний пошук у власній векторній базі даних, знаходячи найбільш релевантні офіційні документи. Знайдений контекст разом із початковим запитом передається до великої мовної моделі (наприклад, через OpenAI API), яка формує зв'язну, природну і, головне, достовірну відповідь [5]. Такий підхід гарантує, що штучний інтелект виступає лише «комунікатором», тоді як джерелом істини залишається виключно офіційна документація університету. Збереження інтерфейсу взаємодії на платформі Discord забезпечує зручний користувацький досвід та високу доступність сервісу для цільової аудиторії.

Висновки. Необхідним кроком у цифровізації вищої освіти є еволюція систем інформаційного супроводу від статичних чат-ботів до інтелектуальних асистентів на базі RAG-архітектури. Запропонована модель вирішує головні недоліки попередніх систем: усуває проблему нерозуміння контексту користувача, нівелює ризик генерування хибної інформації штучним інтелектом та автоматизує процес підтримки актуальності бази знань. Подальші дослідження будуть спрямовані на практичну реалізацію запропонованої архітектури та оцінку метрик якості розпізнавання намірів абітурієнтів на реальному україномовному масиві даних.

Перелік посилань:

1. Андрусак В., Гобил Л., Ваврик Т. Оптимізація навчального процесу університету за допомогою чат-бота. Інформаційні технології та суспільство. 2024. № 1 (12). С. 6 – 12. <https://doi.org/10.32689/maup.it.2024.1.1>
2. Ji Z., Lee N., Frieske R. et al. Survey of Hallucination in Natural Language Generation. ACM Computing Surveys. 2023. Vol. 55(12), No. 248. P. 1 – 38. <https://doi.org/10.1145/3571730>
3. Lewis P., Perez E., Piktus A. et al. Retrieval-Augmented Generation for Knowledge-Intensive NLP Tasks. <https://arxiv.org/abs/2005.11401>
4. Devlin J., Chang M. W., Lee K., Toutanova K. BERT: Pre-training of Deep Bidirectional Transformers for Language Understanding. Proceedings of NAACL-HLT. 2019. P. 4171–4186. <https://arxiv.org/abs/1810.04805>
5. Kasneci E., Sessler K., Küchemann S. et al. ChatGPT for good? On opportunities and challenges of large language models for education. Learning and Individual Differences. 2023. Vol. 103. 102274. ISSN 1041-6080. <https://doi.org/10.1016/j.lindif.2023.102274>

¹ Магістрант 1 курсу Рябець К. О.

¹ Асист., д.ф.-м.н. Пироговська Т. В.

https://scholar.google.com/citations?user=pquX1_wAAAAJ&hl=uk

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ТА ВПРОВАДЖЕННЯ СИСТЕМИ МЕНЕДЖМЕНТУ ПОДІЙ КАФЕДРИ

Постановка проблеми та її актуальність

Наразі організація консультацій та кафедральних заходів часто здійснюється з використанням кількох неузгоджених між собою інструментів, таких як статичний розклад, календарі, месенджери, таблиці та електронна пошта. Такий підхід не забезпечує єдиного джерела актуальної інформації про події та зайнятість учасників освітнього процесу, через що виникають часові накладки, дублювання та помилки при узгодженні. З огляду на загальний тренд цифровізації освіти актуальним є завдання створення єдиної кафедральної системи менеджменту подій, яка об'єднає в єдиному середовищі процеси планування, погодження та обліку подій з урахуванням зайнятості учасників.

Аналіз останніх досліджень

Аналіз робіт [1–7] показує, що цифрові рішення для роботи з подіями в університетському середовищі активно досліджуються та створюються. У дослідженнях розглядаються системи для публікації та управління університетськими подіями [1], платформи для реєстрації учасників на події, сповіщень і обліку відвідуваності [2, 4, 6, 7], а також рішення, орієнтовані на створення вебсторінок окремих заходів [3] чи об'єднання подій для студентів в одному інтерфейсі [5].

Разом із тим більшість проаналізованих рішень орієнтована на загальноуніверситетські або позаакадемічні події та не враховують специфічних для діяльності кафедри нюансів [1–7]. У них відсутні механізми запису на консультації викладачів, урахування навчального розкладу, зайнятості учасників, а також підтримка таких кафедральних процесів як, наприклад, засідання, захисти та гостьові лекції.

Формулювання мети

Метою цієї роботи є розробка та впровадження системи менеджменту подій кафедри з інтеграцією з Google Calendar і розкладом КПІ ім. Ігоря Сікорського для підвищення зручності планування консультацій і кафедральних заходів.

Основна частина

Основною ідеєю розроблюваної системи є централізація інформації про події кафедри в одному інтерфейсі з урахуванням фактичної зайнятості кожного з користувачів. Це дозволяє зменшити кількість ручних узгоджень через месенджери, електронну пошту та таблиці, уникати часових накладок і спростити організацію взаємодії між учасниками освітнього процесу.

Функціонально система охоплює кілька ключових напрямів: керування кафедральними подіями та запис на консультації. Головним елементом інтерфейсу системи є календар, у якому для кожного користувача відображаються кафедральні події та консультації, у яких він бере участь, а також його навчальні заняття згідно з розкладом.

Щодо керування кафедральними подіями, адміністратор може створювати та редагувати події із зазначенням назви, типу, опису, часу початку і завершення, місця проведення (для офлайн-подій) або посилання (для онлайн-подій), а також списку учасників. Для подій передбачаються статуси (наприклад, чернетка, опубліковано, скасовано). Студенти та викладачі можуть переглядати події та їхні деталі, підтверджувати або відхиляти участь. Для зручності різні типи подій повинні візуально відрізнятися.

У розділі бронювання консультацій викладач може налаштувати доступні часові слоти (одноразові або повторювані), а студент обирає викладача, переглядає вільні проміжки часу та надсилає запит на консультацію із вказаною темою й кількості учасників (індивідуальна або групова консультація). Після цього викладач повинен підтвердити або відхилити запит із зазначенням причини. Студент може відстежувати статус свого запиту (очікує підтвердження/підтверджено/відхилено/скасовано). Система також підтримує скасування або зміну консультації та надсилання відповідних сповіщень.

Важливою особливістю системи є урахування зайнятості користувачів не лише на основі внутрішніх даних, а й інтеграції із зовнішніми сервісами, такими як Google Calendar та «Розклад КПІ». Під час створення подій і консультацій перевіряються часові конфлікти, а підтверджені записи можуть синхронізуватися з Google Calendar.

Окремо передбачено модуль сповіщень, який інформує користувачів про важливі зміни.

Через те, що система складається з кількох функціонально різних підсистем, для реалізації було обрано клієнт-серверну мікросервісну архітектуру. Завдяки такому вибору стає можливо розмежувати відповідальність компонентів, спростити супровід та масштабування. Ще однією причиною такого вибору є наявність інтеграцій із зовнішніми сервісами, які можуть працювати із затримками або бути тимчасово недоступними. Окреме винесення інтеграцій та асинхронна обробка запитів до зовнішніх сервісів дозволяють зберігати стабільну роботу основного функціоналу навіть у разі затримок або тимчасової недоступності цих сервісів. Архітектуру системи зображено на рис. 1.

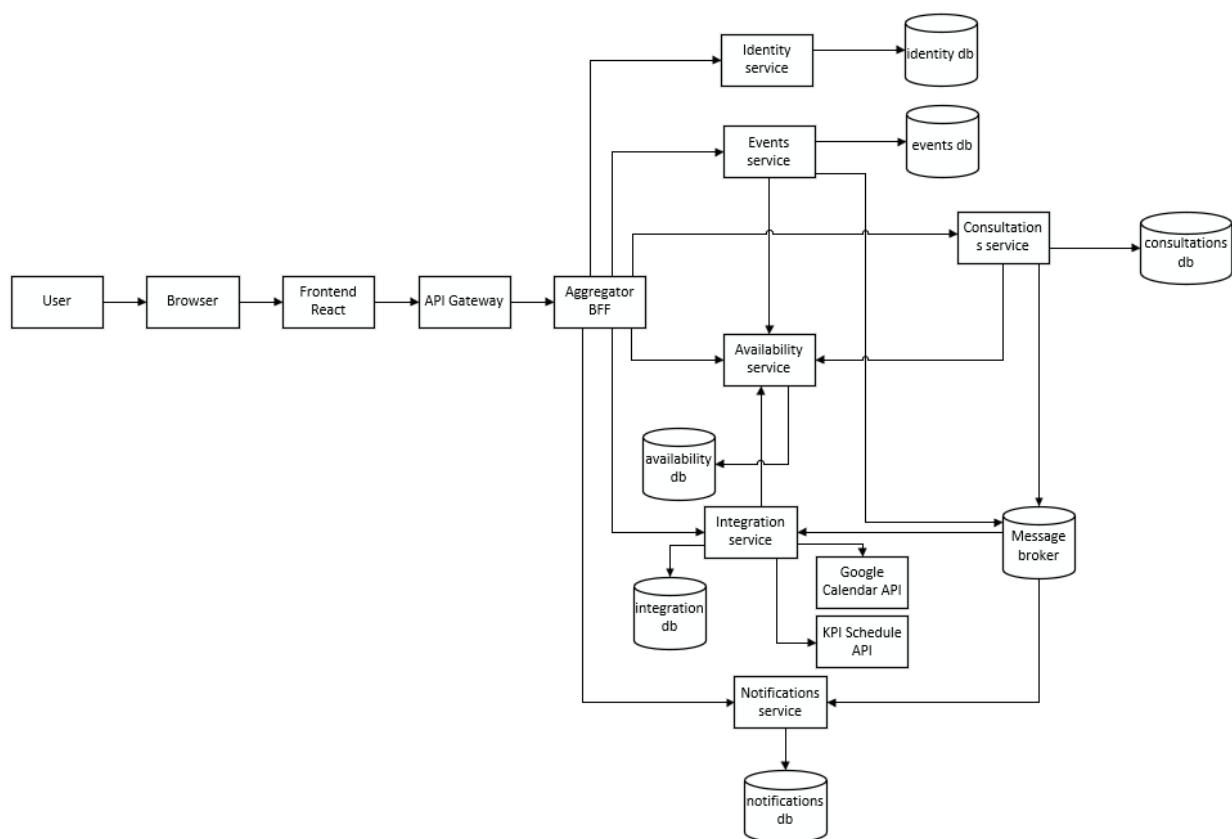


Рисунок 1 – Клієнт-серверна мікросервісна архітектура системи

Архітектура системи побудована за принципом database-per-service та складається з кількох мікросервісів та їхніх сховищ даних:

- клієнтська частина – вебзастосунок, реалізований на React, за допомогою якого користувачі через HTTP API взаємодіють із серверною частиною;
- API Gateway – єдина точка входу, яка виконує маршрутизацію до потрібних сервісів;

–Aggregator BFF – проміжний сервіс, який збирає дані з кількох сервісів і формує відповіді для інтерфейсу;

–Identity Service – сервіс, який відповідає за аутентифікацію, авторизацію, керування профілями та ролі користувачів;

–Events Service – сервіс, відповідальний за створення, редагування, публікацію, перегляд, статуси та учасників кафедральних подій;

–Consultations Service – сервіс, який відповідає за створення слотів викладачем, подання запитів студентами, підтвердження/відхилення запитів, скасування або зміну консультацій;

–Availability Service – сервіс перевірки доступності/зайнятості ресурсів;

–Integration Service – сервіс, який забезпечує інтеграцію з Google Calendar та «Розклад КПП»;

–Notifications Service – сервіс, відповідальний за формування та відправку сповіщень користувачам.

Серверні сервіси реалізуються на FastAPI (Python). Для фонових задач і асинхронної взаємодії використовується комбінація RabbitMQ та Celery. Для зберігання даних використовується PostgreSQL.

Висновки

Розробка вебсистеми менеджменту подій кафедри є актуальним напрямом цифровізації освітнього процесу. Запропонований підхід дає змогу об'єднати в одному середовищі керування кафедральними подіями та консультаціями з урахуванням зайнятості учасників за внутрішніми даними, Google Calendar і «Розклад КПП». Це дозволить підвищити зручність взаємодії між студентами, викладачами та адміністрацією, підвищить узгодженість подій і зменшить кількість накладок.

Перелік посилань

1. Whitener J., Daimi K. University-Wide Event Calendar System // Proceedings of the International Conference on Software Engineering Research and Practice. 2011.

2. Chaturvedi A., Sharma K., Dua A., Gupta A. CU-EVENTS: A Comprehensive Event Management System for University. International Journal for Research in Applied Science and Engineering Technology. 2024. Vol. 12, No. 11. P. 223–229. DOI: 10.22214/ijraset.2024.65020.

3. Islam S., Majumder R., Sultana S., Nasrin S., Rubyeat I. Toward a Generic Event Management System for Academia // 2019 5th International Conference on Advances in Electrical Engineering (ICAEE), 26–28 September 2019, Dhaka, Bangladesh. IEEE, 2019. DOI: 10.1109/ICAEE48663.2019.8975626.

4. Uday Kumar M., Maheshwari P., Vyshnavi V., Swejan P., Nanditha S. College Event Management System. International Journal of Engineering Science and Advanced Technology. 2025. Vol. 25, Issue 05. P. 291–303.

5. Nguyen N. A. Development of an Event Management Web Application for Students: A Focus on Back-End : Bachelor of Science Thesis [Електронний ресурс]. Tampere : Tampere University, 2023. URL: <https://trepo.tuni.fi/bitstream/10024/147775/2/AnNguyen.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).

6. Sonekar S. V., Kokate R., Uikey R. I. Design and Implementation of a Web-Based Campus Event Management System [Електронний ресурс]. International Journal of Novel Research and Development. 2025. Vol. 10, Issue 5. P. 669–672. URL: <https://ijnrd.org/papers/IJNRD2505260.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).

7. Sarthak G., Sivamani K., Lakshmiprasad B., Venkata Sai Aravind P., Akash M., Kharanjit Varma I., Venkata Sai Aryeshu P. University Event Management System Using Data Visualization [Електронний ресурс]. International Journal of Advanced Research in Computer and Communication Engineering. 2025. Vol. 14, Issue 2. P. 233–239. URL: <https://ijarcce.com/wp-content/uploads/2025/03/IJARCCE.2025.14229.pdf> (дата звернення: 25.02.2026).

¹ Аспірант 1 курсу Сечин І. Я.¹ Проф., д.т.н. Гаврилко Є. В.https://scholar.google.com.ua/citations?user=3GII_AwAAAAJ¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА СПЕЦІАЛЬНОГО ПРОГРАМНОГО МАТЕМАТИЧНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ АВТОМАТИЗОВАНОЇ ДЕТЕКЦІЇ ТА КЛАСИФІКАЦІЇ СЕЙСМІЧНИХ ПОДІЙ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Постановка проблеми та її актуальність. Сейсмічна активність є однією з найбільш руйнівних природних загроз для людства. За даними Геологічної служби США (USGS), щороку у світі реєструється понад 500 000 сейсмічних подій, з яких приблизно 100 000 є відчутними для населення [1]. Своєчасне виявлення та точна класифікація сейсмічних подій є критично важливими для систем раннього попередження та оцінки сейсмічних ризиків. Сучасні сейсмологічні мережі генерують безперервний потік трикомпонентних записів із частотою дискретизації від 20 до 200 Гц, що становить десятки терабайт на рік для однієї регіональної мережі [2]. Зростання обсягів даних та вимоги до швидкості обробки в режимі реального часу зумовлюють необхідність розробки нових підходів на основі методів машинного навчання.

Аналіз останніх досліджень. Класичний алгоритм STA/LTA [3] обчислює відношення короткочасного середнього абсолютного значення амплітуди сигналу до довгочасного. Хоча цей метод є обчислювально ефективним, він має суттєві обмеження: високий рівень хибних спрацювань при низькому відношенні сигнал/шум, нездатність розрізняти типи подій та чутливість до ручного підбору параметрів [4]. Модель PhaseNet [5] на основі архітектури U-Net демонструє високу точність детекції Р- та S-фаз ($F1 > 0,9$), однак її продуктивність суттєво знижується при застосуванні до даних інших регіонів (проблема domain shift). Модель EQTransformer [6] на основі Transformer забезпечує одночасну детекцію фаз та класифікацію подій, проте має високу обчислювальну складність, що ускладнює застосування в режимі реального часу. Дослідження [7] показали, що CNN здатні виявляти дискримінантні ознаки в спектрограмах, а LSTM [8] ефективно моделюють довгострокові залежності, але кожен із цих підходів окремо має обмеження. Найбільш перспективним є поєднання переваг CNN та рекурентних мереж з механізмом уваги в єдиній гібридній архітектурі.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка спеціального програмного математичного забезпечення (СПМЗ) на основі гібридної глибокої нейронної мережі, що забезпечує високоточну детекцію фаз приходу Р- та S-хвиль і класифікацію типу сейсмічної події (тектонічний землетрус, вибух, шум) у режимі реального часу з мінімальною затримкою обробки.

Основна частина. Розроблене СПМЗ включає три етапи: підготовку даних, навчання гібридної нейронної мережі та детекцію і класифікацію сейсмічних подій.

Підготовка даних. Вхідними даними є трикомпонентні записи сейсмічних станцій $X(t) = [x_Z(t), x_N(t), x_E(t)]^T$. Попередня обробка включає видалення лінійного тренду та смугову фільтрацію (1–45 Гц) фільтром Баттерворта 4-го порядку, сегментацію на вікна $W = 30$ с з перекриттям $\Delta = 5$ с та z-нормалізацію по кожній компоненті формулою:

$$\hat{x}_c(t) = \frac{(x_c(t) - \bar{x}_c)}{\sigma_{x_c}}, \quad (1)$$

де $\bar{x}_c$ – середнє значення компоненти c у вікні;

σ_{x_c} – стандартне відхилення компоненти c у вікні.

Додатково обчислюються спектрограми (STFT) та характеристична функція (CF). Для навчання використано еталонний набір даних STEAD [9], що містить понад 1,2 млн. розмічених записів сейсмічних подій та шуму. Дані поділяються на навчальну (70 %), валідаційну (15 %) та тестову (15 %) вибірки.

Архітектура гібридної нейронної мережі. Запропонована мережа складається з трьох блоків.

Блок 1 – згортковий екстрактор ознак (CNN Feature Extractor): три згорткових шари (32, 64, 128 фільтрів з ядрами розміром 7, 5, 3 відповідно) із пакетною нормалізацією, активацією ReLU та субдискретизацією Max Pooling. Операція згортки визначається за формулою (2):

$$y_j^l = f(\sum_i w_{ij}^l * y_i^{l-1} + b_j^l), \quad (2)$$

де w_{ij}^l – вагові коефіцієнти ядра згортки шару l ;

$*$ – операція згортки;

b_j^l – зміщення;

$f(\cdot)$ – функція активації ReLU.

Блок 2 – рекурентний блок з механізмом уваги (Attention-based BiLSTM): двонаправлений LSTM (2 шари по 128 нейронів у кожному напрямку) моделює часові залежності в обох напрямках. Механізм уваги дозволяє мережі фокусуватися на найбільш інформативних часових ділянках сигналу та представлений у формулах (3) та (4):

$$\alpha_t = \frac{\exp(e_t)}{\sum_{k=1 \text{ до } T'} \exp(e_k)}, \quad (3)$$

$$c = \sum_{t=1 \text{ до } T'} \alpha_t h_t, \quad (4)$$

де α_t – ваги уваги;

c – контекстний вектор;

e_t – оцінка інформативності часового кроку t ;

h_t – прихований стан BiLSTM у момент t .

Блок 3 – вихідні голови: голова детекції фаз визначає ймовірність Р-фази, S-фази або шуму для кожного часового відліку через функцію softmax; голова класифікації подій визначає тип події на основі контекстного вектора c . Загальна функція втрат є зваженою сумою: $L = \lambda_1 L_{\text{det}} + \lambda_2 L_{\text{cls}}$ ($\lambda_1 = 0,7$; $\lambda_2 = 0,3$). Навчання проводилось методом Adam [10] ($\eta = 10^{-3}$) протягом 50 епох із розміром міні-пакету 64.

Результати. На тестовій вибірці STEAD (180 000 записів) отримано результати, наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Порівняння точності детекції Р- та S-фаз

Метод	F1 (P)	F1 (S)	MAE P, с	MAE S, с
STA/LTA [3]	0.70	-	0.45	—
PhaseNet [5]	0.92	0.88	0.12	0.18
EQTransformer [6]	0.95	0.91	0.10	0.15
Запропоноване СПМЗ	0.95	0.92	0.11	0.14

Запропоноване СПМЗ досягає точності, порівнянної з EQTransformer, при суттєво нижчій обчислювальній складності. Класифікація подій досягає зваженого F1-score 0,95 для трьох класів (тектонічний землетрус – 0,96, вибух – 0,88, шум – 0,97).

Таблиця 2 – Порівняння обчислювальної ефективності

Метод	Параметри моделі	Час інференсу (GPU), мс	Час інференсу (CPU), мс
PhaseNet [5]	21 000	15	180
EQTransformer [6]	372 000	85	1200
Запропоноване СПМЗ	156 000	42	520

Виходячи з табл. 2, час обробки 42 мс на GPU є вдвічі швидшим за EQTransformer при порівнянній точності, що дозволяє обробляти дані в режимі реального часу (час обробки значно менший за тривалість вікна 30 с).

Крос-доменна апробація на даних Інституту геофізики ім. С. І. Субботіна НАН України [11] підтвердила високу узагальнюючу здатність моделі: зниження F1-score при переході на український набір даних становить лише 8–11 %, що є прийнятним для практичного застосування.

Основними вимогами до розробленої системи є: доступність, зручний та зрозумілий інтерфейс користувача, безперебійна робота із базою даних, постійна підтримка існуючого функціоналу та розробка нових модулів, швидкодія системи при високій завантаженості, та обробка великої кількості інформації.

Радіатор не лише розсіює підведене тепло за рахунок випромінення, а й допомагає справлятися з піковими навантаженнями під час зйомки. Це пояснюється тим, що радіатор забезпечує більше теплової маси, до якої можна віддати тепло, ніж сама материнська плата та кришка SoC. Процес зйомки створює коротке але інтенсивне навантаження, таке що система контролю температури автоматично знижує частоту ядер (або зовсім їх вимикає). Впродовж проміжку часу зйомки, радіатор, що діє як теплова маса, поглинає це тепло, запобігаючи зниженню частоти (та передчасному перериванню зйомки). Термін до наступного сеансу зйомки повинен бути достатній для випромінення тепла, що було вже подано до радіатору.

Висновки. Розроблено СПМЗ на основі гібридної архітектури CNN + Attention-based BiLSTM, яке забезпечує детекцію P- та S-фаз із F1-score 0,95 та 0,92 відповідно, класифікацію подій із зваженим F1-score 0,95, а також час обробки одного 30-секундного вікна за 42 мс на GPU, що дозволяє працювати в режимі реального часу. Апробація на незалежних даних підтвердила високу узагальнюючу здатність моделі. Планується інтеграція СПМЗ у програмний засіб з веб-інтерфейсом та розробка системи підтримки прийняття рішень для оцінки сейсмічних ризиків.

Перелік посилань:

1. USGS Earthquake Hazards Program. Earthquake Statistics. URL: <https://www.usgs.gov/natural-hazards/earthquake-hazards/earthquakes>
2. Mousavi S. M., Beroza G. C. Machine Learning in Earthquake Seismology. Annual Review of Earth and Planetary Sciences. 2023. Vol. 51. P. 105–129. doi: 10.1146/annurev-earth-071822-100323.
3. Allen R. V. Automatic earthquake recognition and timing from single traces. Bulletin of the Seismological Society of America. 1978. Vol. 68(5). P. 1521–1532.
4. Withers M., Aster R., Young C., Beiriger J., Harris M., Moore S., Trujillo J. A comparison of select trigger algorithms for automated global seismic phase and event detection. Bulletin of the Seismological Society of America. 1998. Vol. 88(1). P. 95–106.
5. Zhu W., Beroza G. C. PhaseNet: A deep-neural-network-based seismic arrival-time picking method. Geophysical Journal International. 2019. Vol. 216(1). P. 261–273. doi: 10.1093/gji/ggy423.

6. Mousavi S. M., Ellsworth W. L., Zhu W., Chuber L. Y., Beroza G. C. Earthquake transformer – an attentive deep-learning model for simultaneous earthquake detection and phase picking. *Nature Communications*. 2020. Vol. 11. Article 3952. doi: 10.1038/s41467-020-17591-w.
7. Perol T., Gharbi M., Denolle M. Convolutional neural network for earthquake detection and location. *Science Advances*. 2018. Vol. 4(2). Article e1700578. doi: 10.1126/sciadv.1700578.
8. Wang J., Xiao Z., Liu C., Zhao D., Yao Z. Deep learning for picking seismic arrival times. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*. 2019. Vol. 124(7). P. 6612–6624. doi: 10.1029/2019JB017536.
9. Mousavi S. M., Sheng Y., Zhu W., Beroza G. C. STanford EArthquake Dataset (STEAD): A Global Data Set of Seismic Signals for AI. *IEEE Access*. 2019. Vol. 7. P. 179464–179476. doi: 10.1109/ACCESS.2019.2947848.
10. Kingma D. P., Ba J. Adam: A Method for Stochastic Optimization. *Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR)*. 2015.
11. Кендзера О. В., Семенова Ю. В., Пігулевський П. Г. Сейсмічний моніторинг території України: стан та перспективи розвитку. *Геофізичний журнал*. 2020. Т. 42, № 1. С. 3–20. doi: 10.24028/gzh.0203-3100.v42i1.2020.195463.

¹ Магістрант 1 курсу Фомічев Є. Ю.

¹ Асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ІНТЕГРАЦІЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ОБРОБКИ ДОКУМЕНТАЦІЇ В ІНФОРМАЦІЙНІ СИСТЕМИ ПІДПРИЄМСТВ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ГАЛУЗІ

Постановка проблеми та її актуальність. Підприємства енергетичної галузі оперують значними обсягами технічної документації, зокрема проєктною, експлуатаційною, нормативною та договірною. До таких документів належать технічні умови, специфікації обладнання, паспорти, акти виконаних робіт, схеми, сертифікати та інша супровідна документація. Значна частина цих матеріалів існує у неструктурованому вигляді (скановані документи, PDF-файли, зображення), що ускладнює їх автоматизовану обробку та інтеграцію з корпоративними інформаційними системами.

Традиційні підходи до обробки документації, засновані на ручному введенні даних або використанні жорстко заданих шаблонів, є трудомісткими, схильними до помилок і не забезпечують належної масштабованості. В умовах цифрової трансформації енергетичної галузі зростає потреба у впровадженні інтелектуальних методів, здатних автоматично розпізнавати, класифікувати та інтерпретувати зміст технічних документів із подальшим використанням отриманих даних у бізнес-процесах підприємства [1, 2].

Актуальність даної проблеми зумовлена необхідністю підвищення оперативності управлінських рішень, зменшення людського фактору, забезпечення прозорості процесів та інтеграції даних між різними інформаційними системами енергетичних компаній.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері інтелектуальної обробки документів зосереджені на застосуванні методів машинного навчання, комп'ютерного зору та оптичного розпізнавання символів для автоматизації процесів роботи з неструктурованими даними. У роботі [1] проаналізовано підходи до побудови систем інтелектуального прийому та обробки документів, що дозволяють автоматизувати класифікацію та виділення ключових атрибутів із документів різних форматів. Дослідження [2] акцентує увагу на інтеграції інтелектуальної обробки документів із хмарними технологіями та корпоративними інформаційними системами, що створює передумови для побудови гнучких прикладних рішень.

Разом з тим, у більшості наукових публікацій недостатньо розкрито питання галузевої адаптації таких підходів до специфіки енергетичних підприємств та інтеграції їх із системами управління ресурсами підприємства.

Формулювання мети. Метою дослідження є аналіз можливостей інтеграції інтелектуальних методів обробки технічної документації в інформаційні системи підприємств енергетичної галузі, а також обґрунтування архітектурного підходу до використання таких методів у поєднанні з корпоративними системами управління ресурсами підприємства.

Основна частина. Інтелектуальна обробка документації базується на застосуванні методів штучного інтелекту, зокрема машинного навчання та комп'ютерного зору, для автоматичного аналізу вмісту документів. Такі методи дозволяють виконувати розпізнавання тексту, визначення типу документа, витяг ключових атрибутів (номерів, дат, технічних параметрів, назв обладнання), а також перевірку повноти та коректності даних [1, 2].

У контексті енергетичних підприємств доцільним є використання архітектурного підходу, за якого інтелектуальний компонент обробки документації функціонує як окремий

сервіс, інтегрований з корпоративною системою управління ресурсами. Документи надходять до системи у вигляді цифрових файлів, після чого передаються до модуля інтелектуальної обробки. Результати аналізу, представлені у структурованому вигляді, автоматично передаються до відповідних бізнес-процесів: управління технічним обслуговуванням, закупівлями, обліком основних засобів, управління проектами або фінансовим обліком.

Такий підхід забезпечує зменшення часу обробки документів, підвищення точності даних і можливість масштабування рішення відповідно до зростання обсягів документації. Крім того, інтеграція інтелектуальних методів дозволяє поступово навчати систему на специфічних для енергетичної галузі типах документів, що підвищує якість розпізнавання та адаптацію до галузевих вимог [1]. Важливою перевагою є також можливість централізованого управління моделями обробки документів та їх використання в різних інформаційних системах підприємства без дублювання логіки обробки.

Одним із практичних прикладів реалізації інтелектуальної обробки технічної документації є використання сервісу SAP Document AI, який функціонує в хмарному середовищі SAP Business Technology Platform (SAP BTP) [3, 4]. Даний сервіс призначений для автоматизованого розпізнавання, класифікації та виділення структурованих даних з неструктурованих документів, зокрема сканованих PDF-файлів, зображень та електронних форм.

Сервіс SAP Document AI використовує методи машинного навчання та комп'ютерного зору для аналізу вмісту документів і надає результати обробки у вигляді структурованих даних через програмні інтерфейси. Це дозволяє інтегрувати результати розпізнавання безпосередньо в бізнес-процеси інформаційних систем підприємства без необхідності ручного введення даних [3].

З архітектурної точки зору можливі два основні сценарії використання даного сервісу. У першому із них сервіс застосовується в межах екосистеми SAP за умови, що корпоративною системою управління ресурсами підприємства є SAP S/4HANA або SAP ERP Central Component (SAP ECC). У такій архітектурі технічна документація надходить до ERP-системи або пов'язаних із нею компонентів, після чого передається до сервісу інтелектуальної обробки через стандартні програмні інтерфейси. Отримані структуровані дані автоматично включаються до корпоративних інформаційних процесів та забезпечують узгодженість управлінських і облікових процедур.

Другий сценарій передбачає інтеграцію сервісу інтелектуальної обробки документації з інформаційними системами, що не належать до екосистеми SAP. У цьому випадку SAP Document AI використовується як окремий хмарний сервіс, до якого зовнішні системи передають документи для обробки. Взаємодія здійснюється через відкриті програмні інтерфейси сервісу, що дозволяє отримувати результати розпізнавання у стандартизованому форматі та використовувати їх у сторонніх системах управління, аналітики або архівування документації [4].

Архітектурний дизайн обох сценаріїв наведено на рис. 1. Ключовим елементом запропонованої архітектури є використання програмних інтерфейсів сервісу SAP Document AI, що забезпечує уніфікований, стандартизований підхід до інтеграції інтелектуальної обробки документів із корпоративними інформаційними системами підприємства. Наявність відкритих програмних інтерфейсів дозволяє реалізувати взаємодію як із внутрішніми ERP-компонентами, так і зі сторонніми інформаційними системами, забезпечуючи технологічну гнучкість та масштабованість рішення. Такий підхід мінімізує залежність від конкретної платформи розгортання та спрощує адаптацію рішення до існуючої IT-інфраструктури підприємства.

Завдяки модульній побудові архітектури створюються передумови для поступового розширення функціональних можливостей системи, зокрема збільшення переліку підтримуваних типів технічної документації та вдосконалення алгоритмів розпізнавання. Це дозволяє адаптувати моделі обробки документів до галузевих особливостей енергетики,

враховуючи специфіку технічної термінології, структури документів та вимог до точності даних.

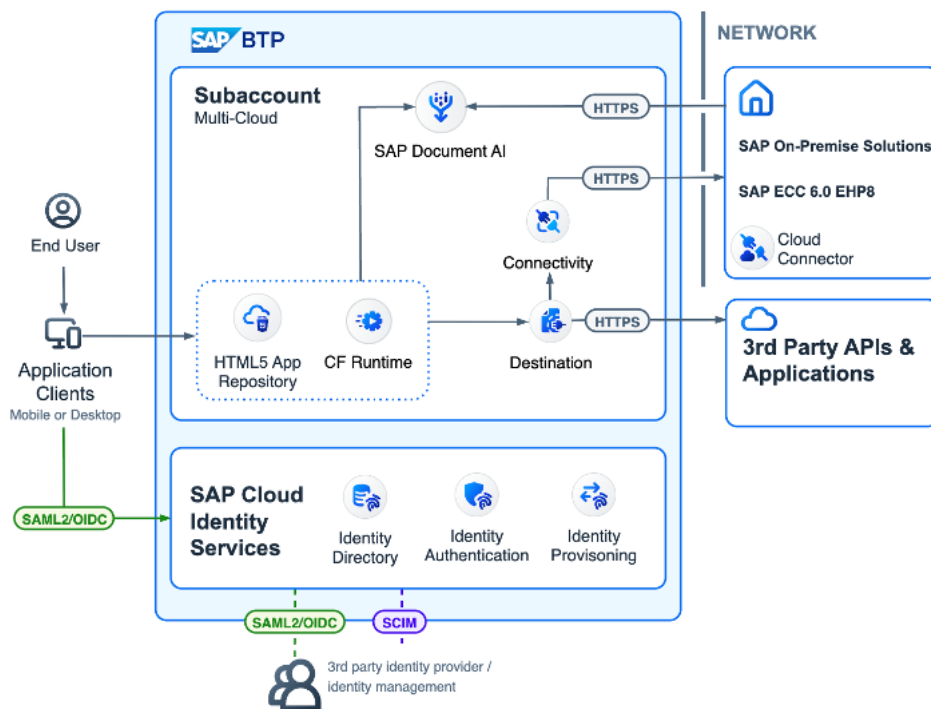


Рисунок 1 – Архітектурний дизайн рішення з використанням сервісу SAP Document AI

Висновки. Інтеграція інтелектуальних методів обробки технічної документації в інформаційні системи підприємств енергетичної галузі є важливим кроком на шляху цифрової трансформації галузі. Запропонований підхід дозволяє автоматизувати роботу з неструктурованими даними, підвищити ефективність бізнес-процесів та зменшити залежність від ручної обробки документації.

Використання штучного інтелекту у поєднанні з корпоративними системами управління ресурсами створює передумови для підвищення прозорості, оперативності та якості управлінських рішень, що є критично важливим для сучасних енергетичних компаній в умовах зростаючих вимог до надійності та ефективності їх діяльності.

Перелік посилань:

1. Dadi S., & Ghosh S. (2025). A Review of AI-Enhanced Document Intake Systems Using OCR for Auto and Property Insurance Applications. *International Journal of Emerging Research in Engineering and Technology*, 6(4). DOI: 10.63282/3050-922X.IJERET-V6I4P110
2. Usama M. (2025). End-to-end Document Management using Intelligent Document Processing, Generative AI, and Cloud Computing. *International Journal of Computing and Data Sciences*, 1(1), 0126. DOI: 10.71317/IJCDs.001.01.0126
3. “SAP Business Technology Platform: Integration and Application Development Guide.” URL: <https://www.sap.com/products/business-technology-platform.html> (дата звернення 29.01.2026)
4. “SAP Discovery Center”. URL: <https://discovery-center.cloud.sap> (дата звернення 30.01.2026)

¹ Аспірант 1 курсу Черноусов Д. І.

¹ Доц., к.т.н. Шпурик В. В.

<https://orcid.org/0000-0002-3477-5731>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

СИМВОЛІКА ЛАНДАУ В АНАЛІЗІ АЛГОРИТМІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Залучення безпілотних літальних апаратів (БПЛА) для виконання завдань радіоелектронної розвідки (РЕР) та геолокації джерел радіовипромінювання (ДРВ) є одним із ключових напрямків розвитку сучасних інформаційно-вимірювальних систем [1]. Розробка та тестування алгоритмів тріангуляції, кластеризації та дедублікації сигналів вимагає наявності високоточних імітаційних середовищ. Проте існуючі програмні рішення переважно спираються на спрощені плоскі моделі (2D) з константною похибкою вимірювання, які не здатні адекватно відтворити поведінку реальних авіаційних сенсорів. Створення комплексної симуляційної моделі, яка базується на сферичній геометрії Землі, враховує енергетичний бюджет радіолінії та динамічні еволюції БПЛА у тривимірному просторі, є критично необхідним кроком для валідації новітніх алгоритмів обробки пеленгаційної інформації.

Головною проблемою при пеленгуванні з повітряних платформ є нелінійна та анізотропна природа вимірювальних похибок, що генерують «хибні перетини» (ghost targets). Як показує практика, точність авіаційного пеленгатора динамічно змінюється залежно від низки апаратних та просторових факторів: наявності бортових «мертвих зон» (затінення крилами або фюзеляжем), зміни співвідношення сигнал/шум (SNR) при наближенні до межі чутливості приймача, а також спотворення зони Френеля при роботі поблизу межі радіогоризонту [2]. Крім того, просторова орієнтація антени системи безперервно змінюється під час польоту: набір висоти формує кут тангажу (pitch), який геометрично зміщує «мертву зону» антени, а виконання маневру (повороту) вносить додаткові спотворення у фазовий центр приймачів. Ігнорування цих фізичних і кінематичних обмежень призводить до хибної роботи алгоритмів злиття даних.

Аналіз останніх досліджень. Більшість класичних моделей систем DF (Direction Finding) спираються на ідеалізовані гауссівські розподіли похибок, не враховуючи просторову геометрію взаємодії «Борт-Ціль». Розглянута у даній роботі програмна модель пропонує інноваційний підхід до розрахунку дисперсії похибки вимірювання. На відміну від статичних методів, запропонований математичний апарат безперервно обчислює втрати у вільному просторі (FSPL), динамічно погіршує точність при перетині порогової частки радіогоризонту (емуляція багатопроменевості) та застосовує мультиплікативні штрафні коефіцієнти для відносних кутів прийому сигналу (Yaw/Pitch відносно носія). Реалізований алгоритм кінематики з плавними розворотами (Turn Rate) та динамічним обчисленням тангажу дозволяє максимально наблизити симульовані дані до реальної бортової телеметрії.

Формулювання мети. Метою даної роботи є опис і обґрунтування комплексної математичної та алгоритмічної моделі симулятора радіопеленгаційної мережі на базі рухомих (БПЛА) та стаціонарних сенсорів. Особлива увага приділяється алгоритмам розрахунку динамічної похибки вимірювання, що формується під впливом 3D-кінематики носія (тангаж, плавні маневри), архітектурних «сліпих зон» авіаційних антен та радіофізичних обмежень каналу зв'язку, що слугуватиме фундаментом для подальшого тестування систем інтелектуальної дедублікації цілей.

Основна частина. Для адекватного моделювання процесу радіоелектронної розвідки (РЕР) з повітряних носіїв, розроблений імітаційний комплекс базується на трьох

взаємопов'язаних підсистемах: кінематичній моделі БПЛА, радіофізичній моделі поширення сигналу та геометричній моделі авіаційного пеленгатора.

Рух безпілотних платформ у симуляторі відбувається у тривимірному просторі з урахуванням сферичної форми Землі. Для обчислення поточних координат БПЛА використовується пряма геодезична задача на сфері. Нові координати (широта φ_2 , довгота λ_2) після проходження дистанції d за заданим курсом θ обчислюються за формулами сферичної тригонометрії [3]:

$$\varphi_2 = \arcsin(\sin \varphi_1 \cos \delta + \cos \varphi_1 \sin \delta \cos \theta), \quad (1)$$

$$\lambda_2 = \lambda_1 + \arctan2(\sin \theta \sin \delta \cos \varphi_1, \cos \delta - \sin \varphi_1 \sin \varphi_2), \quad (2)$$

де $\delta = \frac{d}{R_e}$ – кутова відстань, R_e – радіус Землі.

Окремою особливістю моделі є імітація інерційності платформи. Зміна курсу БПЛА відбувається не миттєво, а обмежується максимальною кутовою швидкістю розвороту $\omega_{\max}$ (у базовій конфігурації 5° - 6° /сек). Крім того, при зміні висоти польоту між маршрутними точками. Симулятор динамічно розраховує кут тангажу носія (pitch) (рис. 1). θ_{pitch} на основі співвідношення пройденої горизонтальної відстані Δd та зміни висоти Δh [4]:

$$\theta_{pitch} = \arctan2(\Delta h, \Delta d). \quad (3)$$

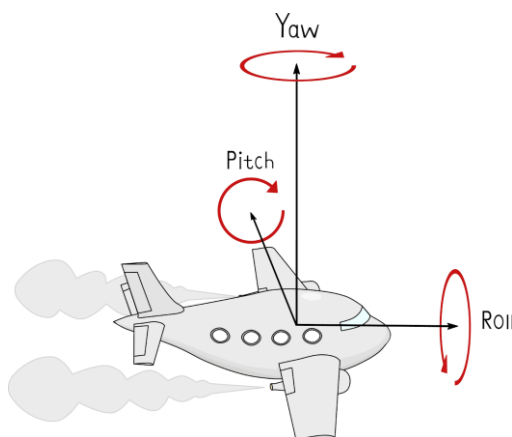


Рисунок 1 – 3 кути Ейлера, що визначають орієнтацію літального апарата

Цей параметр є критично важливим для подальшого розрахунку просторової орієнтації антенної системи пеленгатора.

Базова точність пеленгатора (апаратна середньоквадратична хиба σ_0) у реальних умовах є динамічною величиною. У розробленій моделі враховано вплив зони Френеля на якість пеленгації. Коли лінія візування між БПЛА та наземною ціллю наближається до поверхні Землі, виникає багатопроменеве поширення сигналу [4].

Для математичного опису цього явища введено пороговий коефіцієнт $k_{fresnel}$ (за замовчуванням 0,6). Якщо пройдена сигналом відстань d перевищує 60 % від максимального радіогоризонту $D_{\max}$, ініціюється експоненційне зростання похибки вимірювання:

$$\sigma_{dyn} = \sigma_0 \cdot \mu^{\left(\frac{d \cdot k_{fresnel} \cdot D_{\max}}{10000}\right)}, \quad (5)$$

де μ – фактор дистанційної пенальтізації (наприклад, $\mu = 1,2$ означає погіршення точності на 20% за кожні 10 км у зоні деградації).

Додатково, шляхом розрахунку втрат у вільному просторі (FSPL), система визначає рівень прийнятого сигналу P_{rx} [5]. Якщо запас потужності над порогом чутливості приймача

менший за 10 дБ, застосовується лінійний штраф до точності пеленгу через низьке відношення сигнал/шум (SNR).

Найбільш суттєвим фактором виникнення аномальних похибок (що призводять до хибних перетинів при триангуляції) є архітектурні обмеження бортових антен. У симуляторі реалізовано динамічну модель «мертвої зони».

Важливо, що вісь цієї лійки прив'язана до будови БПЛА, а не до горизонту. Для перевірки потрапляння цілі у сліпу зону, розраховується відносний кут місця θ_{rel} між істинним напрямком на ціль та поздовжньою віссю дрона:

$$\theta_{rel} = \theta_{true} - \theta_{pitch}. \quad (6)$$

Після цього визначається кут відхилення від вертикальної осі носія α_v :

$$\alpha_v = 90^\circ - |\theta_{rel}|. \quad (7)$$

Якщо $\alpha_v < \alpha_{cone}$ (де α_{cone} – апаратний кут сліпої зони, наприклад 35°), похибка σ примусово множиться на штрафний коефіцієнт (від 10 до 15 разів). Аналогічні штрафи застосовуються при пеленгуванні цілі у хвостовій півсфері (екранування фюзеляжем) та під час виконання маневру (коли кутова швидкість розвороту БПЛА перевищує $1^\circ/\text{сек}$).

Для візуалізації математичної моделі розроблено клієнтський додаток на базі фреймворку React. Використання технології WebGL (через бібліотеку MapLibre) забезпечує апаратне прискорення рендерингу карти та сотень динамічних променів у режимі реального часу.

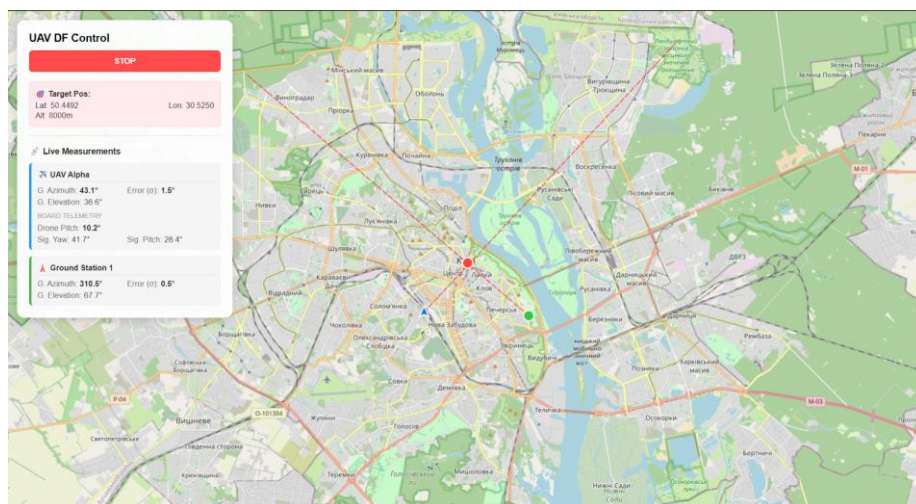


Рисунок 2 - Візуалізація математичної моделі

Як показано на рис. 2, інтерфейс користувача поділено на графічну та аналітичну частини. На панелі керування (UAV DF Control) відображається жива телеметрія. Для забезпечення глибокого аналізу роботи алгоритмів, дані кожного сенсора розділено на дві категорії:

Глобальні координати (Global) – це абсолютний азимут (G. Azimuth) та глобальний кут місця цілі (G. Elevation), які безпосередньо використовуються для відображення променів на карті.

Бортова телеметрія (Board Telemetry) – це локальні параметри, які «бачить» сам БПЛА. Сюди входить поточний тангаж носія (Drone Pitch), а також відносні кути надходження сигналу: Sig. Yaw (відносно курсу) та Sig. Pitch (відносно площини дрона).

Особливістю інтерфейсу є система кольорової індикації: якщо розрахована динамічна похибка пеленгу (Error σ) перевищує 5° внаслідок дії радіофізичних або геометричних штрафів (наприклад, потрапляння у «мертву лійку»), значення виділяється червоним кольором. Це дозволяє досліднику візуально корелювати аномальні перетини на

карті з конкретними еволюціями (маневрами чи зміною висоти) повітряної платформи в даний момент часу.

Висновки. У роботі обґрунтовано критичну необхідність переходу від спрощених двовимірних моделей до комплексних просторових симуляцій для адекватного тестування систем радіоелектронної розвідки на базі БПЛА. Розроблена математична та алгоритмічна модель успішно інтегрує 3D-кінематику носія (урахування тангажу, інерційності та маневрування), радіофізичні обмеження (втрати у вільному просторі, вплив зони Френеля) та архітектурні особливості авіаційних антен (екранування та «сліпі зони»).

Створений програмний комплекс із динамічною індикацією похибок дозволяє візуалізувати та аналізувати процес пеленгування в режимі реального часу з урахуванням анізотропної природи вимірювальних хиб. Це створює надійне імітаційне середовище, яке слугуватиме фундаментальною базою для подальшої розробки, валідації та вдосконалення алгоритмів тріангуляції та інтелектуальної дедублікації сигналів в умовах, максимально наближених до реальної бойової обстановки.

Перелік посилань:

1. Зарицький В. І., та ін. Основи радіоелектронної розвідки та радіоелектронної боротьби. Київ: ВІКНУ. 2020, 50 с.
2. Poisel R. A Electronic Warfare Target Location Methods. Artech House. 2006 , 45 с.
3. Groves P. D. Principles of GNSS, Inertial, and Multisensor Integrated Navigation Systems. 2013, 30 с.
4. Rappaport T. S. Wireless Communications: Principles and Practice (2nd ed.). Prentice Hall. 2002, 47 с.
5. Recommendation ITU-R P.525-4. Calculation of free-space attenuation. International Telecommunication Union. 2019, 49 с.

¹ Аспірант 2 курсу Войтко А. С.

¹ Доц., к.т.н. Кузьмич В. О.

<https://scholar.google.com/citations?user=xtZ1iBwAAAAJ&hl=ru>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДОЛОГІЯ ЗБОРУ МЕТРИК ОХОПЛЕННЯ МЕДІА-КОНТЕНТУ З НОРМАЛІЗАЦІЄЮ ДО ЧАСУ ПУБЛІКАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. В сучасну епоху швидкого поширення інформації велику загрозу становлять ворожі інформаційні компанії. Для їх точного виявлення необхідний всеосяжний підхід до аналізу інформації, що включає як аналіз контенту публікації та її розповсюдження, так і роботу з кількісними метриками охоплення публікації – переглядів, репостів, реакцій та коментарів. За допомогою аналізу даних метрик можна оцінити ефективність інформаційних кампаній, виявити аномалії у розповсюдженні контенту та знайти нетипові паттерни розповсюдження інформації для подальшого аналізу.

Проте при зборі у реальному часі виникає фундаментальна методологічна проблема – метрики охоплення недоступні в момент публікації повідомлення, оскільки потребують часу для накопичення. У свою чергу, якщо збирати дані про публікації лише одноразово (наприклад, під час періодичного сканування каналу), виникає систематичне зміщення – публікації, опубліковані раніше, матимуть більше часу для набору переглядів, ніж нещодавні публікації. Таке зміщення унеможливує коректне порівняння метрик між повідомленнями, що перебувають на різних стадіях розповсюдження контенту. Як наслідок, будь-який аналітичний метод, від простого ранжування до побудови моделей машинного навчання, працюватиме з некоректними вхідними даними.

Додатковою складністю є гетерогенність платформ: Telegram дозволяє отримувати повідомлення в момент публікації через механізм підписки на оновлення, тоді як інші платформи (Facebook, Instagram, X) вимагають періодичного опитування API. Це створює різні стартові умови для збору та потребує уніфікованого підходу до планування повторних вивантажень незалежно від джерела даних.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика збору та аналізу даних із соціальних мереж є предметом активних досліджень останніх років. У дослідженні [1] систематизовано ключові види зміщень, що виникають при роботі з даними соціальних медіа, зокрема виділивши темпоральні зміщення (temporal biases) як окрему категорію, що виникає внаслідок агрегації даних, зібраних у різні моменти часу.

У іншій роботі [2] проаналізовано практичні виклики збору даних з платформ, включаючи обмеження API, ефемерність контенту та проблеми репліковності досліджень при використанні інструментів без належної документації. В дослідженні [3] обґрунтовано необхідність покрокового підходу до збору даних з урахуванням часових вікон та обов'язковою фіксацією припущень щодо вибору періодів спостереження.

Відкриті датасети [4, 5] та інструментарій збору даних [6] зазвичай фіксують публікації лише одноразово.

Разом з тим, жодне з розглянутих досліджень не пропонує систематичного підходу до повторного збору метрик через фіксовані часові інтервали від моменту публікації кожного повідомлення. Саме цю прогалину покликана заповнити запропонована методологія.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка та імплементація методології збору даних з медіа-джерел, яка забезпечує нормалізацію метрик охоплення за часом від моменту публікації. Це досягається шляхом автоматичного створення задач повторного збору з

фіксованим набором часових дельт для кожного повідомлення, реалізованих на базі механізму відкладеного планування в Redis. Результатом має стати набір даних, у якому кожне повідомлення супроводжується кількома зрізами метрик, зібраних через ідентичні інтервали після публікації, що забезпечує коректність порівняльного аналізу.

Основна частина. Запропонована система будується на концепції дельт – наперед визначеного набору часових зміщень (у секундах) від моменту публікації повідомлення, через які має відбутись повторний збір його метрик. Наприклад, набір дельт {900, 1800, 3600, 7200, 604800} означає повторний збір через 15 хвилин, 30 хвилин, 1 годину, 2 години та 7 діб після публікації. Архітектура системи складається з двох компонентів, що представлені на рис.1.

Перший компонент це сервіс початкового збору, що відповідає за фіксацію нових повідомлень. Для Telegram цей збір відбувається у реальному часі через підписку на оновлення каналів за допомогою офіційного API. Для інших платформ, що не підтримують push-механізми, використовується періодичне опитування з заданим інтервалом. У момент збору повідомлення система обчислює набір абсолютних моментів часу для повторного збору шляхом додавання кожної дельти до часу публікації. Кожен такий момент формує окрему задачу, що додається у сортований набір (sorted set, ZSET) Redis з використанням обчисленого моменту часу як score. Ключем задачі виступає ідентифікатор, що містить інформацію про платформу, канал, повідомлення та конкретну дельту.

Другий компонент є окремим сервісом, що безперервно опитує сортовані набори Redis, чекаючи на час виконання наявних завдань. Використовуючи команду ZRANGEBYSCORE з поточним часом як верхньою межею, диспетчер отримує всі задачі, час виконання яких настав, та передає їх на обробку через чергу повідомлень. Атомарне видалення задачі з ZSET (через ZREM) гарантує відсутність дублікатів при горизонтальному масштабуванні. Після чого сервіс виконує завантаження конкретного повідомлення з відповідної платформи, або створює запит на завантаження публікації, зберігаючи актуальні значення метрик охоплення разом із міткою дельти. Таким чином, у базі даних для кожного повідомлення формується набір записів: початковий зріз (збір у момент публікації) та по одному додатковому зрізу для кожної дельти зі списку.

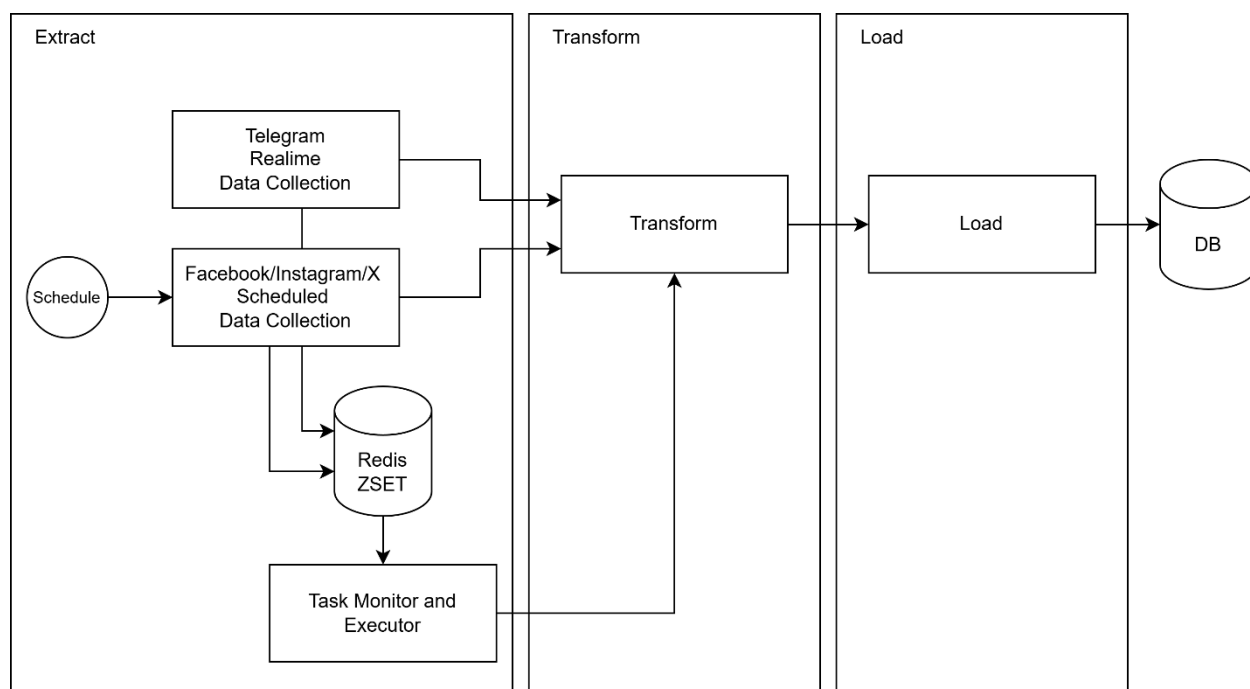


Рисунок 1 – Архітектура запропонованої системи у якості частини ETL пайплайну

Така структура даних дозволяє вирішити проблему темпорального зміщення: при аналізі порівнюються лише метрики, зібрані через однаковий час після публікації. Наприклад, для виявлення аномалій охоплення в конкретному каналі модель навчається окремо для кожної комбінації «канал-дельта», що забезпечує валідність порівнянь між повідомленнями, які перебувають на еквівалентній стадії розповсюдження. Крім того, наявність кількох зрізів уможливорює аналіз динаміки набору метрик у часі для окремих повідомлень, що відкриває додаткові можливості для дослідження паттернів розповсюдження контенту.

Висновки. У роботі запропоновано та реалізовано методологію збору метрик охоплення медіа-контенту з нормалізацією за часом від моменту публікації. Використання сортованих наборів Redis як механізму відкладеного планування задач забезпечує масштабованість, точність дотримання часових інтервалів та стійкість до збоїв. Мікросервісна архітектура з розділенням на компоненти збору, диспетчеризації та завантаження дозволяє незалежно масштабувати кожен етап конвеєра обробки даних.

Запропонований підхід є універсальним та може бути адаптований для будь-якої платформи, що надає API для отримання метрик окремих публікацій.

Перелік посилань:

1. Olteanu A., Castillo C., Diaz F., Kiciman E. Social Data: Biases, Methodological Pitfalls, and Ethical Boundaries. *Frontiers in Big Data*. 2019. Vol. 2, Article 13. DOI: doi.org/10.3389/fdata.2019.00013
2. Chen Y., Sherren K., Lee K. Y., McCay-Peet L., Xue S., Smit M. From theory to practice: insights and hurdles in collecting social media data for social science research. *Frontiers in Big Data*. 2024. Vol. 7, Article 1379921. DOI: doi.org/10.3389/fdata.2024.1379921
3. Kishore S., Sundaram D., Myers M.D. A temporal dynamics framework and methodology for computationally intensive social media research. *Information Systems Journal*. 2025. DOI: doi.org/10.1177/02683962241283051
4. Baumgartner J., Zannettou S., Squire M., Blackburn J. The Pushshift Telegram Dataset. *Proceedings of the International AAAI Conference on Web and Social Media*. 2020. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08438>
5. TeleScope: A Longitudinal Dataset for Investigating Online Discourse and Information Interaction on Telegram. *arXiv preprint*. 2025. DOI: doi.org/10.48550/arXiv.2504.19536
6. Gómez-Romero J. et al. pytopicgram: A library for data extraction and topic modeling from Telegram channels. *SoftwareX*. 2025. Vol. 29. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.softx.2025.102086>

¹ Аспірант 2 курсу Дащик А. С.¹ Доц., к.т.н. Залевська О. В.<https://scholar.google.com/citations?user=v4Quig0AAAAJ&hl=ru&oi=sra>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ ШТУЧНОГО ІНТЕЛЕКТУ В ЗАДАЧАХ ТОПОЛОГІЧНОЇ ОПТИМІЗАЦІЇ ТЕПЛООБМІНУ

Постановка проблеми та її актуальність. З кожним роком розвиток сучасних технологій призводить до зростання кількості різноманітних обчислювальних комплексів. Одним із ключових аспектів забезпечення стабільної роботи таких систем є надійне та ефективне охолодження їхніх компонентів [1]. Для досягнення оптимальної відповідності заявленим вимогам у кожному конкретному випадку необхідно розробляти індивідуальні системи охолодження. В умовах швидкого розвитку цієї сфери топологічна оптимізація постає перспективним напрямком для вирішення цієї проблеми [2]. Проте навіть автоматична генерація моделей, через ітеративну природу процесу, займає значний час, тому наукова активність у цій галузі залишається високою [3].

Аналіз останніх досліджень. Методом, що на сьогодні залишається базовим стандартом в задачах топологічної оптимізації, є метод кінцевих елементів [3]. Водночас активний розвиток альтернативних чисельних підходів, спрямованих на вдосконалення окремих аспектів цього методу, свідчить про його обмежену ефективність щодо сучасних інженерних вимог. Особливо виразно зазначені обмеження проявляються у задачах теплообміну, які характеризуються високою нелінійністю процесів та значними обчислювальними витратами [3, 4]. У зв'язку з цим значна кількість досліджень орієнтована на скорочення часу моделювання та зменшення обчислювальної складності. Незважаючи на суттєвий прогрес у даній галузі, універсального методу, здатного повністю задовольнити вимоги точності та швидкодії при розв'язанні задач топологічної оптимізації теплообміну, на сьогодні не розроблено [5, 6].

Формулювання мети. Вивчення можливостей застосування методів штучного інтелекту для підвищення ефективності розв'язання задач топологічної оптимізації теплообміну шляхом зменшення обчислювальних витрат і скорочення часу моделювання. Розробка стратегії інтеграції штучного інтелекту в процес топологічної оптимізації теплообміну.

Основна частина. Задача топологічної оптимізації формулюється як оптимізаційна задача з обмеженнями, де цільова функція визначає критерій ефективності конструкції, а набір обмежень та рівнянь фізичної моделі забезпечує допустимість рішення з точки зору механіки та теплопровідності. Отже, задачею топологічної оптимізації постає знаходження глобального мінімуму цільової функції (1) за умов (2) [3, 4]:

$$\min_{\gamma \in \mathbb{R}^d} f_{\text{ц}}(\vec{\gamma}, \vec{t}), \quad f_{\text{ц}}(\vec{\gamma}, \vec{t}) = f_{\text{MCE}}(\vec{\gamma})^T \vec{t}, \quad (1)$$

$$g_i(\vec{\gamma}, \vec{t}) \leq 0, \quad i = 1, \dots, m,$$

$$R(\vec{\gamma}, \vec{t}) = 0, \quad (2)$$

$$0 \leq \gamma_j \leq 1, \quad j = 1, \dots, d,$$

де $f_{\text{ц}}(\vec{\gamma}, \vec{t})$ – цільова функція, яка задає критерій оптимізації;

$\vec{\gamma}$ – вектор, який репрезентує множину проектних змінних топології, має розмірність d ;

$\vec{t}$ – вектор вузлових температур, має розмірність d ;

$f_{MCE}(\vec{\gamma})$ – функція, яка повертає вектор теплових потоків, отриманий з методу скінченних елементів;

$g_i(\vec{\gamma}, \vec{t})$ – функція граничних умов під індексом i з множини обмежень для оптимізації (всього обмежень m);

$R(\vec{\gamma}, \vec{t})$ – функція, що описує баланс фізичних сил в системі та має дорівнювати нулю для досягнення рівноваги.

У задачах топологічної оптимізації, збіжність використовується як критерій зупинки ітераційного процесу [4]. Збіжність досягається, коли зміна цільової функції $f_{\square}$ між послідовними ітераціями стає незначною (3). З цього випливає, що загальну кількість ітерацій можна вирахувати по формулі (4):

$$\left| \frac{f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k)}, \vec{t}^{(k)}) - f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k-1)}, \vec{t}^{(k-1)})}{f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k-1)}, \vec{t}^{(k-1)})} \right| < \varepsilon, \quad k \geq 2, \quad (3)$$

$$n_{min} = \min \left\{ k \in \{2, \dots, n_{max}\} \mid \left| \frac{f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k)}, \vec{t}^{(k)}) - f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k-1)}, \vec{t}^{(k-1)})}{f_{\square}(\vec{\gamma}^{(k-1)}, \vec{t}^{(k-1)})} \right| < \varepsilon \right\}, \quad (4)$$

де k – номер ітерації;

n_{max} – максимальна кількість ітерацій;

n_{min} – необхідна кількість ітерацій для мінімізації цільової функції;

ε – допуск мінімальної зміни цільової функції між ітераціями.

Аналіз сучасних досліджень показує, що більш ніж 90 % загального обчислювального часу топологічної оптимізації припадає на аналіз методом кінцевих елементів [5]. Це пов'язано з необхідністю багаторазового розв'язання великорозмірних систем рівнянь на кожній ітерації. На сьогодні більшість досліджень, спрямованих на інтеграцію штучного інтелекту до процесу топологічної оптимізації, визначають нейронні мережі як один із найбільш перспективних напрямків [5, 6]. Залежно від поставлених критеріїв оптимізації нейронні мережі доповнюють або повністю заміщують певні обчислювальні блоки класичного процесу топологічної оптимізації. Попередні дослідження демонструють, що при застосуванні оптимальної стратегії інтеграції нейронних мереж можна значно прискорити топологічну оптимізацію для певного класу задач [5, 6]. Існує значна кількість підходів до інтеграції нейронних мереж та різноманітних комбінованих конфігурацій їх застосування [6], однак з позиції зниження обчислювальних витрат та часу розрахунків їх доцільно звести до двох основних напрямів: зменшення кількості ітерацій оптимізації та скорочення часу виконання кожної окремої ітерації.

Перший підхід передбачає використання методів попередньої обробки даних, прогнозування напрямку оптимізації або обробки проміжних результатів, що дозволяє прискорити досягнення збіжності. Водночас додаткові обчислювальні процедури можуть збільшувати тривалість окремої ітерації та ускладнювати подальшу оптимізацію. Другий підхід спрямований на безпосереднє прискорення або часткову заміну обчислювального апарату за допомогою моделей на основі нейронних мереж. Граничним випадком обох підходів є застосування нейронної мережі, здатної безпосередньо генерувати кінцеву топологію конструкції, що фактично зводить кількість ітерацій до одиниці та забезпечує майже миттєве отримання результату. Однак подібні методи, як правило, характеризуються обмеженою універсальністю та ефективні лише для визначеного класу типових задач, що може призводити до нераціонального використання обчислювальних ресурсів [5].

Процес теплообміну є складним і часто нелінійним, що робить його нетиповим для класичних методів топологічної оптимізації. Він включає взаємодію різних фізичних полів та залежність від багатьох параметрів, що ускладнює точне моделювання та прогнозування поведінки системи. Традиційні алгоритми топологічної оптимізації не завжди здатні врахувати ці фізичні особливості, що може призводити до фізично неможливих рішень або

нестабільності процесу [3]. Застосування фізично-інформованих нейронних мереж можна розглядати як доцільний початковий етап дослідження незалежно від обраної стратегії оптимізації. Такі мережі дозволяють інтегрувати закони фізики безпосередньо в процес навчання, забезпечуючи коректність прогнозів та стабільність результатів [5, 6]. Таким чином, впровадження фізично-інформованих нейронних мереж створює надійну основу для інтеграції методів штучного інтелекту в процес топологічної оптимізації теплообміну, забезпечуючи баланс між точністю, стабільністю та обчислювальною ефективністю.

Висновки. Інтеграція моделей штучного інтелекту, дозволяє значно зменшити обчислювальні витрати та час моделювання. При розробці програмного забезпечення для задач топологічної оптимізації доцільно на початковому етапі визначити пріоритетну стратегію скорочення обчислювального часу, оскільки одночасне поєднання підходів зі зменшення кількості ітерацій і прискорення окремих обчислювальних процедур не завжди є узгодженим та може знижувати загальну ефективність процесу оптимізації.

Перелік посилань:

1. Comparative study of the parameters affecting the performance of microchannels' heat exchangers: latest advances review / M. Asim et al. *Energy science & engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1002/ese3.1522> (date of access: 27.02.2026).
2. A review of topology optimization for additive manufacturing: status and challenges / J. Zhu et al. *Chinese journal of aeronautics*. 2021. Vol. 34, no. 1. P. 91–110. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.09.020> (date of access: 27.02.2026).
3. Topology optimization of heat exchangers: a review / A. Fawaz et al. *Energy*. 2022. P. 124053. URL: <https://doi.org/10.1016/j.energy.2022.124053> (date of access: 27.02.2026).
4. Topology optimisation for natural convection problems / J. Alexandersen et al. *International journal for numerical methods in fluids*. 2014. Vol. 76, no. 10. P. 699–721. URL: <https://doi.org/10.1002/fld.3954> (date of access: 27.02.2026).
5. On the use of artificial neural networks in topology optimisation / R. V. Woldseth et al. *Structural and multidisciplinary optimization*. 2022. Vol. 65, no. 10. URL: <https://doi.org/10.1007/s00158-022-03347-1> (date of access: 27.02.2026).
6. Shin S., Shin D., Kang N. Topology optimization via machine learning and deep learning: a review. *Journal of computational design and engineering*. 2023. URL: <https://doi.org/10.1093/jcde/qwad072> (date of access: 27.02.2026).

¹ Бакалаврант 2 курсу Кропива В. Ю.¹ Проф., к.ф.-м.н. Харкевич Ю. І.¹ Волинський національний університет імені Лесі Українки

СИМВОЛІКА ЛАНДАУ В АНАЛІЗІ АЛГОРИТМІВ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасному світі цифрових технологій якісна та ефективна робота програм, сайтів та застосунків є рушійною силою до успіху. Символіка Ландау дають змогу описати, дізнатись та порівняти ефективність різних алгоритмів. О-символіка допомагає виявити потенційні проблеми на початковому етапі та мінімізувати ризики непередбачених ситуацій, зумовлених невідповідними алгоритмами. Саме це відіграє важливу роль в умовах великого навантаження, високої конкуренції та постійної потреби в розвитку.

Аналіз останніх досліджень. Символіка Ландау слугує основою для аналізу складності алгоритмів (часової та просторової), дозволяючи класифікувати їх за швидкістю роботи. На відміну від вимірювання часу в секундах, символіка Ландау не залежить від потужності процесора чи мови програмування. Це дозволяє передбачити, чи впаде система при переході від 1000 до 1000000 користувачів, та допомагає розробникам обирати найбільш відповідні структури даних та алгоритми для конкретних задач.

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження сутності символіки Ландау та її практичного застосування для аналізу й порівняння ефективності алгоритмів, а також обґрунтування її значення у процесі розроблення програмного забезпечення з метою підвищення продуктивності та оптимізації ресурсів.

Вступ. У сучасній інформатиці аналіз ефективності алгоритмів є одним із ключових завдань. При розробці програмного забезпечення важливо оцінити, як швидко працюватиме алгоритм і як змінюватиметься його продуктивність зі збільшенням обсягу вхідних даних. Для цього використовують асимптотичні позначення, відомі як символи Ландау. О-символіка допомагає виявити можливі проблеми на початковому етапі та мінімізувати ризики непередбачених ситуацій, зумовлених невідповідними алгоритмами.

Ці позначення дозволяють формально описати швидкість зростання функцій та застосовуються для оцінювання часової й просторової складності алгоритмів. Без чіткого розуміння символіки Ландау важко аргументовано обирати відповідні алгоритми. Це має вагоме значення не лише в теорії, а й для практичного застосування: оптимізації баз даних, обробка великих даних тощо.

Основна частина. Аналіз алгоритмів – це процес визначення обчислювальної складності алгоритмів, тобто кількості часу, пам'яті чи інших ресурсів, необхідних для виконання алгоритмів. Алгоритм вважається ефективним, якщо значення цієї функції малі або зростають повільно у порівнянні зі збільшенням розміру вхідних даних.

Символіка Ландау (О-символіка) – це математичний апарат, який використовують для оцінки часової та просторової складності певних алгоритмів. За допомогою неї можна визначити, як змінюється час реалізації або ж як кількість пам'яті, що споживає алгоритм, зростає у зв'язку зі збільшенням величини вхідних даних.

Розглянемо основні типи складності алгоритму (від найшвидшого до найповільнішого):

$O(c)$ – Константна: Час виконання алгоритму не залежить від обсягу даних, де c – будь-яка константа. (наприклад, доступ до елемента масиву за індексом).

$O(\log_2 n)$ – Логарифмічна: Час виконання алгоритму зростає повільно, зазвичай при поділі даних навпіл (наприклад, бінарний пошук).

$O(n)$ – Лінійна: Час виконання алгоритму пропорційний розміру даних (наприклад, лінійний пошук).

$O(n^2)$ – Квадратична: Час виконання алгоритму зростає пропорційно квадрату даних (наприклад, сортування бульбашкою).

$O(2^n)$ – Експоненціальна: Дуже повільні алгоритми, непридатні для великих даних.

Продемонструємо за допомогою наступної таблиці як зростає час виконання алгоритму в залежності від його складності та кількості вхідних даних, де n – це кількість елементів.

n	$O(c)$	$O(\log_2 n)$	$O(n)$	$O(n^2)$	$O(2^n)$
1	c	0	1	1	2
20	c	4,32	20	400	1048576
50	c	5,64	50	2500	$1,1 \cdot 10^{15}$
100	c	6,64	100	10000	$1,3 \cdot 10^{30}$
200	c	7,64	200	40000	$1,6 \cdot 10^{60}$
500	c	8,97	500	250000	$3,3 \cdot 10^{150}$

Для прикладу розглянемо масив, де застосовується лінійна складність (пошук елемента):

`a = [18, 92, 53, 14, 35, 26, 77, 83, 45]`

```
def linear_search(a, b):  
    for i in range(len(a)):  
        if a[i] == b:  
            return i  
    return -1
```

```
print(linear_search(a, 14))
```

Цей алгоритм в найгіршому випадку перевіряє кожен елемент масиву, тобто шукає останній елемент або елемент якого в цьому масиві немає. Час виконання прямо пропорційний кількості елементів в масиві. Якщо масив буде містити невелику кількість елементів то пошук буде швидким, проте якщо він буде містити 100000000 елементів то пошук значно сповільниться.

Лінійна складність підходить для невеликої кількості даних. У таких системах як бази даних, пошукові системи, банківські сервіси, де кількість даних постійно зростає, алгоритм із лінійною складністю з часом може почати сповільнювати роботу всієї системи. Не розуміючи складності алгоритму, можна створити програму, яка швидко працює на невеликих тестових наборах даних, але значно сповільнюється під час роботи з реальними, більшими обсягами інформації.

O -символіка показує, наскільки повільніше працює частина програми, коли вхідні дані стають більшими. Неважливо, чи алгоритм робить 100 чи більше кроків, нас цікавить лише те, як він масштабується зі зміною розміру вхідних даних. Тому ми розглядаємо лише найповільнішу частину алгоритму.

Висновки. Символіка Ландау є фундаментальним інструментом аналізу алгоритмів. Вони дозволяють формалізувати поняття ефективності, зосереджуючись на темпі зростання складності, а не на конкретних числових значеннях.

Завдяки використанню асимптотичних позначень можна оцінювати продуктивність алгоритмів, порівнювати різні підходи до розв'язання задач і забезпечувати ефективність програмних систем у довгостроковій перспективі.

Перелік посилань:

1. <https://uk.wikipedia.org/wiki/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D0%BB%D1%96%D0%B7%D0%B0%D0%BB%D0%B3%D0%BE%D1%80%D0%B8%D1%82%D0%BC%D1%96%D0%B2#>
2. <https://devzone.org.ua/post/notatsiia-landau-ta-analiz-alhorytmiv-z-prykladamy-na-python>
3. <https://www.geeksforgeeks.org/dsa/analysis-algorithms-big-o-analysis/>
4. <https://jpasmd.donnu.edu.ua/article/view/12984>.

¹ Аспірант 2 курсу Лебедєв А. В.¹ Проф., д.т.н. Федорова Н. В.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=uRvUNAcAAAAAJ&hl=en>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ФОРМАЛЬНА МАТЕМАТИЧНА ПОСТАНОВКА ЗАДАЧІ МУТАЦІЙНОГО АНАЛІЗУ МОДЕЛЕЙ МАШИННОГО НАВЧАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Моделі машинного навчання (МН) активно впроваджуються у критично важливі галузі, тому забезпечення їхньої якості та надійності є першочерговим завданням. Мутаційний аналіз – це добре зарекомендований метод оцінювання якості тестових наборів у традиційному програмному забезпеченні, проте його застосування до моделей МН потребує суттєвої адаптації [1]. Зокрема, відсутність математичної формалізації основних понять і процедур мутаційного аналізу для моделей МН ускладнює коректне порівняння підходів та відтворюваність результатів.

Аналіз останніх досліджень. Одними з перших робіт щодо мутаційного тестування систем глибокого навчання є DeepMutation [2], де запропоновано оператори мутації як на рівні тренувальної програми, так і на рівні навченої моделі. Г. Джахангірова та П. Тонелла [3] провели емпіричне оцінювання ефективності мутаційних операторів та показали, що низка з них не враховує стохастичну природу навчання. А. Панічелла та С. Лієм [4] критично переосмислили концептуальні засади мутаційного аналізу для МН та ідентифікували невідповідності класичним гіпотезам. У роботі [1] проаналізовано ключові проблеми адаптації мутаційного аналізу до моделей МН та обґрунтовано доцільність застосування операторів мутації саме на рівні навченої моделі. Також З. Чжан та ін. [5] запропонували метрику, що узагальнює мутаційний коефіцієнт на рівень класів, забезпечуючи більш детальну оцінку адекватності тестів для моделей МН. Водночас формальна математична постановка задачі мутаційного аналізу для моделей МН досі залишається недостатньо розробленою.

Формулювання мети. Метою роботи є побудова формальної математичної постановки задачі мутаційного аналізу для моделей машинного навчання.

Основна частина. Нехай навчена модель машинного навчання (МН) задається параметризованим відображенням (1)

$$f_{\theta} = X \rightarrow Y, \quad (1)$$

де f_{θ} – навчена модель МН;

X – простір вхідних даних;

Y – простір вихідних даних;

θ – вектор параметрів моделі.

Мутаційний аналіз розглядає контрольовані модифікації моделі f_{θ} (1), що імітують дефекти у параметрах або структурі, з метою оцінювання її стійкості до таких змін. Задамо множину операторів мутації (2)

$$O = \{o_1, o_2, \dots, o_K\}, \quad (2)$$

де O – множина операторів мутації;

o_i – i -й оператор мутації;

K – кількість операторів мутації.

У межах мутаційного аналізу розглядаються контрольовані зміни вже навченої моделі f_θ (1). Як обґрунтовано у роботі [1], найбільш доцільними для моделей МН є оператори мутації, що модифікують саме навчену модель без повторного навчання як обов'язкового етапу самої мутації. Такий підхід узгоджується з операторами рівня моделі, запропонованими у [2]. Відповідно, кожен оператор із множини (2) породжує мутанта шляхом перетворення навченої моделі згідно з (3)

$$o_i: f_\theta \rightarrow f_\theta^{m,i}, i = 1, \dots, K, \quad (3)$$

де $f_\theta^{m,i}$ – мутована модель.

Множина згенерованих мутантів визначається як (4)

$$M = \{f_\theta^{m,1}, f_\theta^{m,2}, \dots, f_\theta^{m,N}\}, \quad (4)$$

де M – множина мутантів;

N – кількість мутантів.

Оцінювання впливу мутацій виконується на фіксованому тестовому наборі (5)

$$T = \{(x_j, y_j)\}_{j=1}^n, \quad (5)$$

де $x_j \in X$;

$y_j \in Y$;

n – кількість тестових прикладів.

Для кількісного порівняння поведінки навченої моделі (1) та мутантів (4) використовується узагальнена метрика якості (6)

$$\Phi(f, T) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n \varphi(f(x_j), y_j), \quad (6)$$

де $\Phi(f, T)$ – скалярна інтегральна оцінка якості моделі f на тестовому наборі T , отримана усередненням локальних оцінок по всіх прикладах;

φ – локальна функція якості/втрат, що зіставляє прогноз і еталон на одному прикладі та повертає числову оцінку.

Для задач класифікації φ може задаватися як індикатор правильності (0–1) або як логарифмічна втрата для ймовірнісних виходів; для задач регресії – як квадратична або абсолютна похибка. Далі Φ трактуємо як показник якості за принципом «більше - краще». Якщо в задачі використовується функція втрат l , для якої менші значення відповідають кращій якості (наприклад, MSE або крос-ентропія), то покладаємо $\Phi = -l$, щоб зберегти єдину інтерпретацію відхилення Δ .

Відхилення між значеннями метрики якості для оригінальної моделі та мутанта визначимо як (7)

$$\Delta_i = \Phi(f_\theta, T) - \Phi(f_\theta^{m,i}, T). \quad (7)$$

Оскільки для моделей МН оцінювання може бути стохастичним, Δ_i розглядаємо як випадкову величину $\Delta_i(\omega)$, де ω описує випадкові чинники (ініціалізацію, порядок батчів, стохастичні компоненти тощо). Для підвищення відтворюваності для кожного мутанта виконується R повторів оцінювання, що формує вибірку $\{\Delta_i^{(r)}\}_{r=1}^R$. Необхідність урахування стохастичної природи навчання під час аналізу мутантів підкреслюється у роботі [3],

де показано, що ігнорування цього чинника призводить до хибних висновків щодо ефективності операторів мутації.

Мутант вважається «вбитим», якщо виконується статистично обґрунтований предикат (8):

$$J(f_{\theta}^{m,i}) = \mathbb{I}[p_i \leq \alpha \wedge |d_i| \geq \tau], \quad (8)$$

де $J(f_{\theta}^{m,i}) = \{0,1\}$ – індикатор «вбивства» мутанта;

p_i – p -значення тесту на відмінність між оригіналом і мутантом за серією повторів;

α – рівень значущості;

d_i – оцінка розміру ефекту;

τ – мінімально прийнятний ефект;

$\mathbb{I}[\cdot]$ – індикаторна функція.

Поняття оцінки мутації є ключовим для визначення якості тестового набору в межах класичного мутаційного аналізу [2], проте у контексті моделей МН його інтерпретація потребує переосмислення з огляду на специфіку об'єкта тестування [4]. Тому узагальнену оцінку мутації визначимо як (9)

$$MS = \frac{1}{N - N_e} \sum_{i=1}^N J(f_{\theta}^{m,i}), \quad (9)$$

де MS – мутаційний коефіцієнт;

N_e – кількість еквівалентних мутантів, для яких відмінність від оригіналу на T є нерозрізненною в межах прийнятого критерію.

Висока ресурсозатратність мутаційного аналізу залишається однією з ключових перешкод його практичного впровадження [1, 4]. З огляду на це, задача мутаційного аналізу для моделей МН у межах дослідження формалізується як вибір підмножин операторів мутації $O' \in O$ та тестових прикладів $T' \in T$, що забезпечують максимальне значення мутаційного коефіцієнта стійкості за заданих обчислювальних обмежень (10):

$$MS(O', T') \rightarrow \max, O' \subseteq O, T' \subseteq T, C(O', T') \leq C_{\max}, \quad (10)$$

де $MS(O', T')$ – мутаційний коефіцієнт, обчислений для множини мутантів $M(O')$ на підмножині тестів T' ;

$C(O', T')$ – обчислювальна вартість виконання мутаційного аналізу;

$C_{\max}$ – допустимий бюджет ресурсів.

Таким чином, у межах запропонованого апарату оптимізація мутаційного аналізу зводиться до вибору структури мутацій та обсягу оцінювання на тестах під задані ресурсні обмеження. Розв'язання цієї задачі становить окремий напрям подальших досліджень і буде реалізоване на наступних етапах роботи.

Висновки. У роботі побудовано формальну математичну постановку задачі мутаційного аналізу для навчених моделей МН. Визначено параметризоване відображення моделі, множини операторів мутації, узагальнену метрику якості та статистичний предикат виявлення мутантів. Введено мутаційний коефіцієнт як агреговану характеристику стійкості моделі та сформульовано оптимізаційну задачу вибору операторів і тестових прикладів за обмежених обчислювальних ресурсів. Запропонований апарат забезпечує основу для подальшої розробки алгоритмів ефективного мутаційного тестування моделей МН.

Перелік посилань:

1. Лебедєв А. В., Федорова Н. В. Мутаційний аналіз та проблеми його використання для моделей машинного навчання. Вчені записки ТНУ імені В. І. Вернадського. Серія: Технічні науки. 2025. Том 36 (75), № 2. С. 112–117. URL: <https://doi.org/10.32782/2663-5941/2025.2.2/15> (дата звернення: 01.03.2026).
2. DeepMutation: Mutation Testing of Deep Learning Systems / L. Ma et al. *2018 IEEE 29th International Symposium on Software Reliability Engineering (ISSRE)*, Memphis, TN, 15–18 October 2018. 2018. URL: <https://doi.org/10.1109/issre.2018.00021> (date of access: 01.03.2026).
3. Jahangirova G., Tonella P. An Empirical Evaluation of Mutation Operators for Deep Learning Systems. *2020 IEEE 13th International Conference on Software Testing, Validation and Verification (ICST)*, Porto, Portugal, 24–28 October 2020. 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icst46399.2020.00018> (date of access: 01.03.2026).
4. Panichella A., Liem C. C. S. What Are We Really Testing in Mutation Testing for Machine Learning? A Critical Reflection. *2021 IEEE/ACM 43rd International Conference on Software Engineering: New Ideas and Emerging Results (ICSE-NIER)*, Madrid, ES, 25–28 May 2021. 2021. URL: <https://doi.org/10.1109/icse-nier52604.2021.00022> (date of access: 01.03.2026).
5. A fine-grained evaluation of mutation operators to boost mutation testing for deep learning systems / Z. Zhang et al. *Empirical Software Engineering*. 2025. Vol. 30, no. 3. URL: <https://doi.org/10.1007/s10664-025-10613-5> (date of access: 01.03.2026).

¹ Аспірант 2 курсу Ляшко І. І.

¹ Доц., к.т.н. Залевська О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=v4Quig0AAAAJ&hl=uk&oi=ao>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЯКІСНО-АДАПТИВНА ФУЗІЯ RGB ТА LIDAR ДЛЯ РОБАСТНОГО РОЗПІЗНАВАННЯ МІМІКИ Й КЕРУВАННЯ 3D-АВАТАРОМ У РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ

Постановка проблеми і її актуальність. Застосування FER у прикладних системах дедалі частіше виходить за межі лабораторних умов і переходить в «in-the-wild» сценарії, де дані мають неоднорідну якість і варіативність за освітленням, віком, ракурсом, етнічною належністю, способом зйомки та наявністю часткових перекриттів. У великому огляді методів і наборів даних підкреслено необхідність інтернет-збірок «у дикій природі» та наведено приклади неконтрольованих датасетів (зокрема AffectNet, RAF-DB, FER2013 тощо), що відображають реальні умови застосування [1, 2, 3].

Окремим практичним «вбивцею якості» для 2D FER є оклюзія: перекриття частини обличчя зовнішніми об'єктами або власними елементами сцени (руки, мікрофони, VR-гарнітури, маски), що прямо зазначається як одна з фундаментальних проблем детекції/аналізу облич у сучасних оглядах [3].

Реальний час додає ще один вимір складності: навіть моделі з високою точністю можуть бути непридатними через затримку, вимоги до GPU/пам'яті або нестабільність на потоковому відео. Порівняльний огляд алгоритмів FER у реальному часі демонструє, що глибокі підходи можуть давати дуже високі показники на окремих датасетах, але водночас акцентує потребу в аналізі переваг/недоліків і практичних обмежень [4].

Аналіз останніх досліджень . У сучасних оглядах FER чітко структуровано поле досліджень: контрольовані й неконтрольовані датасети, задачі класифікації емоцій, валентність–збудження, а також детекція Action Units як окремий напрям, що напряму пов'язує міміку з рухами м'язів обличчя. Описано, зокрема, що AU-орієнтовані набори (на кшталт EmotioNet) містять сотні тисяч автоматично розмічених прикладів, а також частину ручної розмітки, що підкреслює масштаб і прикладну цінність AU-представлення [1, 2, 3].

Важлива практична лінія – edge computing і модульний поділ FER-системи. У роботі з архітектурою на Raspberry Pi запропоновано розділення фронтенд/бекенд сервісів та часткове винесення обчислювально важких задач AU-обчислення з метою зменшення мережевої затримки; також описано контейнеризацію модулів для зручного розгортання. Це важливо для сценаріїв, де «реальний час» ламається не лише на інференсі моделі, а й на передачі даних/сервісній інфраструктурі [5].

Тенденція до мультимодальності фіксується в систематичних оглядах розпізнавання емоцій як загальна зміна парадигми: від суб'єктивних оцінок до методів, що спираються на об'єктивні сигнали та поєднання кількох модальностей; підкреслюється очікуваний внесок мультимодальних підходів у точність діагностики та реальний час моніторингу [1, 2].

Мультимодальність у сучасному афективному AI включає не лише 3D/Depth, а й фізіологічні сигнали, зокрема EEG, які розглядаються як окремий зрілий напрям емоційного розпізнавання. Перспективним вважається зближення підходів – наприклад, поєднання FER із EEG для задач на кшталт ментального моніторингу, що підсилює мотивацію універсального механізму фузії, чутливого до якості модальностей [6].

Додатково у прикладних сценаріях важливо, що емоційні стани часто є контекстно-залежними та виходять за межі базових «Екман-емоцій» (наприклад, розгубленість/нудьга/фрустрація). У цьому напрямі використовуються датасети з

контекстними мітками (на кшталт EMOTIC) та підходи, що комбінують facial landmarks і attention, аби масштабовано враховувати контекст сцени [7].

З позиції інженерії фузії важливим є те, що ансамблеві/фузійні схеми здатні стабілізувати якість класифікації. Наприклад, для мультимодального розпізнавання емоцій на сенсорних даних у межах стекінг-моделі наведено звіт з високими значеннями precision/recall/F1 у класах, що ілюструє потенціал комбінування джерел інформації та моделей [8].

Нарешті, опрацювання 3D-джерел (геометрії) є самостійною гілкою розвитку: підхід із 3D point sets і geometric deep learning вказує на можливість підсилення FER шляхом залучення просторових ознак (із відповідною публікацією у Med Biol Eng Comput). Це підтримує ідею, що depth-інформація може бути корисним «страхувальним контуром» у сценах, де RGB деградує [10].

Типовою архітектурою для RGB-D FER є two-stream CNN, де один потік обробляє RGB, а інший – depth; злиття може виконуватись як late fusion або на проміжних шарах, і це зазвичай підвищує якість порівняно з одномодальними системами. Цей прецедент підтримує вибір роздільних екстракторів ознак і подальшої фузії [13].

Формулювання мети. Метою є обґрунтування та опис концепції якісно-адаптивної фузії RGB та LiDAR/Depth для робастного розпізнавання міміки у реальному часі з подальшою трансляцією результатів у параметри 3D-аватара, з акцентом на динамічне зважування модальностей за їхньою якістю, темпоральну стабілізацію виходу та використання AU як придатного представлення для задач анімації.

Основна частина. Запропонований підхід інтерпретується як мультимодальна схема з динамічним контролем довіри до кожної модальності. Нехай у момент часу t доступні: RGB-кадр I_t та depth-дані D_t (LiDAR-похідні карти глибини/хмари точок). Для кожної модальності обчислюється індекс якості(1):

$$q_t^{\text{rgb}} = Q_{\text{rgb}}(I_t), \quad q_t^{\text{d}} = Q_{\text{d}}(D_t), \quad (1)$$

де Q_{rgb} може враховувати, наприклад, упевненість детектора обличчя/ландмарок, оцінку засвічення та розмиття; Q_{d} – щільність/шум/«дірки» карти глибини в зоні обличчя. Мотивація такого контролю якості випливає з того, що неконтрольовані умови та оклюзії прямо визначають деградацію FER, а отже система має реагувати на падіння якості входу не «після катастрофи», а під час інференсу.

Ознаки для кожної модальності виділяються окремими екстракторами (2):

$$z_t^{\text{rgb}} = f_{\text{rgb}}(I_t), \quad z_t^{\text{d}} = f_{\text{d}}(D_t), \quad (2)$$

після чого формується амплітудно-зважена фузія в спільному просторі (3):

$$\alpha_t, \beta_t = \text{softmax}\left(g\left(q_t^{\text{rgb}}, q_t^{\text{d}}\right)\right), \quad z_t = \alpha_t z_t^{\text{rgb}} + \beta_t z_t^{\text{d}}, \quad (3)$$

де $g(\cdot)$ – легкий модуль «гейтингу» (можливий MLP), що переводить якість у ваги. Така схема відрізняється від статичних правил «ранньої/пізньої» фузії тим, що ваги змінюються в часі і підлаштовуються під деградацію конкретного каналу, а не під «середній випадок». Потенціал фузійного мислення підкріплюється емпіричними результатами ансамблевих підходів для мультимодальних емоційних даних, де досягається висока точність на комбінованих ознаках [8].

Вихід системи пропонується визначати у двох комплементарних форматах: 1) класифікація базових емоцій (для задач «позначити стан»), що узгоджується з практикою реального часу й метриками на FER2013/CK+/JAFPE тощо; 2) регресія інтенсивностей Action Units $a_t \in \mathbb{R}^k$ (для задач анімації), оскільки AU є атомарним описом рухів м'язів (FACS) і

може слугувати проміжним шаром між візуальним спостереженням та параметрами рига/блендшейпів 3D-аватара. Підтвердження прикладної ваги AU-підходу міститься як у сучасних оглядах (AU detection як окремий напрям і великі AU-орієнтовані датасети), так і в edge-орієнтованих системах, що прямо описують обчислення AU та їх використання для визначення емоцій [1, 6, 11, 12].

Для стабілізації на потокових даних запроваджується темпоральна фільтрація виходу (наприклад, експоненційне згладжування) (4):

$$\hat{a}_t = \lambda \hat{a}_{t-1} + (1 - \lambda) a_t, \quad 0 < \lambda < 1, \quad (4)$$

що зменшує «тремтіння» параметрів анімації та робить відображення міміки на 3D-аватар більш природним у реальному часі. Практична потреба в обмеженні затримки та підвищенні стабільності узгоджується з тим, що реальні системи демонструють вимірювані FPS на CPU, а також з архітектурними підходами поділу задач між edge і «важчим» сервером.

Оцінювання ефективності запропонованої схеми доцільно проводити в трьох площинах: точність, робастність, часова придатність. В частині точності як мінімум виправдане порівняння з CPU-орієнтованими реальними моделями, для яких відомі як метрики, так і швидкодія (зокрема, показники на CK+/FER2013), щоб уникати «паперової» оптимізації без урахування ресурсів [16].

Робастність пропонується перевіряти в умовах контрольованої деградації якості вхідних модальностей: імітації/реєстрації часткових оклюзій, змін освітлення та ракурсу, що відповідає домінантним викликам, описаним у сучасних оглядах FER, а також проблематиці зниження точності моделей у неконтрольованих реальних даних [15].

Часова придатність оцінюється через вимірювання end-to-end затримки та FPS у системі (з урахуванням захоплення даних, попередньої обробки, інференсу, фузії та оновлення анімаційних параметрів). Для практичних сценаріїв релевантними є архітектурні рішення edge computing із винесенням частини обчислень і модульністю розгортання (контейнери), а також зменшення мережевої затримки в порівнянні з «чистою хмарою» [6].

Очікуваний ефект від якісно-адаптивної фузії формулюється як зменшення деградації точності в моменти, коли одна з модальностей тимчасово «падає» (наприклад, RGB погіршується через засвічення чи оклюзію), за рахунок перерозподілу ваг на користь depth/LiDAR; додатковим очікуванням є зниження нестабільності параметрів (jitter) після темпоральної стабілізації. Доцільність мультимодальності як загальної стратегії підсилюється висновками систематичних оглядів про зміщення поля в бік мультимодальних і реального часу систем, а також прикладами персоналізованих FER-рішень у медицині/моніторингу [9].

Як напрям подальшого розвитку, FER доцільно розглядати як компонент ширшої системи «affect understanding», що поєднує міміку з іншими каналами (зокрема аналізом жестів). Практична здійсненність цього розширення підтверджується прогресом глибинного навчання у vision-based розпізнаванні статичних жестів, що може бути додатковою модальністю/контекстом для інтерпретації стану користувача [14].

Висновки. Було обґрунтовано, що практичні FER-системи в реальному часі потребують не лише «високої точності на тесті», а й механізмів контролю якості входу, адаптації до деградації модальності та стабільного виходу для потокових сценаріїв. Це впливає як з аналізу in-the-wild датасетів і викликів на кшталт оклюзії, так і з практичних результатів CPU/edge-орієнтованих підходів, де точність нерозривно пов'язана зі швидкодією та архітектурою розгортання.

Запропонована концепція якісно-адаптивної фузії RGB та LiDAR/Depth позиціонується як технічно змістовне підсилення мультимодальної парадигми: замість статичного «склеювання» модальностей вводяться ваги, що залежать від якості сигналу в часі, а вихід орієнтується на AU як на природний «міст» між комп'ютерним зором і

керуванням 3D-аватаром. Підхід узгоджується з сучасними тенденціями до мультимодальності та персоналізованого моніторингу емоцій у прикладних доменах [1,4,6].

Перелік посилань:

1. Kopalidis T. et al., "Advances in Facial Expression Recognition: A Survey of Methods, Benchmarks, Models, and Datasets", *Information*, 2024, vol. 15, no. 3, p. 135. doi:10.3390/info15030135.
2. Guo R. et al., "Development and Application of Emotion Recognition Technology - a Systematic Literature Review", *BMC Psychology*, 2024, vol. 12, art. 95. doi:10.1186/s40359-024-01581-4.
3. Yang J. et al., "Real-Time Facial Expression Recognition Based on Edge Computing", *IEEE Access*, 2021, vol. 9, pp. 76178–76190. doi:10.1109/ACCESS.2021.3082641.
4. Gkintoni E. et al., "From Neural Networks to Emotional Networks: A Systematic Review of EEG-Based Emotion Recognition in Cognitive Neuroscience and Real-World Applications", *Brain Sciences*, 2025, vol. 15, no. 3, p. 220. doi:10.3390/brainsci15030220.
5. Dewi C. et al., "Real-Time Facial Expression Recognition: Advances, Challenges, and Future Directions", *Vietnam Journal of Computer Science*, 2024, vol. 11, no. 2, pp. 167–193. doi:10.1142/S219688882330003X.
6. Llorba C., Palau R., "Real-Time Emotion Recognition for Improving the Teaching–Learning Process: A Scoping Review", *Journal of Imaging*, 2024, vol. 10, no. 12, p. 313. doi:10.3390/jimaging10120313.
7. Colaco S. J., Han D. S., "Scalable Context-Based Facial Emotion Recognition Using Facial Landmarks and Attention Mechanism", *IEEE Access*, 2025 (early access), vol. 13, pp. 1–12.
8. Younis E. M. G. et al., "Evaluating Ensemble Learning Methods for Multi-Modal Emotion Recognition Using Sensor Data Fusion", *Sensors*, 2022, vol. 22, no. 15, p. 5611. doi:10.3390/s22155611
9. Zheng L., "Application of Multi-Sensory Interaction Design Based on Machine Learning in Virtual Reality", *J. Physics: Conference Series*, 2023, vol. 2665, no. 1, p. 012018. doi:10.1088/1742-6596/2665/1/012018.
10. Nguyen D.-P. et al., "Enhanced Facial Expression Recognition Using 3D Point Sets and Geometric Deep Learning", *Med. Biol. Engineering & Computing*, 2021, vol. 59, no. 6, pp. 1235–1244. doi:10.1007/s11517-021-02383-1.
11. Haq H. B. U. et al., "Enhanced Real-Time Facial Expression Recognition Using Deep Learning", *Acadlore Transactions on AI and Machine Learning*, 2024, vol. 3, no. 1, pp. 24–35. doi:10.56578/ataiml030103.
12. Bhagat D. et al., "Facial Emotion Recognition using Convolutional Neural Network (CNN)", *Procedia Computer Science*, 2024, vol. 235, pp. 2079–2089.
13. Zhou Y., Li S. Z., Wang W., "Two-stream CNN for facial expression recognition in RGB-D images", *IEEE Access*, 2019, vol. 7, pp. 24285–24293.
14. Oyedotun O. K., Khashman A., "Deep learning in vision-based static hand gesture recognition", *Journal of Electronic Imaging*, 2017, vol. 26(1), p. 013014.
15. Naseem U. et al., "Fusion of visible and infrared images for robust facial expression recognition using attention-based deep networks", *IEEE Transactions on Affective Computing*, 2025 (early access).
16. Putro M. D. et al. "A Fast CPU Real-Time Facial Expression Detector Using Sequential Attention Network for Human–Robot Interaction," *IEEE Trans. Industrial Informatics*, vol. 18, no. 11, pp. 7665–7674, 2022. doi:10.1109/TII.2022.3145862.

¹ Аспірант 2 курсу Передера В. Р.¹ Проф., д.т.н. Недашківський О. Л.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=qT72SMYAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ПРОБЛЕМАТИКА ФОРМУВАННЯ ДАТАСЕТІВ ДЛЯ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ АВТОРСТВА ІНТЕРНЕТ-ТЕКСТІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Задача автоматичної ідентифікації авторства текстів набуває дедалі більшої актуальності у контексті стрімкого зростання обсягів текстового контенту в мережі Інтернет. Потреба у визначенні автора або джерела тексту виникає у сферах кібербезпеки, захисту інтелектуальної власності, судової лінгвістики, а також у виявленні автоматично згенерованого контенту [1, 2]. Класичні та сучасні підходи до стилometriї – від статистичного аналізу до нейронних мереж – демонструють різну ефективність залежно від характеристик корпусу текстів, на якому проводиться навчання та тестування. Проте більшість досліджень зосереджуються на вдосконаленні моделей класифікації, приділяючи недостатню увагу якості та структурі самих датасетів. Водночас саме характеристики навчальних даних – кількість авторів, обсяг та довжина текстів, тематична однорідність, мова – суттєво впливають на результати експериментів і можуть створювати ілюзію високої точності моделей, яка не відповідає реальній здатності розрізняти авторський стиль.

Аналіз останніх досліджень. Huang et al. (2024) у систематичному огляді атрибуції авторства в ері великих мовних моделей виділяють чотири ключових задачі: атрибуцію людського тексту, детекцію LLM-тексту, атрибуцію LLM-тексту та атрибуцію гібридного авторства [1]. Fisher et al. (2024) запропонували StyleRemix – інтерпретований метод обфускації авторства через fine-grained perturbation стилістичних елементів з використанням LoRA-модулів, що перевершує SOTA на автоматичних та людських оцінках [2]. Masko et al. (2024) провели масштабне бенчмаркінг-дослідження (10 методів обфускації × 37 детекторів × 11 мов) та показали, що всі тестовані методи обфускації спричиняють ухилення від автоматичної детекції авторства [3]. Xing et al. (2024) представили ALISON – метод стилometriчної обфускації, що забезпечує понад 10-кратне прискорення та на 15% кращу evasion rate порівняно з попередніми методами при мінімальній зміні семантики [4]. Bevendorff et al. (2025) показали, що детекція LLM-тексту помилково моделюється як задача атрибуції, тоді як за своєю природою це – задача верифікації авторства, що фундаментально змінює підходи до оцінки [5]. Порівняльний аналіз нейромережових підходів (CNN, RNN, Transformer) до глибокої стилometriї [6] підтвердив значний вплив характеристик навчальних корпусів на якість результатів. Однак систематичне дослідження впливу структури та якості датасетів на робастність класифікації – зокрема в умовах adversarial обфускації – залишається недостатньо вивченим.

Формулювання мети. Метою даної роботи є аналіз проблематики формування датасетів для задач ідентифікації авторства та демонстрація впливу їх характеристик на точність стилometriчних методів класифікації. Для цього сформовано шість різнотипних датасетів та проведено серію порівняльних експериментів з використанням як класичних (TF-IDF + SVM), так і нейромережових (BERT) методів класифікації.

Основна частина. Формування якісного датасету для задачі атрибуції авторства є нетривіальною проблемою, що визначається низкою взаємопов'язаних факторів. Перш за все, зі збільшенням кількості авторів у корпусі задача класифікації суттєво ускладнюється, оскільки модель має розрізняти дедалі тонші стилістичні відмінності між більшою

кількістю класів. При цьому дисбаланс кількості текстів між авторами може спотворювати метрики якості, створюючи хибне враження про ефективність моделі. Важливу роль відіграє також довжина текстів: короткі повідомлення, типові для соціальних мереж та коментарів, містять значно менше стилOMETричних ознак порівняно з розгорнутими статтями та есе. Дослідження показують, що мінімальна довжина тексту для надійної атрибуції становить 250–500 слів [6].

Окремою серйозною проблемою є тематичне зміщення (topic bias) – ситуація, коли модель фактично навчається розрізняти теми, а не авторський стиль. Якщо кожен автор у корпусі пише переважно на одну тему, класифікатор може досягати високої точності за рахунок тематичних маркерів, що не відображає реальну здатність розрізняти стиль. Крім того, більшість існуючих датасетів та інструментів орієнтовані на англійську мову, тоді як для мов з багатою морфологією, зокрема української, потрібна адаптація як інструментів попередньої обробки, так і ознакового простору.

Для ілюстрації впливу характеристик датасету на результати класифікації було сформовано п'ять корпусів текстів та проведено серію експериментів. Як стилOMETричний метод використано TF-IDF зважування символічних n-грам ($n = 2-5$, $\text{max\_features} = 50\,000$) у поєднанні з класифікаторами SVM та Logistic Regression. Як нейромережевий метод застосовано fine-tuning моделі bert-base-multilingual-cased (3 епохи, batch size 16, learning rate $2e-5$). Експерименти проведено на таких датасетах: Guardian Corpus (англійська мова, 13 авторів, 1391 текст газетних колонок), Blog Corpus (англійська мова, 50 псевдо-авторів, близько 5000 текстів блогів), UA Wikipedia (українська мова, 12 тематичних категорій, 625 текстів), Human vs AI (англійська мова, бінарна задача розрізнення людського та GPT-2 тексту, 927 текстів), та Synthetic Cross-topic (англійська мова, 6 тем, 491 текст із крос-тематичним розподілом). Усі датасети розділено у співвідношенні 80/20 на навчальну та тестову вибірки зі стратифікацією за мітками.

Результати класифікації наведено у табл. 1.

Таблиця 1 – Результати класифікації на різних датасетах

Датасет	SVM Acc	LogReg Acc	BERT Acc	Авторів
Guardian	1.000	1.000	0.760	13
Human vs AI	0.995	0.968	0.995	2
UA Wiki	0.928	0.896	0.760	12
Blog	0.756	0.683	–	50
Cross-topic	0.020	0.030	–	6

Результати демонструють кардинальну різницю в точності – від 100 % до практично випадкового вгадування – що зумовлена виключно характеристиками датасетів. Ідеальний результат на Guardian (100 %) пояснюється поєднанням невеликої кількості авторів, довгих текстів та тематичної специфіки кожного автора. Зниження на Blog до 75,6 % зумовлено більшою кількістю класів (50) та коротшими текстами. Найпоказовішим є результат на крос-тематичному датасеті (~2 %), де тексти одного автора розподілені між різними тематиками, що демонструє нездатність методу працювати при усуненні тематичного сигналу.

Порівняння TF-IDF з BERT виявило неочікуваний результат: класичний стилOMETричний підхід перевершує нейромережевий на задачах атрибуції авторства (100 % vs 76 % на Guardian, 93 % vs 76 % на UA Wiki). Це пояснюється тим, що символічні n-грами ефективніше захоплюють індивідуальні лексичні та морфологічні патерни авторського стилю, тоді як BERT з обмеженим fine-tuning (3 епохи) не встигає повноцінно адаптуватися. На бінарній задачі Human vs AI обидва підходи досягають однакової точності (99,5 %), що свідчить про фундаментальний характер відмінностей людського та машинного тексту.

Висновки. Проведене дослідження показало, що характеристики датасету впливають на результати класифікації значно більше, ніж вибір конкретної моделі. При використанні одного й того ж методу точність варіюється від 100 % на тематично однорідному корпусі до 2 % на крос-тематичному датасеті, що підтверджує домінування фактору даних. Тематичне зміщення виявилось найбільш критичним конфаундером: при усуненні тематичного сигналу модель повністю втрачає здатність до правильної класифікації. Також встановлено, що класичний стилOMETричний підхід на основі TF-IDF та символічних n-грам перевершує нейромережеву модель BERT на задачах атрибуції авторства, зокрема для української мови (92,8 % проти 76 %). На основі отриманих результатів рекомендовано при формуванні датасетів забезпечувати крос-тематичне покриття для кожного автора, контролювати баланс класів, використовувати тексти достатньої довжини та проводити тестування на корпусах різної складності.

Перелік посилань:

1. Stamatatos E. A survey of modern authorship attribution methods. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2009. Vol. 60, No. 3. P. 538–556.
2. Koppel M., Schler J., Argamon S. Computational methods in authorship attribution. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*. 2009. Vol. 60, No. 1. P. 9–26.
3. Luyckx K., Daelemans W. The effect of author set size and data size in authorship attribution. *Literary and Linguistic Computing*. 2011. Vol. 26, No. 1. P. 35–55.
4. Potthast M. et al. A stylometric inquiry into hyperpartisan and fake news. *Proceedings of the 56th Annual Meeting of the ACL*. 2018. P. 231–240.
5. Передера В. Р., Недашківський О. Л. Дослідження нейромережних підходів до глибокої стилOMETрії в задачах визначення авторства. *Зв'язок*. 2025. No. 4. DOI: 10.31673/2412-9070.2025.042554.
6. Neal T. et al. Surveying stylometry techniques and applications. *ACM Computing Surveys*. 2017. Vol. 50, No. 6. P. 1–36.

OFFLINE-FIRST LMS: СИНХРОНІЗАЦІЯ ТА БЕЗПЕЧНЕ ОФЛАЙН-ТЕСТУВАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Нестабільність інтернет-з'єднання та перебої електропостачання роблять безперервність дистанційного навчання критичною вимогою до сучасних систем керування навчанням (LMS). У таких умовах недостатньо лише надавати контент: потрібно гарантовано зберігати навчальні дії (прогрес, відповіді на тести, події активності) та забезпечувати їх подальше узгодження із сервером без втрат і спотворень. Підвищення вимог до достовірності оцінювання в онлайні додатково загострює проблему: у разі втрати або некоректності даних про спроби тестування знижується довіра до результатів, а повторне проходження завдань не завжди можливе. Відтак актуальним є підхід, який забезпечує автономну фіксацію навчальних дій та їх надійне узгодження із сервером після відновлення зв'язку.

Аналіз останніх досліджень. Практики offline-first для вебзастосунків спираються на стандартизовані механізми прогресивних веб-додатків: service worker для перехоплення запитів, керування кешем і фонові доставки даних [1], а також транзакційні локальні сховища для надійної фіксації подій і метаданих роботи користувача [2]. Для захисту даних на клієнті використовують можливості Web Cryptography API [3], зокрема автентифіковане шифрування, а також похідні ключі, сформовані за HKDF (RFC 5869) [4]. Окремий напрям становлять підходи до забезпечення цілісності журналів подій як основи аудиту та розслідувань інцидентів [5]. Водночас у контексті LMS критичним залишається поєднання подієвого журналювання, детермінованої синхронізації та криптографічно захищеного офлайн-тестування в межах єдиної узгодженої моделі.

Формулювання мети. Метою роботи є обґрунтування та опис архітектурної моделі offline-first LMS, яка забезпечує надійну фіксацію навчальної активності у вигляді журналу подій, пакетну синхронізацію з ідемпотентністю та дедуплікацією, кероване версіонування й детерміноване розв'язання конфліктів, а також механізми криптографічного захисту та перевірюваності результатів офлайн-тестування.

Основна частина. Перехід до offline-first підходу означає, що первинним джерелом фіксації критичних дій стає локальне транзакційне сховище, а мережа розглядається як канал реплікації та верифікації. У запропонованій моделі навчальна активність описується як послідовність подій із фіксованою схемою, що забезпечує відтворюваність станів та основу для аудиту.

Технічно offline-first вебклієнт спирається на стандартні веб-API: service worker перехоплює запити, підтримує кешування і сценарії роботи без мережі та керує фоновими задачами, використовується локальне зберігання журналу подій і метаданих спроб. Після відновлення зв'язку синхронізація запускається автоматично та передає накопичені дані пакетами [1-3].

Ключовою одиницею синхронізації є подія з унікальним ідентифікатором, типом, часовою міткою, контекстом та корисним навантаженням. Протокол пакетної синхронізації передбачає ідемпотентність і дедуплікацію, часткові підтвердження застосованих подій, кероване версіонування та детерміновані правила розв'язання конфліктів.

Ключові складники запропонованої архітектури offline-first LMS включають:

- локальний журнал подій у транзакційному сховищі клієнта з можливістю відтворення стану;
- керування кешем і фонову доставку подій через service worker;
- пакетну синхронізацію з сервером із підтвердженнями, ідемпотентністю та дедуплікацією;
- кероване версіонування й детерміновані політики розв'язання конфліктів;
- криптографічний захист офлайн-спроб та політики життєвого циклу даних.

Найскладнішим сценарієм є безпечне офлайн-тестування, де необхідно поєднати автономність клієнта з можливістю серверної перевірки. Практичним рішенням є формування «печатки» спроби, що містить зашифровані відповіді та криптографічний інваріант цілісності журналу подій. На стороні клієнта доцільно застосовувати криптографію, автентифіковане шифрування AES-GCM, похідні ключі на базі HKDF та хеш-ланцюжок подій для виявлення вставок, видалення або перестановки записів [3-5].

Висновки. Запропонований підхід підвищує стійкість LMS до мережових збоїв і відмов живлення, забезпечує відтворюваність навчальної активності та знижує ризики фальсифікації офлайн-результатів. Архітектуру можна впроваджувати як PWA-модуль для наявної LMS або як окремий вебклієнт, що взаємодіє із серверними кінцевими точками синхронізації. Практична цінність підходу полягає у можливості поетапної інтеграції: спочатку – журнал подій і синхронізація, далі – політики конфліктів і криптографічна «печатка» для високостакових активностей на кшталт тестів.

Перелік посилань:

1. Service Workers. URL: <https://www.w3.org/TR/service-workers>
2. Indexed Database API 3.0. URL: <https://www.w3.org/TR/IndexedDB>
3. Web Cryptography Level 2. URL: <https://www.w3.org/TR/webcrypto-2>
4. Krawczyk H., Eronen P. HMAC-based Extract-and-Expand Key Derivation Function (HKDF). RFC 5869. URL: <https://www.rfc-editor.org/rfc/rfc5869>
5. Schneier B., Kelsey J. Secure Audit Logs to Support Computer Forensics. ACM Transactions on Information and System Security. 1999. Vol. 1, No. 3. P. 159–176.

¹ Postgraduate 3d year Hnatyshyn M. S.

¹ Prof., doc.eng.sc. Nedashkivskiy O. L.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=qT72SMYAAAAJ&hl=en>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

FAKE INFORMATION DETECTION CHALLENGES IN THE WORLD OF AI

Statement of the problem and its relevance

The rapid development of AI-based generative models has created a rather uncomfortable paradox for information security researchers: the same neural architectures that are supposed to detect synthetic content are increasingly being exploited to produce it. What makes this especially difficult is that the gap between generator quality and detector reliability keeps widening - and it is widening fast. According to recent reports, by 2024 deepfake-related incidents were appearing at a rate of roughly one every few minutes [1], and AI-generated content reportedly accounts for the majority of synthetic media online today [2]. As illustrated in fig. 1, open-source detection models that achieved around 90 % accuracy back in 2019 are now struggling to reach even 50 % on real-world data [3]. In our view, this trajectory makes the problem one of the more urgent challenges in applied machine learning right now.

Analysis of the latest research

Several recent benchmarking studies have confirmed what many practitioners already suspected: there is a serious generalization problem with current detectors. The Deepfake-Eval-2024 benchmark [3] tested a range of open-source models - among them GenConViT, FTCN, and StyleFlow - and found that accuracy drops dramatically when moving from controlled lab datasets to real-world content. One study reported that adversarial perturbations alone could reduce ViT-based detector performance by as much as 40 % in cross-dataset evaluations [4]. On top of the purely technical side, there are now regulatory pressures to consider: the EU AI Act (2024) requires that detection systems be explainable and privacy-respecting, which adds a whole new layer of constraints. The financial picture is no less sobering - Deloitte estimates that AI-driven fraud losses in the U.S. could approach \$40 billion by 2027 (fig. 2), with deepfake impersonation being one of the main drivers [1].

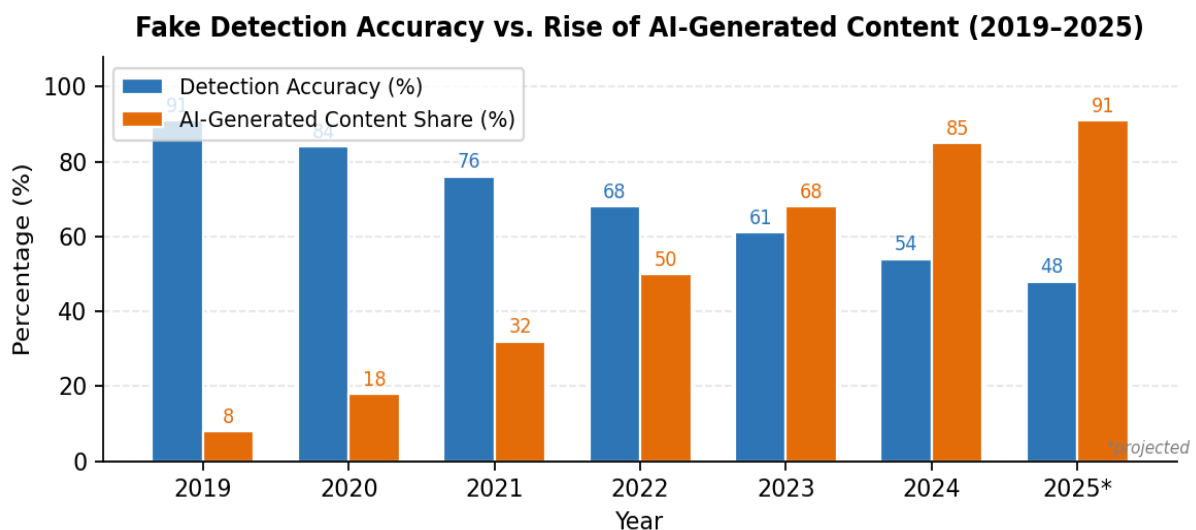


Figure 1 – Detection accuracy decline vs. rise of AI-generated content share (2019–2025)

Goal formulation

The aim of this work is to take a closer look at the main obstacles facing neural-network-based fake detection systems today - obstacles that arise specifically because of how good modern generative AI has become - and to sketch out a research direction that tries to address them in a more integrated way than current solutions typically do. This includes questions of adversarial robustness, cross-dataset generalization, multimodal fakes, and regulatory alignment.

Main part

Looking at the literature and at the practical experience of working in this area, it seems possible to group the main difficulties into four clusters. The first is what could be called the arms race problem: GAN- and diffusion-based generators are essentially trained to defeat discriminators, so any static detector becomes outdated relatively quickly after deployment. The second issue is dataset shift - models trained on well-known benchmarks like FaceForensics++ or DFDC just do not transfer well to newer generation methods, a finding confirmed again by Deepfake-Eval-2024 [3]. Third, there are multimodal fakes, where real video is paired with synthetic audio (or the other way around); most existing detectors are unimodal and simply cannot catch this. Finally, the explainability gap remains a real problem: a binary “fake/not fake” output with no supporting evidence is hard to use in any legal or journalistic setting, and it does not satisfy the transparency requirements in EU AI Act Article 13 either.

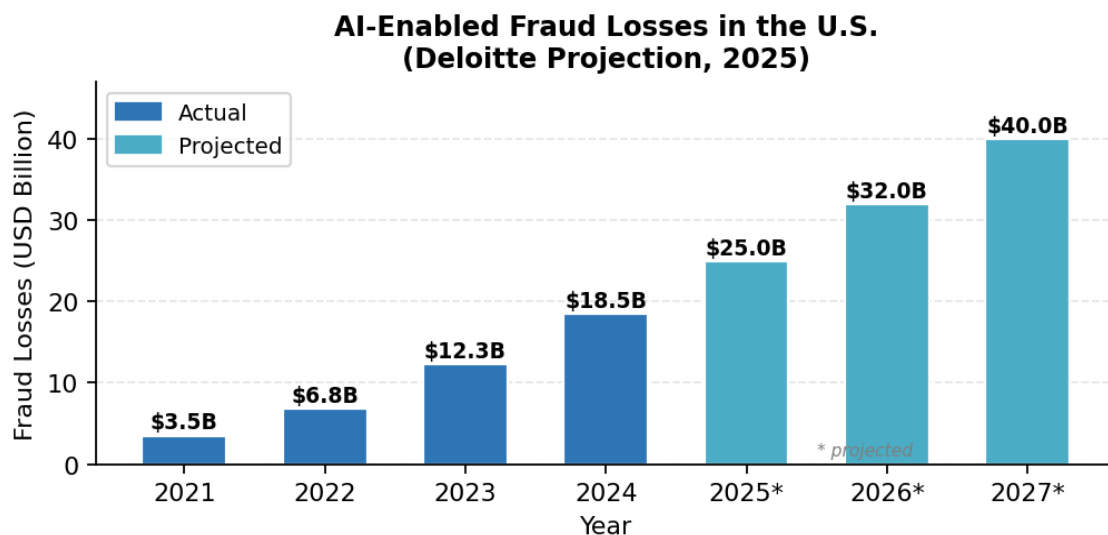


Figure 2 – AI-enabled fraud losses in the U.S., actual and projected 2021–2027 (Deloitte, 2025)

To address these issues, we are developing a framework built around four ideas that we believe work better together than in isolation. The core of it is continual and few-shot learning - the idea being that a detector should be able to adapt to new generation techniques incrementally, without the cost of full retraining each time something new appears. On top of that, we want to move away from single-modality approaches and instead work with multimodal transformer models that process audio, video, and text simultaneously, which makes it at least possible to catch inconsistencies between modalities. For explainability, we are looking at integrating GradCAM and SHAP attribution directly into the pipeline so that each detection decision comes with some kind of human-readable justification. The fourth element is federated learning: training across institutions without pooling their raw data. This seems like the right approach both for improving generalization and for staying on the right side of GDPR and the EU AI Act.

Conclusions

The main takeaway from this analysis is that fake detection can no longer be treated as a static classification problem. The deterioration in detection accuracy observed over recent years is not a coincidence - it reflects a fundamental mismatch between how detectors are built and how generators evolve. A more viable path forward seems to involve systems that can adapt over time,

explain their decisions, and work across modalities, while also being deployable in settings where data cannot be freely shared. The framework we are working toward tries to bring these requirements together. The next step will be to actually implement and test it against current diffusion-based models in something closer to real conditions - which is harder than it sounds, but that is probably where the most interesting results will come from.

References:

1. Deloitte Center for Financial Services. Generative AI and the future of fraud detection. Deloitte Insights, 2025.
2. Deepfake Statistics 2025: The Data Behind the AI Fraud Wave. DeepStrike Security Report, 2025. URL: <https://deepstrike.io/blog/deepfake-statistics-2025>
3. Korshunov P. et al. Deepfake-Eval-2024: A Multi-Modal In-the-Wild Benchmark of Deepfakes Circulated in 2024. arXiv:2503.02857, 2025.
4. Mitra S. et al. Unmasking digital deceptions: An integrative review of deepfake detection, multimedia forensics, and cybersecurity challenges. PMC, 2025.
5. Fan B. et al. Detecting anti-forensic deepfakes with identity-aware multi-branch networks. Frontiers in Big Data, Vol. 8, 2025.
6. Liu H. et al. A Review of Deepfake and Its Detection: From GANs to Diffusion Models. Int. J. Intelligent Systems, Wiley, 2025.

¹ Аспірант 3 курсу Ворвуль Д. М.¹ Проф., д.т.н. Мусієнко А. П.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=EvdJcxsAAAAJ&hl=en>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ГРАФОВА ПАМ'ЯТЬ ДЛЯ ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ LLM-АГЕНТІВ КОМП'ЮТЕРНОЇ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Постановка проблеми та її актуальність. Агенти використання комп'ютера на базі великих мовних моделей (LLM) мають потенціал автоматизувати цифрові робочі процеси, виконуючи інструкції користувачів у природній мові. Однак сучасні агенти, зокрема системи типу Agent S2, залишаються неефективними у виконанні повторюваних завдань через відсутність довготривалої пам'яті. Вони змушені кожного разу повторно генерувати послідовності дій, навіть якщо аналогічні завдання вже були розв'язані. Це призводить до надлишкового використання токенів, збільшення часу виконання та зниження масштабованості систем.

Аналіз останніх досліджень. Існуючі рішення, як MobileGPT чи AppAgentX, впроваджують обмежені механізми пам'яті, що фіксують лише лінійні логи дій або макроси. Проте вони не враховують розгалужену природу графічних інтерфейсів користувача. Відповідно, постає необхідність у структурованій архітектурі пам'яті, яка б дозволяла агенту ефективно накопичувати, узагальнювати та повторно використовувати знання про середовище взаємодії.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка та дослідження архітектури графової пам'яті для LLM-агентів комп'ютерного використання, що забезпечує ефективне повторне використання досвіду взаємодії з графічними інтерфейсами.

Основна частина. Запропонована архітектура зберігає знання агента у вигляді орієнтованого графа $G = (N, E)$, де вузли (N) відповідають конкретним екранам або станам користувацького інтерфейсу, а ребра (E) – послідовностям дій, котрі переводять систему з одного стану в інший. До кожного вузла додаються параметризовані «завдання-функції», що описують типові операції, які агент може виконати в цьому стані.

Наприклад, для вузла «Google Drive Home» агент може мати збережену підпрограму SearchDrive(query), що автоматизує введення запиту в пошуковий рядок і відкриття сторінки результатів. З часом граф еволюціонує, відображаючи набуті знання агента та дозволяючи йому ефективно орієнтуватися у складних середовищах.

Розроблену (рис. 1) пам'ять інтегровано у відому архітектуру Agent S2, яка складається з модуля Manager (планування завдань) та Worker (виконання дій). Перед виконанням чергової підзадачі Manager звертається до графа пам'яті для пошуку вже відомих послідовностей, здатних реалізувати завдання без залучення LLM.

Якщо збіг знайдено, агент виконує готову послідовність дій; якщо ні – формує новий план і зберігає його для майбутнього використання. Таким чином, система комбінує LLM-розуміння для нових ситуацій і графову пам'ять для відомих сценаріїв, що знижує потребу в повторному обчисленні.

Після виконання нового завдання агент аналізує пройдений шлях у графі та автоматично створює нові інструменти. Наприклад, якщо агент виконав процедуру «Експорт звіту у форматі PDF», система генерує універсальну функцію ExportReport(format), яку можна викликати з різними параметрами. Ці інструменти додаються до графа у вигляді нових ребер або стиснутих шляхів між станами, що забезпечує поступове накопичення функціональних знань як проілюстровано на рис. 2.

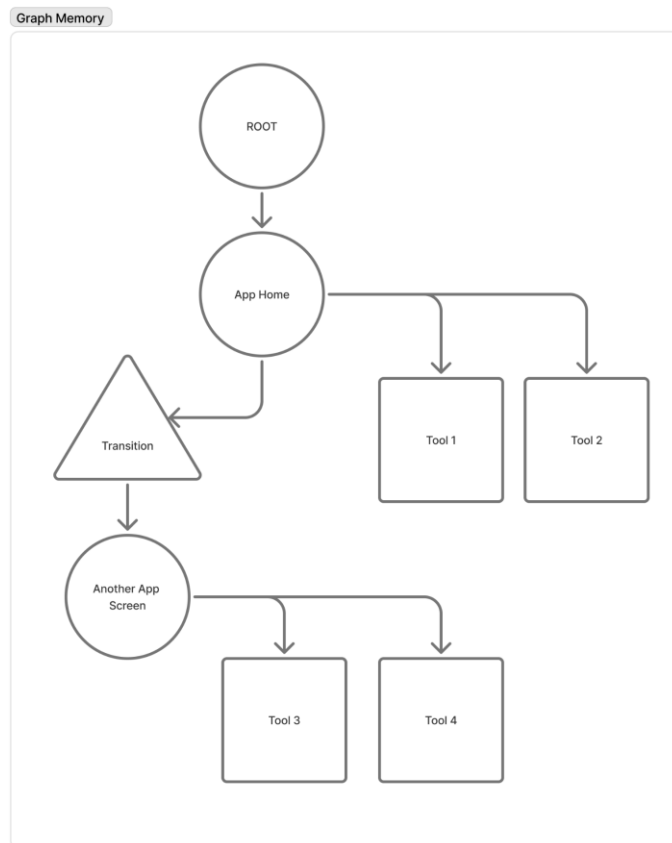


Рисунок 1 – Графова пам'ять агента

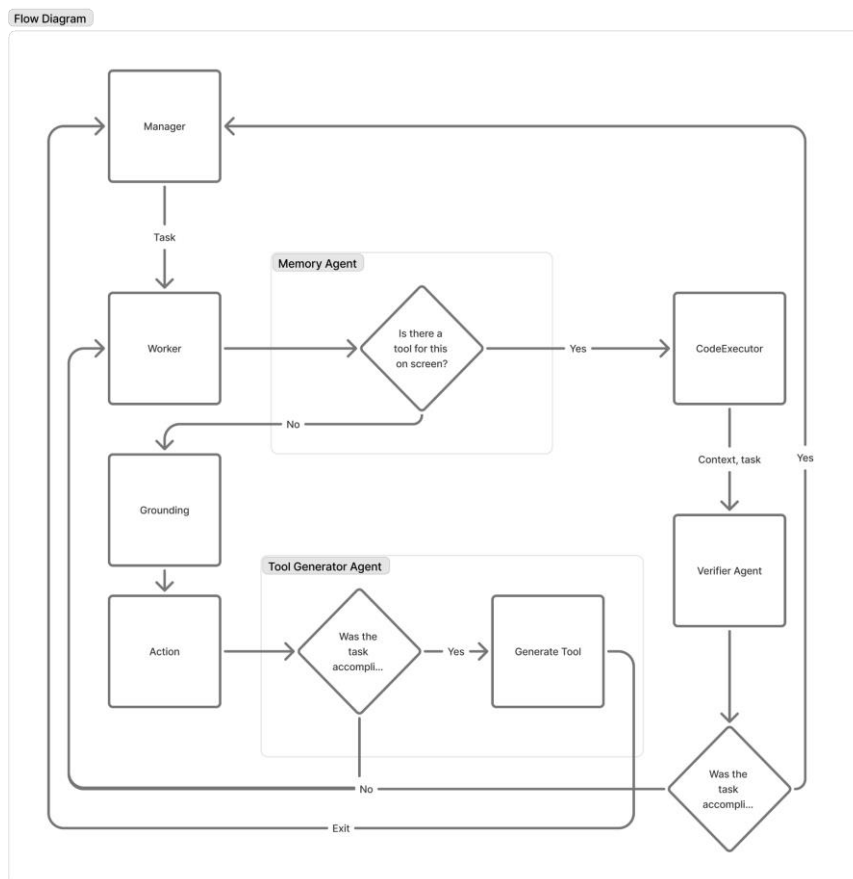


Рисунок 2 – Діаграма виконання завдання

Експерименти проведено на наборі OSWorld, що містить понад 300 реальних завдань у настільних і веб-застосунках. Порівняно з базовою моделлю Agent S2 (S2-Base), запропонований агент S2-Мем показав: зменшення споживання токенів LLM на $\approx 48\%$; скорочення часу виконання завдань удвічі (на 15-крокових – з 73 с до 34 с); збереження або підвищення точності виконання.

Особливо помітний ефект спостерігався при повторенні схожих підзадач, коли агент міг відтворювати дії без повторного міркування. Після накопичення пам'яті агент демонстрував майже «людську», швидкість виконання знайомих операцій.

Performance Comparison: Cost and Latency

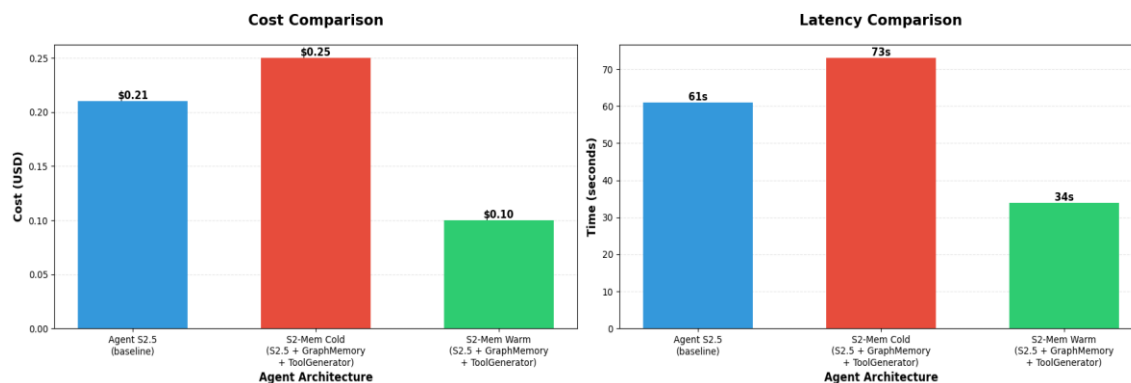


Рисунок 3 – Порівняння ефективності базового агента та агента з пам'яттю

Отримані результати підтверджують, що графова пам'ять дає змогу агенту не лише повторно використовувати знання, а й структурувати їх у вигляді взаємопов'язаних «навичок». Це створює підґрунтя для розвитку адаптивних агентів, які з часом накопичують досвід і стають ефективнішими. Водночас постають виклики, зокрема – розпізнавання відомих екранів при незначних змінах інтерфейсу, масштабування графа та підтримка його актуальності. Для вирішення цих проблем пропонується використання векторних індексів, семантичного пошуку та автоматичного «очищення», пам'яті.

У перспективі розглядається можливість спільної пам'яті між агентами, що дозволить обмінюватися знаннями, утворюючи колективну базу досвіду – подібно до бібліотеки функцій у програмуванні.

Висновки. Запропонована графова архітектура пам'яті для агентів комп'ютерного використання на основі LLM забезпечує ефективне повторне використання досвіду та суттєво підвищує продуктивність систем. Інтеграція графової пам'яті в архітектуру Agent S2 продемонструвала зниження обчислювальних витрат на 50–60 % без втрати точності виконання. Подальші напрями дослідження включають: створення спільної пам'яті між агентами для обміну навичками; підвищення стійкості до змін інтерфейсу користувача; впровадження механізмів автоматичного оновлення графа при виявленні помилок або змін середовища. Таким чином, графова пам'ять наближає LLM-агентів до концепції самонавчальної цифрової істоти, здатної з часом формувати й удосконалювати власні знання.

Перелік посилань:

1. Wang J., Wang X., Ma S., et al. A Comprehensive Survey of Agents for Computer Use: Foundations, Challenges, and Future Directions. arXiv preprint. 2025. arXiv: 2501.16150.
2. Wen H., Li Y., Liu G., et al. Explore, Select, Derive, and Recall: Augmenting LLM with Human-like Memory for Mobile Task Automation. arXiv preprint. 2023. arXiv: 2312.03003.
3. Zhang C., Zhao L., Wang B., et al. AppAgentX: Evolving GUI Agents as Proficient Smartphone Users. arXiv preprint. 2025. arXiv: 2503.02268v1.
4. Niu Y., Li S., Gong Y., et al. PyAgent S2: A Compositional Generalist-Specialist Framework for Computer Use Agents. arXiv preprint. 2025. arXiv: 2504.00906.
5. Xie T., Zhang D., Chen J., et al. OSWorld: Benchmarking Multimodal Agents for Open-Ended Tasks in Real Computer Environments. arXiv preprint. 2024. arXiv: 2404.07972.

¹ Аспірант 3 курсу Макарчук А. В.¹ Проф., д.т.н. Барабаш О. В.<https://scholar.google.com/citations?user=PCPdRKwAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВВЕДЕННЯ НОВОГО СТРУКТУРНОГО ПОКАЗНИКА ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ ТА ЙОГО КОМБІНАТОРНА ОЦІНКА

Постановка проблеми та її актуальність. Багато показників функціональної стійкості формуються на основі тих чи інших аспектів топології багатомашинних систем. Головною проблемою більшості з них є той факт, що для їх точного обчислення необхідним є володіння алгоритмами на графах, що наразі є не дуже поширеним. Тому необхідно розробити такий показник функціональної стійкості багатомашинних систем, обчислення якого не потребувало б володіння алгоритмами типу алгоритмів на графах.

Аналіз останніх досліджень. Наразі існує ряд так званих структурних показників функціональної стійкості [1] багатомашинних систем, які зводяться до опису певних аспектів топології розглядуваної багатомашинної системи. Однак, із-за необхідності використання складних розрахунків при точному обчисленні цих показників виникла необхідність в розробці методів їх наближеного обчислення. Так, наприклад, в [1] після введення нового показника функціональної стійкості зразу ж ведеться спроба розробки регресійної моделі, яка б його оцінювала. В [2] описано дослідження можливостей застосування нейронних мереж для оцінки ймовірності зв'язності. Як показують отримані результати, отримані в цьому дослідженні, нейронні мережі справляються з цією задачею лише частково. В [3] ж досліджується можливість використання ансамблевих моделей машинного навчання для оцінки показників функціональної стійкості, однак точність, як і в попередніх випадках, важко назвати задовільною. Тому логічним постає питання про те, а чи можна сформулювати такий показник функціональної стійкості багатомашинних систем, який би для обчислення не вимагав володіння алгоритмами, складними з точки зору обчислювальної складності?

Формулювання мети. Сформулювати показник функціональної стійкості багатомашинних систем, для точного обчислення якого непотрібно володінням спеціальних алгоритмів типу алгоритмів на графах.

Основна частина. Покладемо, що топологію розглядуваної багатомашинної системи можна представити у вигляді графа G з n вершинами та m ребрами. Вважатимемо, що дана багатомашинна система є функціонально стійкою, якщо для того, щоб граф G став незв'язним, у ньому треба видалити більше одного ребра та більше однієї вершини. Таким чином, як показник функціональної стійкості можна ввести ймовірність ρ того, що для того, щоб «зробити» граф G незв'язним, необхідно в ньому видалити більше одного ребра та більше однієї вершини.

Нехай p_c – це ймовірність того, що граф G стане незв'язним, якщо в ньому видалити одне ребро, а p_m – це ймовірність того, що граф G стане незв'язним, якщо в ньому видалити одну вершину. Тоді можна показати, що ймовірність ρ може бути обчислена за формулою

$$\rho = (1 - p_c)(1 - p_m)$$

З другої сторони, можна показати, що ймовірності p_c та p_m можуть бути обчислені за формулами

$$p_c = p_c(n, m) = \begin{cases} 1, & m < n-1 \\ 0, & m > \frac{n^2 - 3n + 4}{2} \\ \frac{A(n, m)}{C(n, m)}, & n-1 \leq m \leq \frac{n^2 - 3n + 4}{2} \end{cases}$$

та

$$p_m = p_m(n, m) = \begin{cases} 1, & m < n-1 \\ 0, & m > \frac{n^2 - 3n + 4}{2} \\ \frac{B(n, m)}{C(n, m)}, & n-1 \leq m \leq \frac{n^2 - 3n + 4}{2} \end{cases},$$

де

$$A(n, m) = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^{n-1} C_n^k k(n-k) \sum_{\substack{m_1, m_2=0,1,2,\dots \\ m_1+m_2=m-1}} c(k, m_1) c(n-k, m_2),$$

$$B(n, m) = n \sum_{r=2}^{n-1} \sum_{\substack{\forall i=1,2,\dots,r: k_i=0,1,2,\dots \\ \sum_{i=1}^r k_i=n-1}} \frac{(n-1)!}{\prod_{k_i} k_i!} \sum_{\substack{\forall i=1,2,\dots,r: m_i=0,1,2,\dots \\ \sum_{i=1}^r m_i=m}} \prod_{i=1}^r c(k_i+1, m_i),$$

$$C(n, m) = c(n, m),$$

$$c(n, m) = C_{C_n^2}^m - \sum_{k=1}^{n-1} C_{n-1}^{k-1} \sum_{i=k-1}^{\min(m, C_k^2)} C_{C_{n-k}^2}^{m-i} c(k, i), \quad c(2, 1) = 1.$$

Таким чином, ми отримуємо новий показник функціональної стійкості багатомашинної системи, який можна оцінити лише по кількості машин в системі та кількості каналів зв'язку між цими машинами.

Висновки. В дослідженні введено новий структурний показник функціональної стійкості багатомашинних систем. Як показав аналіз цього показника, його можна оцінити, знаючи лише кількість машин в розглядуваній системі та кількість каналів зв'язку між ними. Попри складність отриманої оцінки, неї можна алгоритмізувати і, як наслідок, реалізувати програмно.

Перелік посилань:

1. Барабаш О. В., Макачук А. В. Розроблення нового показника функціональної стійкості та його оцінювання за допомогою багатовимірної поліноміальної регресії. Сучасні інформаційні технології. 2024. № 1(3). С. 57–64. DOI: 10.17721/AIT.2024.1.06.
2. Барабаш О. В., Макачук А. В., Миронюк М. Ю., Майстров О. О. Метод і алгоритм обчислення мінімальної та максимальної ймовірності зв'язності за допомогою машинного навчання. Зв'язок. 2025. № 2. С. 50–58. DOI: 10.31673/2412-9070.2025.025563.
3. Barabash O., Makarchuk A., Open'ko P., Korotin S. Application of SVM, FFNNs, k-NN and Their Ensembles for Identifying Functionally Reliable Systems. Axioms. 2025. Vol. 14, No. 4. Art. 237. DOI: 10.3390/axioms14040237.

¹ Аспірант 3 курсу Савко В. Я.

² Д-р філос. Старовіт І. С.

¹ Д-р філос. Гуров Д. І.

¹ Проф., д.т.н. Гаврилко Є. В.

https://scholar.google.com/citations?user=3GLi_AwAAAAJ&hl=ru

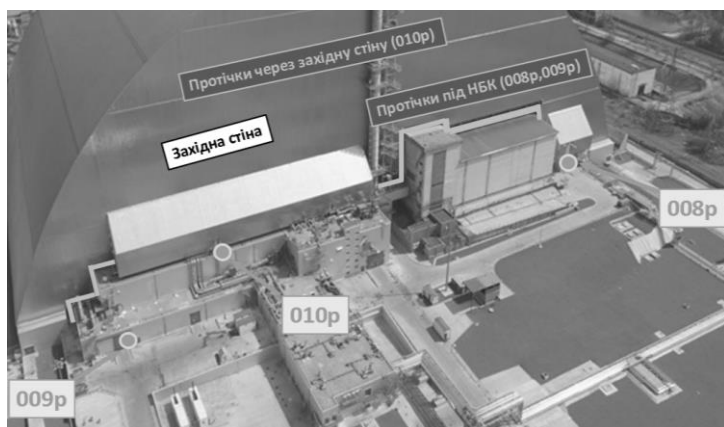
² Проф., д.т.н. Круковський П. Г.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

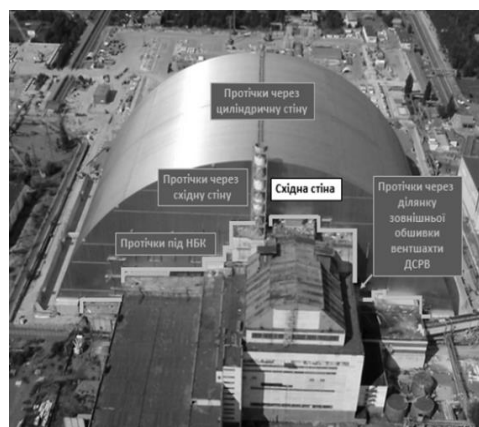
² Інститут технічної теплофізики НАН України

МЕТОДОЛОГІЯ НАУКОВОГО СУПРОВОДУ ГАЗОДИНАМІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ НБК ЧАЕС НА ОСНОВІ ФІЗИКО-МАТЕМАТИЧНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Забезпечення екологічної безпеки комплексу НБК-ОУ протягом 100 років експлуатації потребує безперервного наукового супроводу – системи заходів для підтримки проектних параметрів. Найкритичнішим є контроль перепадів тиску для запобігання викидам радіоактивних аерозолів (РА). Існуюча система вентиляції має суттєві обмеження: використання середньодобових значень (що нівелює вплив короткочасних змін вітру), недостатнє просторове охоплення моніторингом (відсутність контролю на східній стороні, рис. 1) та напівавтоматичне регулювання. Це створює ризики неорганізованих викидів РА, особливо під час демонтажних робіт.



а



б

Рисунок 1 – Розташування місць протічок повітря з РА в навколишнє середовище для різних сторін НБК, а також місця розташування 3-х датчиків перепаду тиску:

а – на західній; б – на східній

Аналіз останніх досліджень. У попередніх роботах [1, 2] досліджено динаміку концентрації РА та термогазодинамічний стан об'єкта. У роботах [3, 4] ідентифіковано місця неорганізованих викидів і запропоновано математичне забезпечення керування вентиляцією. Водночас не вирішено задачі оперативного коригування параметрів моделі відповідно до змін фізичного стану конструкцій та автоматичного калібрування площ протічок на основі зворотних задач, що обмежує точність прогнозування газодинамічного стану в реальному часі.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка методології наукового супроводу газодинамічних параметрів НБК ЧАЕС на основі фізико-математичного моделювання, що забезпечує усунення неорганізованих викидів радіоактивних аерозолів шляхом

оптимального керування вентиляцією з автоматичним калібруванням моделі за даними моніторингу.

Основна частина. Для подолання обмежень існуючої системи запропоновано гідравлічну модель комплексу, що базується на рівняннях Бернуллі та балансу мас (вузлова модель з зосередженими параметрами). Модель описує перетоки повітря між основними об'ємами (Основний об'єм, Кільцевий простір) та через неконтрольовані протічки (рис. 2). Оскільки граничні умови (тиск вітру на поверхні) є критично важливими та змінними, для їх визначення застосовано CFD-моделювання обтікання Арки [2, 3], що забезпечило коректний розподіл тисків на всіх стінах.

Авторська модифікація полягає в інтеграції цих моделей у систему цифрового двійника, де відбувається циклічне автоматичне оновлення параметрів (наприклад, площ протічок) шляхом розв'язання зворотної задачі при перевищенні допустимої похибки між розрахунковими та експлуатаційними даними [5]. Це забезпечує адаптацію моделі до фізичних змін конструкцій об'єкта.

Запропонована методологія дозволяє отримувати цілісну оцінку гідравлічного стану НБК-ОУ в умовах недостатнього інструментального контролю [1, 2]. Доведено, що оптимальне керування вентиляцією на основі моделі дозволяє повністю усунути неорганізовані викиди РА, чого не забезпечує чинний регламент. Розроблено архітектуру цифрового двійника, що включає комплексне моделювання (вузлові моделі + CFD) [5], автоматичну калібровку параметрів та оптимальне керування.

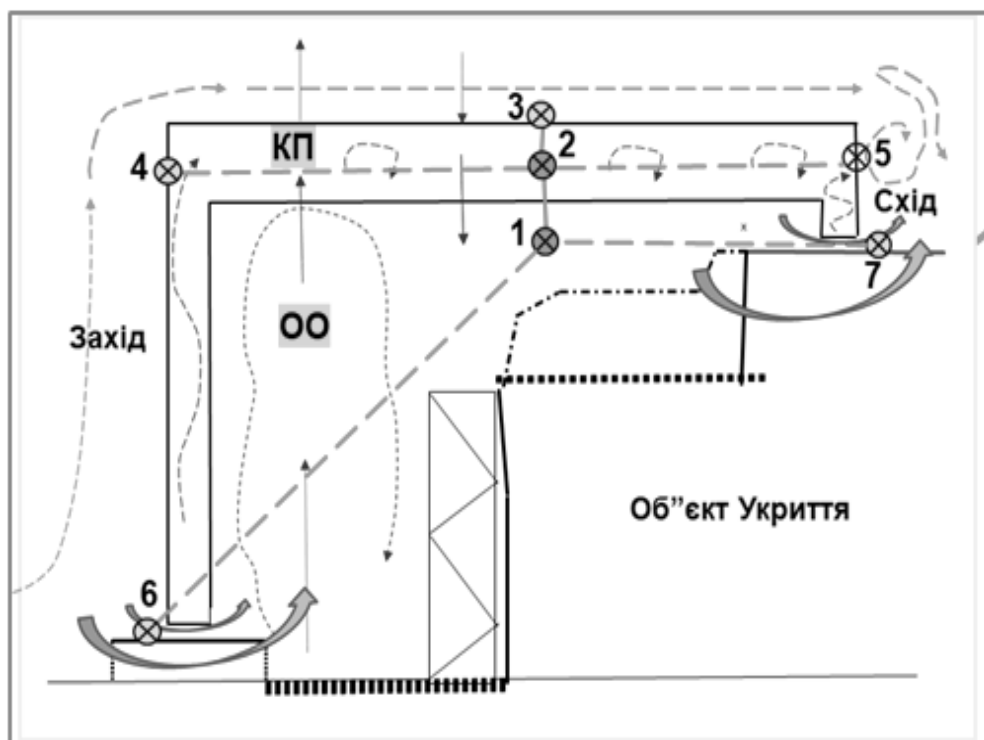


Рисунок 2 – Гідравлічна модель з зосередженими параметрами:

- 1 – основний об'єм; 2 – кільцевий простір; 3 – циліндрична стіна; 4 – західна стіна;
5 – східна стіна; 6 – західний зазор; 7 – східна стіна

Запропонована методологія передбачає інтеграцію моделей у систему цифрового двійника, де відбувається циклічне автоматичне оновлення параметрів (наприклад, площ протічок) шляхом розв'язання зворотної задачі при перевищенні допустимої похибки між розрахунковими та експлуатаційними даними. Це забезпечує адаптацію моделі до фізичних змін конструкцій об'єкта [3].

Висновки. Розглянуто методологічні засади довготривалого наукового супроводу експлуатації Нового Безпечного Конфайнмента (НБК) ЧАЕС. Виявлено критичні недоліки існуючої системи моніторингу та керування вентиляцією, що базуються на усереднених показниках. Запропоновано комплексний підхід до моделювання гідравлічного стану об'єкта, що поєднує моделі зосереджених параметрів та CFD-розрахунки для визначення граничних умов. Обґрунтовано переваги оптимального алгоритму керування вентиляцією, який забезпечує уникнення неорганізованих викидів радіоактивних аерозолів.

Наукова новизна отриманих результатів полягає у:

- вперше запропонованому комплексному підході до моделювання газодинаміки НБК, що поєднує вузлові моделі з CFD-розрахунками для визначення граничних умов
- розробці методу автоматичної калібровки параметрів моделі на основі розв'язання зворотних задач, що дозволяє адаптувати модель до поточних змін конструкцій;
- обґрунтуванні алгоритму оптимального керування вентиляцією, який гарантовано запобігає неорганізованим викидам радіоактивних аерозолів.

Можливості використання: результати можуть бути використані для створення цифрового двійника НБК-ОУ, вдосконалення системи вентиляції та наукового супроводу експлуатації об'єкта. Подальші дослідження будуть спрямовані на адаптацію моделей до поточного стану об'єкта після пошкоджень, завданих внаслідок воєнних дій.

Перелік посилань:

1. Динаміка зміни концентрації радіоактивних аерозолів під час вилучення паливовміщуючих матеріалів з об'єкта «Укриття» / В. Г. Батій, А. О. Сізов, Д. В. Федорченко, А. О. Холодюк // Ядерна та радіаційна безпека. – 2015. – Вип. 4. – С. 41–44. – URL: http://nbuv.gov.ua/UJRN/ydpb_2015_4_10.
2. Krukovskiy P. G., Metel M. O., Polubinskiy A. S., Krasnov V. A., Sklsarenko D. I., Deineko A. I.. Model of thermogasdynamic, humid and radiation state of the new safe confinement and the “Shelter” Object // II International Conference “International Conference on Nuclear Decommissioning and Environment Recovery” INUDECO. April 25–27, 2017, Slavutych, Ukraine, p. 347–350.
3. Krukovskiy P. G., Dyadyushko E. V., Sklyarenko D. I., Starovit I. S.. Unorganized emissions of air with radioactive aerosols from the new safe confinement of the Chernobyl Nuclear Power Plant into the surrounding environment. Issues of atomic science and technology, 6, 2017 181–186.
4. Pysmennyy Y., Havrylko Y., Krukovskiy P., Starovit I., Diadiushko Y. Development of special mathematical software for controlling the ventilation units of the new safe confinement of the ChNPP, Nuclear & radiationsafety, 2(94), 2022, 35–43.
5. Гаврилко Є. В., Круковський П. Г., Старовіт І. С., Савко В. Я. Науковий супровід довготривалої підтримки проєктних параметрів газодинамічного стану НБК 2025.

АРХІТЕКТУРНІ ОСОБЛИВОСТІ ВИКОРИСТАННЯ SAP BTP КУМА ТА CLOUD FOUNDRY У КОРПОРАТИВНИХ ХМАРНИХ РІШЕННЯХ

Постановка проблеми та її актуальність. Розвиток корпоративних інформаційних систем супроводжується переходом до хмарних архітектур, мікросервісних підходів і контейнеризованих моделей розгортання. У середовищі великих підприємств виникає потреба створення гнучких розширень ERP-систем, інтеграційних сервісів та окремих прикладних компонентів, що функціонують поза межами монолітного ядра та мають забезпечувати масштабованість, відмовостійкість і швидке оновлення.

Платформа SAP Business Technology Platform (SAP BTP) надає декілька середовищ виконання для реалізації таких рішень, зокрема Cloud Foundry та Кума [1, 2]. Незважаючи на спільну орієнтацію на хмарну модель, ці середовища відрізняються архітектурною концепцією, рівнем абстракції та механізмами управління ресурсами. У практиці проєктування корпоративних рішень постає задача обґрунтованого визначення середовища розгортання, оскільки помилковий вибір може призвести до надлишкової складності архітектури або обмежень у масштабуванні та інтеграції.

Актуальність дослідження зумовлена необхідністю систематизації відмінностей між зазначеними середовищами та формування підходу до їх вибору з урахуванням характеристик прикладної системи та організаційного контексту.

Аналіз останніх досліджень. У наукових і прикладних джерелах розглядаються два домінуючі підходи до розгортання хмарних застосунків: платформа як сервіс (PaaS) та Kubernetes-орієнтована контейнерна оркестрація [3, 4]. PaaS-модель передбачає високий рівень автоматизації життєвого циклу застосунку та мінімізацію інфраструктурних налаштувань, тоді як Kubernetes-підхід забезпечує гнучкі механізми конфігурації, масштабування та мережевої ізоляції.

У межах SAP BTP ці підходи реалізовано відповідно у середовищах виконання Cloud Foundry та Кума. Перший орієнтований на спрощене керування застосунками за рахунок абстрагування інфраструктури, другий – на використання стандартних механізмів Kubernetes із розширеними можливостями контролю та інтеграції. Водночас у доступних джерелах відсутня формалізована модель вибору між зазначеними середовищами з позиції корпоративної архітектури, що зумовлює потребу подальшого дослідження.

Формулювання мети. Метою роботи є дослідження архітектурних особливостей середовищ SAP BTP Кума та Cloud Foundry у контексті розгортання корпоративних хмарних застосунків, визначення їхніх функціональних та експлуатаційних відмінностей, а також розроблення формалізованої моделі вибору середовища виконання з урахуванням технічних, організаційних та інтеграційних характеристик IT-архітектури підприємства.

Основна частина. Середовище виконання Cloud Foundry у складі SAP BTP реалізує PaaS-модель [2, 3], у якій значна частина інфраструктурних аспектів абстрагується від розробника. Розгортання застосунків здійснюється через стандартизований механізм, що автоматизує конфігурацію середовища, маршрутизацію, масштабування та моніторинг. Такий підхід зменшує складність DevOps-процесів і є доцільним для розроблення прикладних сервісів із передбачуванним навантаженням та помірною інтеграційною складністю.

Середовище виконання Кума базується на Kubernetes і надає розширений контроль над контейнерною інфраструктурою [1, 4]. Розгортання виконується із використанням стандартних ресурсів Kubernetes, що забезпечує гнучке керування масштабуванням, мережевими політиками, конфігураціями контейнерів та подієвими механізмами. Це середовище є доцільним для складних мікросервісних систем, інтеграційних рішень і сценаріїв, що потребують тонкого налаштування ресурсів.

Таким чином, відмінність між середовищами полягає насамперед у рівні абстракції та ступені контролю над інфраструктурою: Cloud Foundry мінімізує інфраструктурні рішення, тоді як Кума надає розширені можливості їх конфігурації.

Вибір середовища розглядається як багатокритеріальна задача прийняття рішення. Нехай множина альтернатив:

$$E = \{E_1, E_2\} = \{Кума, CF\}. \quad (1)$$

Визначимо множину критеріїв:

$$K = \{C, S, I, D, O\}, \quad (2)$$

де C – складність системи, кількість сервісів, взаємодій та архітектурних залежностей;

S – вимоги до масштабованості, еластичності та керування ресурсами;

I – інтеграційна насиченість, кількість API, подієвих механізмів і зовнішніх сервісів;

D – рівень DevOps-зрілості, наявність автоматизованого CI/CD та компетенцій з контейнерної оркестрації;

O – операційні витрати, складність адміністрування та витрати на підтримку середовища.

Кожному критерію ставиться у відповідність вага ω_i , які відображають стратегічні пріоритети організації та відносну значущість відповідних критеріїв при виборі середовища виконання. Їх значення визначаються архітектурним комітетом або технічною стратегією підприємства та можуть бути нормалізовані таким чином, щоб

$$\omega_i \geq 0, \sum_{i=1}^5 \omega_i = 1. \quad (3)$$

Якщо організація орієнтована на розвиток мікросервісної архітектури з активним використанням подієвих механізмів та має зрілу DevOps-команду, ваги можуть бути розподілені, наприклад, так:

$$\omega_1 = 0,25, \omega_2 = 0,20, \omega_3 = 0,25, \omega_4 = 0,20, \omega_5 = 0,10.$$

Інтегральна оцінка середовища визначається як зважена сума:

$$Score(E_j) = \sum_{i=1}^5 \omega_i \cdot f_i(E_j), \quad (4)$$

де $f_i(E_j) \in [0, 1]$ – нормалізована оцінка відповідності середовища E_j відповідному критерію.

Оптимальним є середовище, для якого значення інтегральної оцінки $Score(E_j)$ є максимальним серед розглянутих альтернатив.

Розглянемо проєкт із високою інтеграційною складністю та мікросервісною архітектурою. Експертні оцінки в табл. 1 відображають нормалізовану відповідність кожного середовища вимогам конкретного проєкту. Значення інтерпретуються як ступінь придатності середовища до реалізації відповідного критерію. Вищі оцінки Кума за критеріями складності (C), масштабованості (S) та інтеграційної насиченості (I) зумовлені використанням Kubernetes-механізмів, що забезпечують гнучке керування ресурсами та

мережею. Натомість Cloud Foundry отримує вищі значення за критеріями DevOps-зрілості та операційних витрат завдяки більшому рівню абстракції та автоматизації інфраструктурних процесів. Таким чином, числові значення відображають не абсолютні характеристики платформ, а їхню відносну відповідність вимогам конкретного архітектурного сценарію.

Таблиця 1 – Порівняльна оцінка середовищ Kyma та Cloud Foundry за обраними критеріями

Критерій	Kyma	Cloud Foundry
<i>C</i>	0,9	0,6
<i>S</i>	0,8	0,6
<i>I</i>	0,9	0,5
<i>D</i>	0,7	0,8
<i>O</i>	0,5	0,8

Інтегральні оцінки середовища за формулою (4) відповідно рівні $Score(Kyma) = 0,80$, $Score(CF) = 0,64$. Оскільки $Score(Kyma) > Score(CF)$, модель рекомендує використання Kyma для даного архітектурного сценарію. У застосунку з нижчим рівнем архітектурної складності (наприклад, REST-сервісу з обмеженою інтеграцією та невисокими вимогами до масштабування) значення *C*, *S*, *I* будуть нижчими, що призведе до зростання інтегральної оцінки Cloud Foundry.

Висновки. У роботі проаналізовано архітектурні особливості середовищ SAP BTP Kyma та Cloud Foundry у контексті розгортання корпоративних хмарних застосунків. Встановлено, що ключова відмінність між ними полягає у рівні абстракції та ступені контролю над інфраструктурою: Cloud Foundry орієнтований на спрощене керування застосунками та зниження операційної складності, тоді як Kyma забезпечує розширені можливості конфігурації та інтеграції на основі Kubernetes.

Запропонована багатокритеріальна модель дозволяє формалізувати процес вибору середовища виконання з урахуванням технічних та організаційних чинників. Її застосування сприяє переходу від інтуїтивного архітектурного рішення до структурованого обґрунтованого вибору, адаптованого до стратегічних цілей підприємства.

Перелік посилань:

1. SAP SE. SAP Business Technology Platform. Kyma environment. URL: <https://help.sap.com/docs/btp/sap-business-technology-platform/kyma-environment> (дата звернення 25.02.2026).

2. SAP SE. SAP Business Technology Platform. Cloud Foundry environment. URL: <https://help.sap.com/docs/btp/sap-business-technology-platform/cloud-foundry-environment> (дата звернення 25.02.2026).

3. Cloud Foundry Foundation. Cloud Foundry Documentation. URL: <https://docs.cloudfoundry.org/> (дата звернення 25.02.2026).

4. The Linux Foundation. Kubernetes Documentation. URL: <https://kubernetes.io/docs/home/> (дата звернення 25.02.2026).

¹ Мол. вчений Оленєва К. М.

¹ Доц., к.т.н. Шпурик В. В.

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВИКОРИСТАННЯ НАУКИ ПРО ДАНІ ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ПИТАНЬ УПРАВЛІННЯ ПРОЄКТАМИ З РОЗРОБКИ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. Управління проєктами несе відповідальність за всі зміни нових ідей у світі. Проєкти використовуються для впровадження нових технологій, тому природно, що в умовах сьогодення управління проєктами має бути предметом нових технологій з використанням штучного інтелекту (ШІ).

Найбільший виклик для проєктного менеджера (Project Manager, PM) – це реалізувати проєкт у повному обсязі, вчасно та в межах виділеного бюджету. Проєкти можуть запізнюватися, перевищувати бюджет і ними інколи важко керувати. Високий відсоток невдач і низька продуктивність проєкту негативно впливають на кінцевий результат і репутацію команди. Проєкти провалюються через недосконалі проєктні процеси, тому доцільним є впровадження ШІ на різних етапах роботи над проєктом, у різні процеси проєктної діяльності, що дозволить покращувати ці процеси, досягати кращих результатів і швидше та за можливості повністю їх автоматизувати, незалежно від типу проєкту. Існує багато досліджень [1] про те, чому проєкти зазнають невдачі, але найбільш цікавим є питання про те, як знайти способи зробити їх успішними. Аналіз проєктних процесів призводить до висновків: як саме ШІ може вписатись в методологію проєкту.

Аналіз останніх досліджень. Існує різноманітна статистика про відсоток невдач проєктів. Одне опитування показує, що 68 % проєктів у сфері інформаційних технологій (ІТ) зазнають невдач, а 70 % організацій мають принаймні один невдалий проєкт за попередні 12 місяців [1]. У 2013 році менше 33 % проєктів було завершено вчасно та в рамках бюджету, і на кожен мільярд доларів, інвестований у проєкти в Сполучених Штатах, 122 мільйони доларів було витрачено даремно через низьку ефективність проєктів [2]. Яким би не було джерело інформації, загальний рівень успіху проєктів набагато менший за 50 %. Одне дослідження показало, що з 81 транзитного проєкту США, завершеного між 1987 і 2018 роками, 77 % перевищили початковий бюджет [3]. Історія мегапроєктів, бюджет яких перевищує один мільярд доларів, показує, що 90% мають перевитрати щонайменше на 50 % [4]. Невдача проєкту створює проблеми з фінансуванням, фінансові втрати, знищення довіри клієнтів, негативну рекламу, ризик погіршення конкурентної переваги та занепокоєння зацікавлених сторін проєкту [5]. Виходячи з будь-яких показників успішності проєктів, машинне навчання (Machine Learning, ML) та рішення обробки природніх мов (Natural language processing, NLP) для управління проєктами не можуть виникнути досить швидко. За оцінками, у світі налічується 16,5 мільйонів PM, і вони повинні прийняти цю нову технологію [6].

Інститут управління проєктами (PMI) використовує PMBOK як посібник для PM. Добре мати узагальнений процес управління проєктами, але всі проєкти різні і процеси відповідно різняться. Так само PM доводиться користуватись різними методологіями або частіше гібридними підходами [8]. Організації вибирають те, що вони вважають найкращим з кожного процесу, і, на жаль, не завжди влучно.

Формулювання мети. У роботі розглядається можливість покращення процесів проєктного менеджменту за допомогою науки про дані (Data Science, DS) та ШІ.

Оскільки управління проєктами може здійснюватися за різними методологіями, особливо необхідним є огляд процесів Agile з точки зору використання методів DS і їх впливу на вдосконалення всіх аспектів методології. Використання методів DS – це можливість значно збільшити шанси на успішне завершення проєкту. РМ повинні керувати змінами, і допомога DS має стати невід’ємною частиною методології проєкту.

ІІІ можна застосувати до середовища проєкту для забезпечення позитивних кінцевих результатів. Програмне забезпечення (ПЗ) з ІІІ має трансформувати поточні процеси управління проєктами для того, щоб РМ могли отримати значно покращені показники проєктів (зокрема, їх успішності), простіше та у кращі терміни.

Основна частина. ІІІ змінює процеси проєктів і, безумовно, змінює те, як люди думають про проєкти та керують ними. Існує думка, що ІІІ лише «автоматизує» завдання, та це лише частково правда. З розвитком нових програмних можливостей ІІІ, стає все більш очевидним те, що проєктами неможливо продовжувати керувати традиційними способами. Покращення продуктивності проєкту означає менше витрачених ресурсів, підвищення стійкості, зниження рівня стресу для команди проєкту, збільшення кількості успішно завершених проєктів і загалом більше позитивних результатів. ІІІ може визначати індивідуальні процеси, які забезпечують успішний результат для кожного типу та розміру проєкту. Також, методології проєкту, які значно відрізняються залежно від галузі, можуть мати спільні проблеми, такі як планування ризиків і ресурсів, але за допомогою ІІІ можна спростити та зробити вибір методології більш оптимальним.

Через необхідність змінити те, «як» здійснюється управління проєктами, виникає потреба у нових технологіях, скориставшись якими, є шанс збільшити ймовірність успіху проєкту. ІІІ поки що не в змозі повністю замінити РМ, але уже пропонує багато різноманітних і потужних можливостей. Наприклад, щоб отримати користь від проєкту РМ має розглянути всі наявні проблеми проєкту, одночасно відстежуючи зміни. Щоб підвищити продуктивність та якість цих процесів доцільно застосовувати ІІІ. РМ повинні витрачати більше часу на планування, тому що якісне планування призводить до більш плавної та точної реалізації. Щоб зменшити витрати часу та полегшити рутинну роботу цих процесів доцільно використовувати ІІІ. ІІІ можна застосовувати до обсягів, бюджету, графіків та інших критичних процесів проєкту, що призводить до підвищення ефективності та покращення продуктивності. Процес управління проєктом надає метрики, які можуть спонукати РМ вжити коригувальні дії. ІІІ в змозі покращити точність показників і допомогти проаналізувати тенденції. Показники управління заробленою вартістю стають більш цінними, коли їх аналізує ПЗ з ІІІ.

Висновок: ІІІ може надати переконливі аргументи для перегляду результатів і підстави для закриття проєкту. А під час завершення проєкту найважливішим завданням для підвищення ефективності використання ІІІ є перевірка того, що всі дані належним чином зібрані, проаналізовані, збережені та доступні для подальшого використання.

Використання DS в управлінні проєктами потребує розуміння математичної статистики та теорії ймовірностей, які є основою для поточного та майбутнього розвитку методів DS. В свою чергу управління даними є критично важливим елементом технології ІІІ. Дані важливі для всього ПЗ, але ще більше для алгоритмів ML на основі ІІІ. Важливо розуміти, як управління проєктами залежить від даних і що можна досягти результатів, лише якщо даними правильно керувати. Рішення на основі ІІІ базуються на методах ML, таких як контрольоване навчання, неконтрольоване навчання та навчання з підкріпленням. Знання того, як працюють ці три основні методи, дає розуміння того, як впровадження ІІІ в управління проєктами дозволить отримати кращі результати.

Виокремимо два найважливіші компоненти для управління проєктами – ML та NLP. Де ML – це здатність запрограмованого алгоритму навчитися розпізнавати та співвідносити шаблони в даних, а навчені алгоритми можна використовувати, щоб підвищити рівень успішності проєктів. У свою чергу NLP є першочерговим при взаємодії людини з ІІІ та забезпечує значне підвищення продуктивності, що включає можливості аналізу документів,

настроїв, переклад і взаємодію з віртуальним помічником. Поєднання ML та NLP призвело до потужної розробки, відомої як генеративний ШІ (Generative Artificial Intelligence, GenAI), який став реальною можливістю покращити продуктивність проєктної команди та проєктної діяльності загалом. І алгоритми такого ПЗ надають безліч нових можливостей для управління проєктами завдяки гнучкості технології.

Автоматизація, ML і DS змінюють роль РМ. Виходячи з цього набуття практичного досвіду, підвищення кваліфікації чи перепідготовка мають життєво важливе значення. А нові продукти, як ПЗ з ШІ, мають полегшити РМ аналіз великих даних, що включає можливість зіставляти дані для виявлення корінних причин проблем, можливість виконувати аналіз і можливість допомагати розставляти пріоритети завдань і етапів, щоб забезпечити максимальну цінність [8].

Висновки. Проєкт містить план, який, по суті, є стратегією досягнення результату. Під час реалізації проєкту виникають численні перешкоди, і для підтримки прогресу необхідно приймати правильні рішення. ПЗ з ШІ дає змогу працювати над проєктом ефективніше та досягати необхідних результатів вчасно та в межах бюджету. Таке ПЗ допомагає РМ приймати найкращі рішення в будь-якій ситуації. Постійні прогнози протягом усього проєкту підкреслюють здатність РМ вести проєкт в правильному напрямку. Проблеми проєкту можна усувати або зводити до мінімуму, оскільки вони включені в план ризиків або пом'якшені як частина стратегії проєкту ще до його початку. РМ може керувати проєктом за допомогою та під керівництвом добре навченого віртуального асистента проєкту, який розуміє логіку управління проєктом і способи прийняття правильних рішень, які призведуть до успішного результату проєкту.

Це лише деякі можливості застосування ШІ в управлінні проєктами, і більшість з них уже доступні зараз. Та очевидність їх розвитку спонукає вивчення та розробку все нових рішень в цьому напрямку.

Перелік посилань:

1. Krigsman M. (2009). Study: 68% of projects fail, ZDNet, January 14, 2009. URL: <https://www.zdnet.com/article/study-68-percent-of-it-projects-fail/>
2. Project Management Institute (PMI), (2018). Pulse of the profession survey. URL: <https://www.pmi.org/-/media/pmi/documents/public/pdf/learning/thought-leadership/pulse/pulse-of-the-profession-2018.pdf>
3. Gao N., and Touran A. (2020). Cost overruns and formal risk assessment program in US rail transit projects. *Journal of Construction Engineering and Management*, 146(5), 05020004.
4. Flyvbjerg B. and Gardner D. (2023). How big things get done: The surprising factors that determine the fate of every project, from home renovations to space exploration and everything in between. New York: Crown Currency.
5. Yim R., Castaneda J., Doolen T., Tumer I., & and Malak R. (2015). A study of the impact of project classification on project risk indicators. *International Journal of Project Management*, 33(4), 863–876.
6. Project management statistics: Everything you need to know. Project.co, retrieved December 22, 2023. URL: [https://project.co/project-management-statistics/..](https://project.co/project-management-statistics/)
7. Nieto-Rodriguez, A. (2021). Harvard business review project management handbook: how to launch, lead, and sponsor successful projects. Harvard Business Press. URL: <https://www.nytimes.com/2011/02/17/science/...html>
8. Project Management Institute (PMI), (2019). Analyzing the Future: 3 Ways Data Science Will Change Project Management. URL: <https://www.pmi.org/learning/library/analyzing-future-data-science-change-project-management-11491>.

СЕКЦІЯ № 10

**Інформаційні
технології та
комп'ютерне
моделювання**

¹ MS's programme 1st year Barbar V. V.

¹ Prof., doc.eng.sc. Shushura O. M.

<https://scholar.google.com/citations?user=beUGko0AAAAJ>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

AUTOMATION OF CRYPTO ASSET TRADING BASED ON ANALYSIS OF FUNDING RATES FOR EXCHANGE-TRADED DERIVATIVES

Statement of the problem and its relevance. Over the past decade, crypto assets have become a significant segment of the global financial market, characterised by high volatility and continuous trading. The rapid development of exchange infrastructure has led to the widespread use of perpetual futures contracts, where funding rates help maintain convergence between derivative and spot prices.

Significant differences in funding rates for the same asset on different exchanges create potential opportunities for cross-exchange arbitrage. At the same time, the practical implementation of such strategies is complicated by the need to process streaming data in real time, taking into account commissions, order execution delays, liquidity and the risk of unbalancing hedged positions.

In this regard, there is a pressing need to create an automated system capable of monitoring funding rates on multiple exchanges, assessing arbitrage potential while taking into account transaction costs and risks, and autonomously managing open positions in real time.

Analysis of the latest research. Recent studies in algorithmic cryptocurrency trading mainly focus on machine learning and deep learning models for short-term price prediction [1–3]. Although these approaches show potential, they remain sensitive to transaction costs and changing market conditions. Empirical research also confirms that arbitrage opportunities exist but require high system performance and strict risk management [4]. However, most existing solutions concentrate on price forecasting or single-exchange strategies, leaving the development of integrated real-time funding-based systems insufficiently explored.

Goal formulation. The objective of the work is to develop and study an automated trading system that implements a cross-exchange strategy based on the analysis of funding rates for perpetual derivatives.

To achieve this goal, the following tasks have been set:

- to implement a module for collecting market data from several exchanges in real time;
- ensure the storage of historical data and fast analytical processing;
- develop an algorithm for identifying arbitrage opportunities;
- implement a mechanism for synchronised opening and closing of hedged positions;
- introduce risk management mechanisms (stop-loss, delta exposure control, slippage limits) and a notification system;
- conduct experimental testing on historical and streaming data.

Main part. The implementation of a funding-based automated trading system requires combining financial strategy logic with real-time software architecture. Unlike speculative approaches focused on price prediction, this strategy exploits structural features of the perpetual derivatives market, particularly periodic funding payments.

Fig. 1 shows an example of an 8-hour interval for calculating and accruing the funding rate. During the interval (e.g., 00:00–08:00 UTC), the exchange accumulates the premium index values and forms the final rate, which is applied to open positions at 08:00 UTC. A similar procedure is repeated every 8 hours [5].

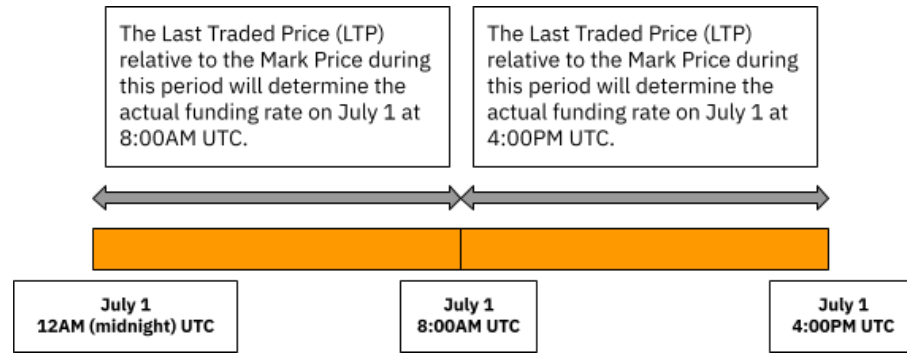


Figure 1 – Example of an 8-hour calculation and funding accrual interval

The funding payment is determined as the product of the nominal size of the open position and the funding rate applied at the time of accrual, and is calculated using formula (1).

$$FP = PS \cdot FR, \quad (1)$$

where FP – a funding payment, i.e. the amount of funds to be paid or received;

PS – a nominal size of the position, determined in the contract currency;

FR – a funding rate set for the corresponding accrual interval.

The actual funding result depends on market conditions and position size, therefore capital allocation and risk control remain essential components of the strategy.

If the funding rate is positive on one exchange and negative on another, opening opposite positions may generate a positive net effect if trading costs are covered. The system estimates expected funding income considering commissions, slippage, and time to settlement. A position is opened only when the projected result exceeds a predefined profitability threshold, preventing economically unjustified trades.

To ensure stable operation in volatile conditions, the system uses asynchronous data processing to collect information from multiple exchanges in parallel and reduce execution delays. The architecture follows modular and scalable design principles. The overall structure is shown in Fig. 2.

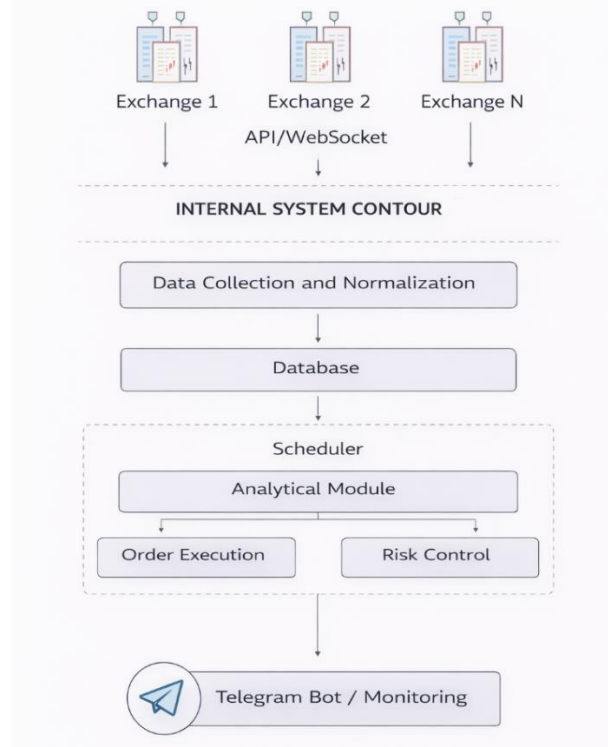


Figure 2 – Generalised system architecture

The external level interacts with cryptocurrency exchanges via API interfaces, receiving real-time information on contract prices, index values and funding rates. The data obtained is normalised and stored in a centralised database, which provides both historical analysis and real-time processing of streaming information.

To increase the speed of analytical operations, materialised representations are used, which aggregate the difference in funding rates between exchanges and generate pre-calculated indicators necessary for making trading decisions. This minimises delays in signal calculation and ensures system stability with high data update frequency.

The logic of the system's operation involves continuous monitoring of market parameters. At specified time intervals, the system checks for arbitrage opportunities. If the difference in rates, together with current market conditions, meets the set criteria, the system initiates the synchronised opening of two opposite positions on different exchanges. After opening, the status of positions is constantly monitored, including analysis of price changes, margin requirements, and time until the next funding accrual.

The task scheduler plays a special role, coordinating the execution of periodic operations: updating aggregate indicators, checking trading signals, synchronising with funding accrual time limits, and initiating position closing procedures. This ensures that the decision-making logic is consistent with the rules of the exchanges.

Risk management is integrated directly into the trading process. The system monitors total exposure, acceptable margin levels, possible price differences between exchanges, and potential technical connection failures. If the set limits are exceeded, positions are forcibly closed or new trades are suspended.

A Telegram bot is implemented as a monitoring and control interface. It provides information about active positions, funding rates, margin levels, and allows users to adjust strategy parameters or force close positions. Automated notifications are generated for key events such as position opening, funding accrual, or risk limit violations.

Conclusions. The proposed system of automated trading in crypto assets based on the analysis of funding rates for perpetual derivatives implements a comprehensive approach to cross-exchange arbitrage, combining the financial logic of the strategy with real-time software architecture. The developed architecture ensures coordinated interaction between data collection, analytics, order execution, time event planning, and monitoring system modules within a single software complex.

Further development of the research may be aimed at expanding the analytical capabilities of the system by integrating machine learning methods for forecasting funding rate dynamics, adaptive strategy parameter tuning, and position size optimisation, taking into account market volatility.

References:

1. Deep learning for algorithmic trading: A systematic review of predictive models and optimization strategies / M. S. M. Bhuiyan et al. Array. 2025. Vol. 26. P. 100390. URL: <https://doi.org/10.1016/j.array.2025.100390> (date of access: 27.02.2026).
2. Exploring Risk and Return Profiles of Funding Rate Arbitrage on CEX and DEX / W. Werapun et al. Blockchain: Research and Applications. 2025. P. 100354. URL: <https://doi.org/10.1016/j.bcra.2025.100354> (date of access: 27.02.2026).
3. Dixon M. F., Halperin I., Bilokon P. Machine Learning in Finance: From Theory to Practice. Springer, 2020. P. 32.
4. Katsiampa P., Corbet S., Lucey B. M. Volatility spillover effects in leading cryptocurrencies: A BEKK-MGARCH analysis. SSRN electronic journal. 2018. P. 5. URL: <https://doi.org/10.2139/ssrn.3232912> (date of access: 27.02.2026).
5. Introduction to funding rate. Cryptocurrency Exchange | Bybit. URL: <https://www.bybit.com/en/help-center/article/Introduction-to-Funding-Rate> (date of access: 27.02.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Козурак Т. С.¹ Доц., к.ф.-м.н. Донець А. Г.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=lDeYM00AAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ ЧЕРГИ У ВЕБЗАСТОСУНКАХ З ВИСОКИМ НАВАНТАЖЕННЯМ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні вебзастосунки функціонують в умовах постійного зростання кількості користувачів, збільшення обсягів передаваних даних та ускладнення бізнес логіки обробки запитів [1, 2]. Для більшості інформаційних систем характерні нерівномірні потоки звернень, наявність пікових навантажень та обмеженість обчислювальних ресурсів серверної інфраструктури. У таких умовах критичним фактором ефективності системи стає здатність обробляти запити без істотних затримок і втрати доступності сервісів. Недостатня пропускна здатність серверів або некоректна організація механізмів черг призводять до накопичення запитів, зростання часу відповіді та деградації якості обслуговування користувачів [3, 4]. Актуальність проблеми зумовлена широким поширенням високонавантажених вебплатформ у сферах електронної комерції, онлайн сервісів, потокового мультимедіа та інтерактивних інформаційних систем, для яких порушення стабільності роботи призводить до фінансових втрат та зниження довіри користувачів [3].

Незважаючи на значну кількість публікацій, присвячених теорії масового обслуговування та архітектурі розподілених систем, у практичних реалізаціях вебзастосунків часто застосовуються спрощені моделі оцінювання навантаження, які не враховують нерівномірність потоку запитів, змінність часу обслуговування та взаємний вплив компонентів системи. Недостатньо дослідженим залишається питання адаптації класичних моделей черг до умов сучасних вебархітектур з асинхронною обробкою запитів, кешуванням результатів та динамічним масштабуванням обчислювальних ресурсів [5]. У багатьох роботах відсутній зв'язок між аналітичними оцінками характеристик черги та результатами імітаційного моделювання, що ускладнює практичне використання таких підходів для проєктування реальних систем [3].

Аналіз останніх досліджень. Проблеми масштабування вебзастосунків та управління навантаженням активно досліджуються у працях, присвячених мікросервісній архітектурі, балансуванню навантаження та оптимізації обробки запитів. Практичні підходи до забезпечення стійкості високонавантажених систем демонструються у промислових рішеннях великих технологічних компаній, зокрема у платформах потокового мультимедіа та хмарних сервісах, що застосовуються у Netflix та Amazon Web Services [2, 4]. У наукових дослідженнях широко використовуються моделі типу M/M/1 та M/M/c для аналітичної оцінки середнього часу очікування у черзі та середньої довжини черги [5]. Водночас сучасні вебсистеми характеризуються наявністю паралельних черг, асинхронної обробки подій та нерівномірних потоків запитів, що знижує точність класичних моделей і потребує їх адаптації або доповнення імітаційними методами [3].

Формулювання мети. Метою роботи є розроблення та дослідження моделі комп'ютерного моделювання процесів черги у вебзастосунках з високим навантаженням з урахуванням нерівномірності потоку запитів, змінності часу обслуговування та можливостей масштабування серверних ресурсів з подальшою експериментальною перевіркою ефективності запропонованого підходу.

Основна частина. Для аналітичного опису процесів обслуговування запитів використано апарат теорії масового обслуговування на основі моделі М/М/1, для якої середній час очікування в черзі визначається співвідношенням [5]:

$$W_q = \frac{\lambda}{\mu(\mu - \lambda)}, \quad (1)$$

де λ – інтенсивність надходження запитів;

μ – середня інтенсивність обслуговування.

Інтенсивність надходження запитів λ характеризує середню кількість запитів, що надходять до системи за одиницю часу, тоді як параметр μ визначає середню кількість запитів, які сервер здатний обробити за той самий інтервал часу. Стабільність функціонування системи забезпечується за умови виконання нерівності $\lambda < \mu$, що гарантує відсутність необмеженого зростання довжини черги.

Середній час перебування запиту в системі визначається як [5]:

$$W = W_q + \frac{1}{\mu}. \quad (2)$$

Середня довжина черги описується залежністю [1]:

$$L_q = \frac{\lambda^2}{\mu(\mu - \lambda)}. \quad (3)$$

Показник L_q характеризує середню кількість запитів, що очікують обслуговування у черзі, і є важливим індикатором рівня завантаженості системи. Зі збільшенням відношення λ/μ значення L_q швидко зростає, що свідчить про наближення системи до стану перевантаження.

З метою наближення моделі до реальних умов функціонування вебзастосунку запропоновано модифікацію інтенсивності обслуговування шляхом урахування коефіцієнта паралельності серверних процесів, що відображає можливість одночасної обробки кількох запитів [1, 3]. Загальну структуру процесу обробки запитів у високонавантаженому вебзастосунку подано на рис. 1.

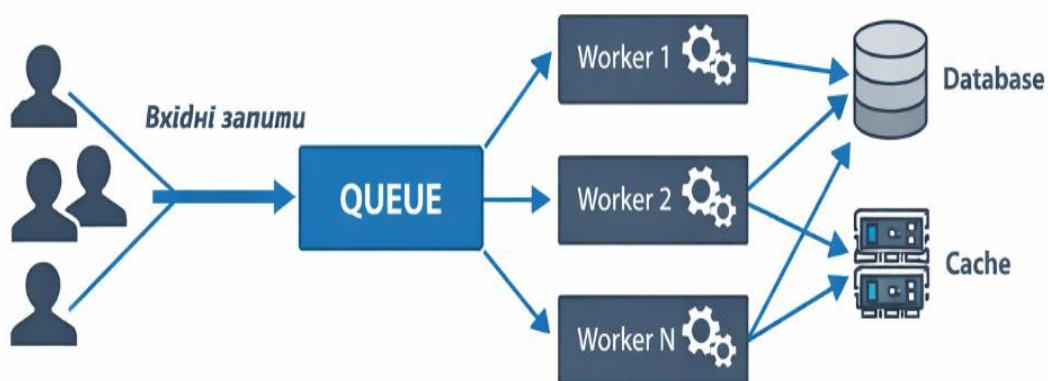


Рисунок 1 – Схема моделі черги обробки запитів у вебзастосунку з високим навантаженням

На представленій схемі потік вхідних запитів спочатку потрапляє до черги повідомлень, яка виконує функцію буферизації та балансування навантаження між обчислювальними процесами. Робочі процеси (workers) паралельно обробляють запити,

звертаючись до бази даних або системи кешування. Така архітектура дозволяє зменшити час очікування запитів і підвищити масштабованість вебзастосунку. У такій архітектурі черга повідомлень виступає проміжним буфером між джерелом запитів і обчислювальними ресурсами, що дозволяє стабілізувати систему за умов нерівномірного навантаження та уникнути перевантаження серверних процесів.

Для дослідження динамічної поведінки системи застосовано імітаційне моделювання, у межах якого потік запитів задавався як нестаціонарний пуассонівський процес із періодичними піковими навантаженнями, що дозволяє адекватно описувати реальні потоки звернень користувачів у вебсистемах. Реалізація імітаційної моделі дозволила врахувати випадкові затримки обробки, обмеженість пулу робочих процесів та вплив механізмів кешування на середній час відповіді системи. Запропоновано комбінований підхід, за якого аналітичні оцінки використовуються для початкового налаштування параметрів моделі, а імітаційні експерименти застосовуються для уточнення характеристик системи в умовах змінного навантаження [2].

У ході проведених обчислювальних експериментів встановлено, що зі зростанням інтенсивності надходження запитів при фіксованій кількості серверних процесів середній час очікування в черзі зростає нелінійно, що узгоджується з теоретичними оцінками моделі М/М/1. Імітаційне моделювання показало, що використання асинхронної обробки запитів та збільшення рівня паралельності обслуговування зменшує середній час відповіді системи від 25 % до 40 % у порівнянні з синхронною моделлю при однакових апаратних ресурсах. Додатково виявлено, що застосування механізмів кешування найбільш ефективно в умовах повторюваних запитів та дозволяє зменшити середній час очікування у черзі на від 15 % до 20 % за умови достатнього обсягу оперативної пам'яті. Отримані результати підтверджують доцільність поєднання аналітичних і імітаційних методів для оцінювання характеристик високонавантажених вебзастосунків на етапі проєктування, також використання комбінованого підходу до моделювання дозволяє більш точно оцінити поведінку системи в умовах нерівномірного навантаження та прогнозувати її продуктивність при зміні інтенсивності потоку запитів.

Висновки. Проведене дослідження показало, що класичні моделі теорії масового обслуговування можуть бути використані для попереднього аналізу процесів черги у вебзастосунках, однак для адекватного врахування особливостей сучасних архітектур необхідним є застосування імітаційного комп'ютерного моделювання з урахуванням асинхронної обробки запитів та динамічного масштабування ресурсів. Наукова новизна отриманих результатів полягає у запропонованому комбінованому підході до моделювання процесів черги, який поєднує аналітичні оцінки з імітаційними експериментами та дозволяє підвищити точність прогнозування часу відповіді системи в умовах пікових навантажень. Практичне значення роботи полягає у можливості використання запропонованої моделі під час проєктування та оптимізації високонавантажених вебзастосунків для підвищення їх продуктивності та стійкості до зростання кількості користувачів.

Перелік посилань:

1. Tanenbaum A. S., van Steen M. Distributed Systems Principles and Paradigms. Boston : Pearson 2017. 596 p.
2. Burns B. Designing Distributed Systems. Sebastopol, CA : O'Reilly Media. 2018. 162 p.
3. Harchol-Balter M. Performance Modeling and Design of Computer Systems. Cambridge University Press. 2013. 23 p.
4. Dean J., Barroso L. A. The Tail at Scale. Communications of the ACM. 2013. Vol. 56, No. 2. P. 74–80.
5. Kleinrock L. Queueing Systems. Volume 1 Theory. New York McGraw Hill 1975. 429 p.

¹ Аспірант 1 курсу Міщенко А. А.

¹ Проф., д.т.н. Шушура О. М.

<https://scholar.google.com/citations?user=beUGko0AAAAJ&hl=uk&authuser=2>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОД АГРЕГАЦІЇ МУЛЬТИМОДАЛЬНИХ ДАНИХ ДЛЯ ВИЯВЛЕННЯ АНОМАЛІЙ У КОМП'ЮТЕРНИХ СИСТЕМАХ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні комп'ютерні системи мають складну архітектуру, яка складається з багатьох компонентів – відслідковування стану яких є важливим завданням. Задача вирішується записом системних подій (логів) та налаштуванням моніторингу ресурсів (метрик), що використовуються сервісом. Для аналізу цих потоків даних використовуються різні програмні рішення. Наприклад, OpenSearch дозволяє слідкувати за логами та вмє повідомляти про проблеми, які було задано фахівцем [1], а для спостереження за станом компоненту через метрики використовується Grafana, яка дозволяє встановлювати граничні норми для показників навантаження центрального процесору чи завантаження оперативної пам'яті тощо [2]. Проте великим недоліком даних інструментів є те, що вони не вмють працювати з мультимодальними даними: кожен з них працює лише з одним потоком даних або логи, або метрики, що не дозволяє одночасно розглядати ці потоки, як одне ціле в одному часовому проміжку, для прийняття рішення про те, чи є дана ситуація аномальною, про яку потрібно повідомити спеціаліста для її вирішення.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження вказують на великий попит серед DevOps та SRE спеціалістів до потреби аналізу мультимодальних даних, оскільки більше 74 % серед 312 опитаних вказують, що їхні системи збирають як логи, так і метрики, однак теоретики ігнорують це в своїх роботах [3]. Як результат в останніх дослідженнях все частіше починають робити акцент на використанні відразу декількох різномірних потоків даних, щоб підвищити точність висновків моделей. Прикладом таких рішень є метод, який знаходить аномалію в логах та проводить кореляційне зіставлення результатів з метриками, що дозволяє ефективніше знаходити першопричини проблеми [4]. Яскравим прикладом успішного комбінування двох потоків даних вдалося реалізувати в дата-центрах, що дозволило підвищити кількість успішних виявлень, особливо серед складних випадків [5]. Іншим вдалим прикладом є дослідження в якому вирішувалася задача виявлення аномалій у мікросервісах, у результаті було встановлено, що при різкій зміні даних метрик часто корелюється аномальна оцінка логів [6]. Однак, не дивлячись на успішні результати під час поєднання аналізу двох потоків даних, значна частина досліджень продовжує фокусуватися на покращенні методів обробки метрик [7] та логів окремо [8].

Звідси можна зробити висновок, що актуальною є потреба в розробці підходів до формалізації та попередньої обробки мультимодальних даних (логів та метрик), які в подальшому будуть використані в нейро-нечітких мережах.

Формулювання мети. Метою роботи є розробка підходів до формалізації та попередньої обробки мультимодальних даних, які включають системні записи та метрики, для їх подальшого використання в еволюційних нейро-нечітких мережах для виявлення аномалій у комп'ютерних системах.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступні задачі:

- розробити метод зіставлення вхідних даних у єдиний вектор для обробки нейро-нечіткими моделями;
- реалізувати та перевірити запропонований метод на наборі даних для оцінки підготовки даних.

Основна частина. Для розв'язання задачі об'єднання мультимодальних даних, які мають різну часову природу неперервних метрик та асинхронних логів у роботі використано стратегію ковзного вікна. Застосування цього підходу дозволяє розбити загальний час спостереження на фіксовані інтервали ΔT , в яких відбувається локальна агрегація та синхронізація подій. Що дозволяє оперувати дискретними станами цільового вузла на відміну від аналізу неузгоджених між собою сирих даних.

Вхідний потік метрик складається з чисел, які суттєво відрізняються масштабом та фізичними одиницями виміру (відсотки, байти, мілісекунди), що ускладнює їх обробку. Через що виникає задача попередньої обробки даних для уникнення домінування окремих типів ознак під час навчання нейро-нечіткої мережі. Для її розв'язання пропонується виконувати міні-максну нормалізацію кожної метрики у стандартизований безрозмірний інтервал $[0, 1]$.

Обробка повідомлень в логах є основною складністю методу, оскільки вони складаються з статичного тексту та динамічних змінних (ідентифікатори транзакції чи запитів, часові затримки, IP-адреси сервісів чи БД). Через що виконання прямого семантичного аналізу тексту є неефективним, оскільки вимагає значних обчислювальних ресурсів. Для вирішення цієї задачі в роботі запропоновано метод векторизації на основі типізації повідомлень. Кожен системний запис відображається у скінченну множину наперед визначених шаблонів $\Omega = \{E_1, E_2, \dots, E_K\}$. Через складність та прихованість певних аномалій було введено показник ентропії $H(t_k)$, який дозволяє кількісно оцінити ступінь хаотичності генерації подій у межах часового вікна. Різке зростання показника – є сигналом про нестандартну поведінку системи, навіть якщо відсутні явні повідомлення про помилки.

У результаті було запропоновано метод, який на кожному кроці t_k формується єдиний вектор станів $\mathbf{x}_k$, який математично формалізується як операція конкатенації:

$$\mathbf{x}_k = \mathbf{v}_M(t_k) \oplus \mathbf{v}_L(t_k) \oplus [H(t_k)], \quad (1)$$

де $\mathbf{v}_M(t_k)$ – агрегований вектор метрик у момент часу розмірності N ;

$\mathbf{v}_L(t_k)$ – зважений вектор логів у момент часу розмірності K ;

$[H(t_k)]$ – скалярне значення ентропії.

Загальна розмірність отриманого простору ознак становить $D = N + K + 1$.

Для підтвердження ефективності розробленого підходу було проведено експериментальне моделювання роботи обчислювального вузла в умовах зростаючого навантаження. Використовуючи теплову карту, що зображена на рис. 1, було візуалізовано отриманий багатовимірний простір ознак.

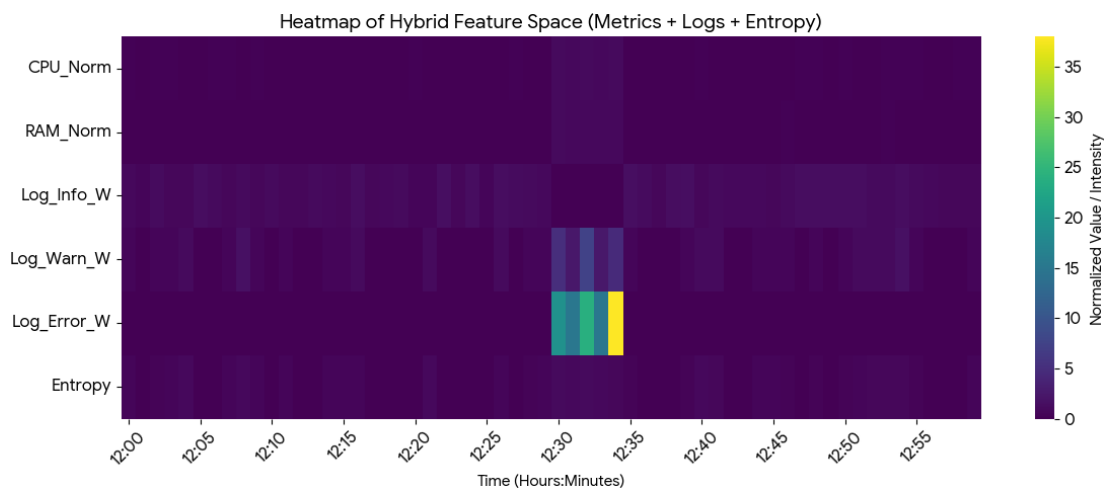


Рисунок 1 – Теплова карта гібридного простору ознак

На рис. 1 представлено візуалізацію сформованого простору ознак. Світлі зони показують місця з високим значенням ознак x_k . Область з аномальною активністю в центрі часової шкали підтверджує, що запропонований метод агрегації забезпечує синхронне відображення кореляції між зростанням навантаження та появою критичних помилок. Звідси слідує, що сформований вектор ознак може бути в подальшому використаний для розпізнавання аномалій за допомогою нейро-нечіткої мережі.

Результати експерименту доводять, що запропонований метод агрегації успішно трансформує різноманітні сирі дані у зручний векторний простір, зберігаючи інформацію про аномальну поведінку системи. Розмірність отриманого вектору є низькою, але її вистачає, щоб виявляти інциденти, задовольняючи вимоги нейро-нечітких мереж стосовно обчислювальної ефективності.

Висновки. Запропонований метод агрегації успішно розв'язує задачу попередньої підготовки мультимодальних даних для подальшого використання в нейро-нечітких мережах для виявлення аномалій у розподілених комп'ютерних системах. Для перетворення вхідних потоків даних у єдиний компактний вектор ознак використано підхід ковзного вікна, нормалізацію показників, зважування шаблонів логів та показника інформаційної ентропії. Результатом роботи методу є вектор ознак x_k фіксованої розмірності, який характеризується високою роздільною здатністю нормальних та аномальних станів системи. Для перевірки роботи методу фінальний вектор ознак було побудовано на тепловій карті, що дозволило наочно довести здатність методу формувати вектор ознак, який чітко відображає кореляцію між зростанням навантаження на апаратні ресурси та появою критичних помилок у логах, що робить його ідеальним для навчання нейро-нечітких класифікаторів типу ANFIS.

Перелік посилань:

1. Anupam Chansarkar. OpenSearch at Scale: Architecting High-Performance Distributed Search Solutions for Enterprise Data Retrieval. World Journal of Advanced Research and Reviews. 2025. Vol. 26, no. 2. P. 2088–2095. URL: <https://doi.org/10.30574/wjarr.2025.26.2.1851> (дата звернення: 26.02.2026).
2. Elradi M. D. Prometheus & Grafana: A Metrics-focused Monitoring Stack. Journal of Computer Allied Intelligence. 2025. Vol. 3, no. 3. P. 28–39. URL: <https://doi.org/10.69996/jcai.2025015> (дата звернення: 26.02.2026).
3. X. Ma, Y. Li, J. Keung, X. Yu, H. Zou, Z. Yang, F. Sarro, and E.T. Barr, “Practitioners’ Expectations on Log Anomaly Detection” arXiv preprint arXiv:2412.01066, Dec. 2024. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.01066> (дата звернення: 26.02.2026).
4. Viola L., Ronchieri E., Cavallaro C. Combining Log Files and Monitoring Data to Detect Anomaly Patterns in a Data Center. Computers. 2022. Vol. 11, no. 8. P. 117. URL: <https://doi.org/10.3390/computers11080117> (дата звернення: 26.02.2026).
5. Root-Cause Metric Location for Microservice Systems via Log Anomaly Detection / L. Wang et al. 2020 IEEE International Conference on Web Services (ICWS), Beijing, China, 19–23 October 2020. URL: <https://doi.org/10.1109/icws49710.2020.00026> (дата звернення: 26.02.2026).
6. Towards Multi-System Log Anomaly Detection / B. Wang et al. Proceedings of the 63rd Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics (Volume 6: Industry Track), Vienna, Austria. Stroudsburg, PA, USA, 2025. P. 83–91. URL: <https://doi.org/10.18653/v1/2025.acl-industry.8> (дата звернення: 26.02.2026).
7. A Survey of Deep Anomaly Detection in Multivariate Time Series: Taxonomy, Applications, and Directions / F. Wang et al. Sensors. 2025. Vol. 25, no. 1. P. 190. URL: <https://doi.org/10.3390/s25010190> (дата звернення: 26.02.2026).
8. Real-Time Anomaly Detection in Data Centers for Log-based Predictive Maintenance using an Evolving Fuzzy-Rule-Based Approach / L. Decker et al. 2020 IEEE International Conference on Fuzzy Systems (FUZZ-IEEE), Glasgow, 19–24 June 2020. 2020. P. 1–9. URL: <https://ieeexplore.ieee.org/document/9177762> (дата звернення: 26.02.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Сапожников О. Ю.

¹ Доц., к.т.н. Сидоренко Ю. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=itusEucAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ВЕБ-ДОДАТКУ МОНІТОРИНГУ ТА ВІЗУАЛІЗАЦІЇ ДОЗИМЕТРИЧНИХ ДАНИХ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах зростання кількості техногенних ризиків, розвитку атомної енергетики та збереження наслідків великих радіаційних аварій, постійний контроль радіаційного стану довкілля є одним із ключових елементів екологічної безпеки держави. Систематичний моніторинг радіаційного фону дозволяє своєчасно виявляти потенційно небезпечні відхилення від нормативних значень, оцінювати рівень радіаційного навантаження на населення та формувати обґрунтовані управлінські рішення щодо мінімізації ризиків. Особливої актуальності такі системи набувають для територій, де розташовані об'єкти підвищеної радіаційної небезпеки, зони техногенного впливу або регіони з історично підвищеним рівнем радіоактивного забруднення.

Попри наявність великої кількості вимірювальних приладів та датчиків, процес обробки отриманих дозиметричних даних часто залишається недостатньо автоматизованим. У багатьох організаціях результати вимірювань фіксуються у вигляді локальних таблиць, паперових журналів або розрізнених електронних файлів, що значно ускладнює централізований аналіз інформації. Такий підхід призводить до фрагментації даних, затримок у передачі інформації та обмежує можливість оперативного реагування на потенційні загрози. Відсутність єдиної інформаційної системи, що надає централізоване накопичення, аналіз і візуалізацію результатів вимірювань, створює суттєві перешкоди для ефективного управління процесами екологічного моніторингу [1].

У зв'язку з цим зростає потреба у впровадженні сучасних цифрових рішень, які поєднують технології хмарних обчислень, геоінформаційних систем, інтерактивної візуалізації та інструментів штучного інтелекту. Використання веб-орієнтованих платформ дозволяє створити централізовану систему збору та обробки дозиметричної інформації, забезпечити доступ до даних у реальному часі та підвищити прозорість екологічного контролю. Інтеграція алгоритмів інтелектуального аналізу даних, у свою чергу, відкриває можливість автоматичного формування аналітичних звітів, виявлення аномальних значень та прогнозування можливих змін радіаційного стану середовища.

Формулювання мети. Метою роботи є проектування, архітектурна розробка та програмна реалізація спеціалізованого веб-додатка, призначеного для централізованого збору, геопросторової візуалізації дозиметричних вимірювань у реальному часі, а також створення інтелектуального модуля автоматизованої генерації звітної документації на основі мовних моделей.

Основна частина. В основі запропонованого програмного рішення лежить багаторівнева клієнт-серверна архітектура, що надає розподіл функціональних компонентів системи між інтерфейсним, серверним та рівнем зберігання даних. Такий підхід дозволяє забезпечити високу масштабованість системи, стабільність її роботи та можливість обробки значних обсягів інформації. Клієнтська частина веб-додатка реалізує інтерактивний інтерфейс користувача, що надає зручне введення, перегляд та аналіз дозиметричних даних. Серверна частина відповідає за обробку запитів, взаємодію з базою даних, а також виконання алгоритмів аналітичної обробки інформації.

Особлива увага приділяється механізмам контролю достовірності даних та управління доступом. Система використовує процедури автентифікації користувачів, що дозволяє обмежити доступ до функціоналу лише для уповноважених спеціалістів. Кожна операція внесення або редагування інформації супроводжується фіксацією метаданих, зокрема часу внесення запису, ідентифікатора користувача та параметрів вимірювального обладнання. Такий підхід дає можливість відстеження походження даних та підвищує їхню надійність.

Для роботи з просторовою інформацією у системі використовується інтеграція з картографічними сервісами, що дозволяє відображати результати вимірювань у вигляді геопросторових об'єктів. Кожна точка на карті відповідає певному місцю проведення вимірювання та містить повний набір пов'язаних параметрів, включаючи значення потужності еквівалентної дози, час проведення вимірювання та інформацію про використаний прилад. Користувач має можливість переглядати історію змін радіаційного фону для конкретної локації, будувати часові графіки та аналізувати тенденції зміни показників.

Важливою складовою системи є модуль автоматизованої генерації звітної документації, реалізований із використанням сучасних методів штучного інтелекту. Для підвищення точності аналізу використовується підхід Retrieval-Augmented Generation, що поєднує можливості пошуку релевантних даних у базі з генеративними можливостями мовних моделей. Під час формування звіту система спочатку виконує структурований запит до бази даних, отримуючи необхідні вимірювання за визначений період або географічну область. Після цього отримані дані передаються до мовної моделі разом із набором нормативних документів та правил інтерпретації результатів [2].

Модель штучного інтелекту аналізує отримані значення, виконує статистичну обробку, визначає середні та граничні показники, а також ідентифікує потенційні аномалії або відхилення від встановлених норм. На основі цього формується текстовий аналітичний звіт, що містить опис поточного стану радіаційного фону, оцінку можливих ризиків та рекомендації щодо подальших дій. Автоматизація цього процесу значно скорочує час підготовки звітної документації та зменшує ймовірність помилок, пов'язаних із ручною обробкою інформації.

Висновки. Розробка веб-додатку моніторингу дозиметричних даних дозволяє значно підвищити ефективність роботи дозиметричних служб та екологічних лабораторій. Завдяки автоматизації етапу звітності час на підготовку підсумкової документації скорочується з кількох годин до декількох хвилин. Поєднання методів картографічної візуалізації з можливостями штучного інтелекту надає високу точність виявлення екологічних ризиків та надає інструментарій для предиктивного аналізу стану довкілля. Результати дослідження та програмний продукт можуть бути інтегровані в державні системи екологічного моніторингу або використані як приватне рішення для промислових об'єктів підвищеної небезпеки, що підкреслює практичну значущість та широкі перспективи масштабування проекту.

Перелік посилань:

1. Features and results of radioecological monitoring to ensure environmental safety in modern conditions / O. Dunaievska et al. *Ecological Sciences*. 2024. No. 5 (56). P. 269–272. URL: <https://doi.org/10.32846/2306-9716/2024.eco.5-56.40> (date of access: 02.03.2026).
2. Bose R. Core Concepts of Retrieval-Augmented Generation (RAG). *Mastering Retrieval-Augmented Generation*. Berkeley, CA, 2025. P. 33–68. URL: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1808-0_2 (date of access: 02.03.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Хавкін А. Д.

¹ Доц., к.т.н. Кублій Л. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=rXA1eMIAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОГО МОНІТОРИНГУ ТА ОПТИМІЗАЦІЇ РОБОТИ МЕРЕЖІ 3D-ПРИНТЕРІВ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах розвитку промислового виробництва відбувається швидкий перехід до автоматизованих цифрових систем, які дають можливість підвищити продуктивність і надійність обладнання. Це особливо актуально для адитивних технологій, де мережа 3D-принтерів відіграє критичну роль у гнучких виробничих середовищах, а також повинна забезпечувати безперервну роботу з мінімальними простоями. Проте традиційні підходи до моніторингу, які базуються на періодичному зборі даних або регламентних оглядах, не дають можливості здійснювати оцінку стану обладнання в реальному часі й своєчасно виявляти потенційні відмови. У результаті зростає ризик несподіваних зупинок, втрат матеріалів і непередбачуваних витрат на обслуговування, що зумовлює необхідність розвитку інтелектуальних методів моніторингу та аналітики, здатних оцінювати технічний стан пристрою на основі поведінки параметрів і прогнозувати можливі відхилення до того, як вони призведуть до серйозних збоїв. Такий підхід не тільки підвищує надійність та ефективність виробництва, але й оптимізує експлуатаційні витрати, що є ключовими завданнями в контексті Industry 4.0 [1].

Аналіз останніх досліджень. Проблема інтелектуального моніторингу технічних систем тісно пов'язана з розвитком підходів прогнозного технічного обслуговування, які ґрунтуються на аналізі великих масивів даних і використанні алгоритмів машинного навчання. У фундаментальному огляді [2] систематизовано сучасні методи машинного навчання, які застосовують для прогнозного обслуговування; показано, що аналіз історичних і поточних параметрів обладнання дає можливість формувати моделі поведінки системи і виявляти відхилення до виникнення критичних відмов. Автори підкреслюють, що ефективність таких систем значною мірою залежить від якості телеметричних даних і здатності алгоритмів адаптуватися до змінних умов експлуатації.

Подібні результати наведено у роботі [3], де машинне навчання розглядається як ключовий інструмент діагностики технічних станів складного обладнання. Дослідження демонструє, що аналіз сигналів і параметрів експлуатації дає можливість автоматизовано визначати ознаки деградації системи, формуючи основу для інтелектуальної діагностики й прогнозування. Особливу увагу приділено здатності алгоритмів виявляти нетипові патерни поведінки, що є важливим елементом сучасних систем моніторингу.

У дослідженні [4] розглянуто підходи керування на основі даних до прогнозного обслуговування, де основним джерелом інформації є телеметрія з підімкнених пристроїв. Автори доводять, що інтеграція аналітики в реальному часі з промисловими мережами дає можливість формувати адаптивні моделі керування і мінімізувати час реакції на відхилення. Це безпосередньо відповідає концепції інтелектуального моніторингу, де дані не тільки накопичуються, а й використовуються для підтримки прийняття рішень.

Класичні підходи до діагностики й прогнозування технічного стану обладнання розглянуто в роботі [5], де показано, що технічне обслуговування за станом є перехідним етапом до повноцінних інтелектуальних систем моніторингу. Автори підкреслюють роль безперервного аналізу параметрів стану як основи для автоматизованого визначення оптимальних режимів експлуатації.

Розвиток інтелектуального моніторингу неможливий без інтеграції з архітектурами Industry 4.0, де фізичні пристрої поєднуються з цифровими аналітичними платформами. У роботі [1] представлено архітектуру кіберфізичних систем, яка забезпечує взаємодію IoT-пристроїв із системами аналізу даних у реальному часі, завдяки чому можна реалізувати масштабовані системи моніторингу, здатні адаптуватися до змін виробничого середовища.

Подальший розвиток IoT-орієнтованих систем розглянуто в дослідженні [6], де Інтернет речей описується як ключова інфраструктура для збору й обробки даних у розподілених технічних системах. Автори наголошують, що саме стандартизовані канали телеметрії забезпечують основу для інтелектуальної аналітики. Подібну ідею розвинено в [7], де показано, що інтеграція IoT із виробничими платформами створює передумови для реалізації адаптивного керування та автоматизованого аналізу стану обладнання.

Розглянуті дослідження демонструють, що поєднання IoT-інфраструктури, веборієнтованих систем та алгоритмів машинного навчання формує технологічну основу для інтелектуального моніторингу складних технічних систем. Саме на цих принципах будується підхід до аналізу та оптимізації роботи мережі 3D-принтерів у пропонованому дослідженні.

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка та обґрунтування методів інтелектуального моніторингу та оптимізації роботи мережі 3D-принтерів на основі веборієнтованих технологій та аналізу даних, що передбачає створення системи, здатної збирати, обробляти й аналізувати параметри стану обладнання в реальному часі, здійснювати адаптивне оцінювання технічного стану з можливістю прогнозування технічних відхилень та адаптивної оптимізації режимів експлуатації.

Основна частина. Інтелектуальний моніторинг мережі 3D-принтерів розглядається як багаторівнева система аналізу телеметричних даних, у якій параметри фізичного стану пристроїв інтерпретуються як поведінкові індикатори технологічного процесу. Запропонований підхід принципово відрізняється від традиційного моніторингу тим, що дані не тільки фіксуються, але й використовуються для формування моделей стану, які дають можливість оцінювати стабільність роботи системи і прогнозувати її розвиток. Основна ідея полягає в переході від реактивного реагування на відмови до проактивного керування технічним станом, що відповідає сучасним принципам обслуговування за станом і прогнозного обслуговування [2, 5].

Вибір параметрів моніторингу ґрунтується на їхній здатності репрезентувати ключові фізичні й логічні аспекти функціонування обладнання. Температурні характеристики екструдера й робочого столу відображають термодинамічну стабільність процесу друку, що безпосередньо впливає на якість виготовлення виробу. Геометричні параметри mesh-сітки характеризують стан калібрування і механічної точності системи позиціонування. Статус виконання друку й коди помилок прошивки формують логічний контекст роботи пристрою, даючи можливість виявляти порушення послідовності операцій. Параметри зовнішнього середовища, зокрема вентиляція й освітлення, впливають на умови експлуатації і можуть виступати непрямыми індикаторами стабільності технологічного процесу. Сукупність зазначених параметрів формує багатовимірний опис стану системи, придатний для формування аналітичних моделей [3, 4].

Аналітична інтерпретація телеметрії передбачає нормалізацію параметрів і побудову еталонних моделей поведінки обладнання. Нормалізація дає можливість узгодити дані різної природи й масштабу, забезпечуючи їхнє коректне використання в алгоритмах аналізу. Побудова поведінкових моделей ґрунтується на історичних даних і дає можливість визначати типові режими функціонування системи. Відхилення від цих режимів розглядаються як потенційні ознаки деградації або нестабільності, що відповідає сучасним підходам до виявлення аномалій у технічних системах [1, 2].

Критично важливим елементом є аналіз даних у реальному часі, який забезпечує своєчасну реакцію на зміни стану обладнання. Асинхронна вебархітектура дає можливість приймати потоки телеметрії від кількох пристроїв одночасно, мінімізуючи затримки обробки й забезпечуючи масштабованість системи. Такий підхід відповідає архітектурним принципам

кіберфізичних систем Industry 4.0, де цифрова аналітика інтегрується з фізичними об'єктами для адаптивного керування процесами [1, 7].

Інтелектуальні алгоритми аналізу, застосовані в системі, спрямовані на виявлення трендів, кореляцій і нетипових поведінкових патернів. На відміну від простого порогового контролю, такі алгоритми враховують динаміку параметрів і їхні взаємозв'язки, що підвищує точність оцінки стану обладнання. Прогностична складова аналітики дає можливість оцінювати ймовірність розвитку відхилень, формуючи основу для прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи й технічного обслуговування [3, 4].

Веборієнтована реалізація системи виконує роль інтеграційного середовища, у якому аналітичні модулі поєднуються з інтерфейсами керування. Це забезпечує централізований доступ до результатів аналізу, створює умови для автоматизації прийняття рішень. Уніфікований доступ до телеметрії через API прошивки Klipper дає можливість застосовувати розроблені методи до різних моделей 3D-принтерів без зміни логіки аналітичної обробки, що підвищує практичну універсальність системи.

Інтелектуальний моніторинг у запропонованій системі розглядається як комплексна аналітична платформа, яка поєднує телеметрію, моделювання поведінки і прогнозу оцінку технічного стану. Такий підхід забезпечує підвищення надійності обладнання, зменшення кількості аварійних зупинок та оптимізацію експлуатаційних режимів, що відповідає сучасним тенденціям цифрового виробництва і розвитку інтелектуальних IoT-систем [6, 7].

Висновки. Інтелектуальний моніторинг технічних систем із використанням IoT-технологій та алгоритмів машинного навчання є перспективним напрямом досліджень у контексті підвищення надійності, ефективності й адаптивності виробничих процесів. Застосування такого підходу у веборієнтованих рішеннях для мереж 3D-принтерів дає можливість не тільки здійснювати централізований контроль стану обладнання, але й прогнозувати його поведінку, виявляти аномалії та оптимізувати експлуатаційні режими, що забезпечує суттєве зниження ризику аварійних ситуацій, мінімізацію простоїв, ефективніше обслуговування. Уніфікований характер архітектури на основі API Klipper гарантує масштабованість запропонованих методів для різних апаратних платформ, що робить їх придатними для практичного застосування у реальних виробничих середовищах.

Перелік посилань:

1. Lee J., Bagheri B., Kao H. A. A cyber-physical systems architecture for Industry 4.0-based manufacturing systems. *Manufacturing Letters*. 2015. Vol. 3. URL: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2014.12.001> (дата звернення: 13.02.2026).
2. A systematic literature review of machine learning methods applied to predictive maintenance. *Computers & Industrial Engineering* / Carvalho T. P. et al. 2019. Vol. 137. URL: <https://doi.org/10.1016/j.cie.2019.106024> (дата звернення: 13.02.2026).
3. Applications of machine learning to machine fault diagnosis: A review and roadmap. *Mechanical Systems and Signal Processing* / Lei Y. et al. 2020. Vol. 138. URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2019.106587> (дата звернення: 13.02.2026).
4. Zhang W., Yang D., Wang H. Data-driven methods for predictive maintenance of industrial equipment: A survey. *IEEE Systems Journal*. 2019. Vol. 13(3). URL: <https://doi.org/10.1109/JSYST.2018.2872546> (дата звернення: 13.02.2026).
5. Jardine A. K. S., Lin D., Banjevic D. A review on machinery diagnostics and prognostics implementing condition-based maintenance. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2006. Vol. 20(7). URL: <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2005.09.012> (дата звернення: 13.02.2026).
6. Atzori L., Iera A., Morabito G. The Internet of Things: A survey. *Computer Networks*. 2010. Vol. 54(15). URL: <https://doi.org/10.1016/j.comnet.2010.05.010> (дата звернення: 13.02.2026).
7. Xu L. D., He W., Li S. Internet of Things in industries: A survey. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. Vol. 10(4). URL: <https://doi.org/10.1109/TII.2014.2300753> (дата звернення: 13.02.2026).

¹ Магістрант 1 курсу Черкас О. С.¹ Доц., к.т.н. Кузьменко І. М.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=NWuNp7oAAAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВЕБ-ЗАСТОСУНОК З ТРИРІВНЕВОЮ АРХІТЕКТУРОЮ ДЛЯ КОМПЛЕКТАЦІЇ ТЕПЛООБМІННОГО ОБЛАДНАННЯ

Постановка проблеми та її актуальність. В сучасних умовах трирівнева структура сприяє **забезпеченню безпеки**, оскільки логіка обробки даних і доступ до бази даних централізовано контролюються на серверному рівні [1].

Така архітектура дозволяє чітко розділити рівні представлення, бізнес-логіки та даних, що підвищує масштабованість, гнучкість та легкість обслуговування рішення, а веб-застосунок спрощує інтеграцію з іншими системами автоматизації. У сучасних виробничих умовах така система підвищує ефективність обслуговування, зменшує час реагування на неполадки та дозволяє приймати обґрунтовані рішення на основі актуальної інформації [2, 3]. Актуальність такої системи для комплектації теплообмінного обладнання обумовлена необхідністю обробляти великі обсяги даних у реальному часі та забезпечувати надійний доступ для різних груп користувачів (оператори, технічний персонал, менеджмент).

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження підкреслюють важливість використання архітектурних стилів, зокрема REST [4], що дозволяє стандартизувати API-інтерфейси. Також, багаторівнева архітектура є ефективною для розділення відповідальностей між рівнями представлення, логіки та зберігання даних, що спрощує підтримку та масштабування додатків [5]. Загалом, останні дослідження свідчать про зростаючу увагу до гнучких, масштабованих та модульних архітектур, що дозволяють ефективно адаптувати веб-системи до динамічних змін у навантаженнях та бізнес-вимогах. [6].

Формулювання мети. Робота спрямована на проєктування та програмну реалізацію комплексного вебзастосунку з трирівневою архітектурою, що включає реляційну систему управління базами даних, для автоматизації життєвого циклу обробки замовлень.

Основна частина

Програмна реалізація системи базується на принципах розподіленої трирівневої веб-архітектури, що забезпечує чітку ізоляцію інтерфейсу користувача, бізнес-логіки та шару управління даними. Такий підхід дозволяє досягти високої стабільності та масштабованості застосунку. Центральним вузлом серверної частини виступає керуючий модуль `run.py`, який ініціалізує середовище Flask та виконує роль головного диспетчера системи. Для забезпечення гнучкості розробки було застосовано механізм «blueprint-ів», що дозволив розділити серверну логіку на незалежні модулі, розташовані в директорії `routes`. Кожен такий модуль спеціалізується на конкретній предметній області: від обробки запитів до довідника постачальників до складних операцій із формування специфікацій замовлень. Це не лише спрощує процес налагодження коду, але й дозволяє в майбутньому інтегрувати нові функціональні блоки без необхідності реструктуризації всього проєкту.

Фундаментом для збереження та обробки інформаційних потоків обрано реляційну систему управління базами даних MySQL, архітектура якої спроектована з суворим дотриманням принципів нормалізації. В основі ER-діаграми лежать центральні сутності, такі як вироби, матеріали, клієнти та постачальники, що утворюють логічне ядро системи. Проте ключовою особливістю бази даних є використання допоміжних таблиць зв'язків, зокрема `product_materials` та `material_suppliers`, які реалізують відношення «багато-до-багатьох». Це дозволяє системі не просто фіксувати факт використання матеріалу, а й зберігати специфічні параметри для кожного замовлення, такі як актуальна ціна на момент

розрахунку та необхідна кількість компонентів. Особливу стратегічну роль відіграє підсистема шаблонів, реалізована через таблицю `product_templates`, яка зберігає еталонні конфігурації типового обладнання. Це дозволяє менеджеру створювати нові розрахунки на основі існуючих прототипів, автоматично заповнюючи складні специфікації та мінімізуючи ручне введення ідентичних даних.

Взаємодія між сервером та базою даних реалізована через спеціалізований шар доступу до даних (DAL) у модулі `database.py`. Використання офіційного драйвера `mysql-connector-python` дозволило впровадити централізоване управління транзакціями та параметризовані SQL-запити, що є критично важливим для захисту від ін'єкцій та забезпечення атомарності змін – у разі виникнення помилки при комплектуванні замовлення всі операції відміняються, що запобігає появі некоректних записів. Паралельно з цим, алгоритмічна частина системи виконує поетапну калькуляцію витрат, де базова вартість матеріалів послідовно доповнюється операційними витратами та фінальною націнкою. Такий модульний підхід до розрахунків дозволяє гнучко адаптувати вартість під конкретні ринкові умови або специфічні вимоги замовника без зміни глобальних налаштувань системи.

Клієнтська сторона застосунку побудована на базі сучасних стандартів HTML, CSS та JavaScript, що забезпечує створення динамічного та чуйного інтерфейсу. Головний клієнтський скрипт `main.js` координує роботу вузькоспеціалізованих модулів, таких як `products_list.js` або `materials_list.js`, які взаємодіють із серверними API-ендпоінтами через асинхронні запити. Це дозволяє користувачу працювати в режимі реального часу: при зміні кількості компонентів у браузері система миттєво надсилає дані на сервер, проводить перерахунок та повертає оновлені результати без повного перезавантаження сторінки. Окрім візуалізації, інтерфейс підтримує механізми валідації введених значень й кольорову індикацію застарілих цін, що допомагає менеджеру підтримувати актуальність бази даних. Завершальним етапом роботи є звернення до модуля експорту, який трансформує накопичені в базі дані у формат `.xlsx`, забезпечуючи повну сумісність результатів автоматизації з традиційним документообігом.

Висновки. Розробка вебзастосунку на базі Python, Flask та MySQL дозволила успішно автоматизувати процес розрахунку собівартості теплоенергетичного обладнання, замінивши малоефективні методи ручного введення даних у табличних процесорах. Впровадження модульної архітектури та нормалізованої бази даних із підсистемою шаблонів забезпечило високу швидкість обробки замовлень, стандартизацію специфікацій та мінімізацію ризику виникнення людських помилок. Практична реалізація системи підтвердила ефективність обраного технологічного стека для створення зрозумілого інтерфейсу та стабільної роботи з великими обсягами інформації.

Перелік посилань:

1. DuBois, P. MySQL. Addison-Wesley, 2020. 864 с.
2. REST API Design Best Practices – Red Hat: веб-сайт. URL: <https://developers.redhat.com/articles/rest-api-design> (дата звернення: 12.04.2025).
3. Martin, R. C. Clean Architecture: A Craftsman's Guide to Software Structure and Design. Prentice Hall, 2017. 432 с.
4. Fielding, R. T., Taylor, R. N. Principled Design of the Modern Web Architecture. ACM Transactions on Internet Technology (TOIT). 2002. Vol. 2, No. 2. p. 115–150. doi:10.1145/564550.564552
5. Sereda, D. Creating a Multi-tier Architecture for Web Applications: Design and Implementation. American Scientific Research Journal for Engineering, Technology, and Sciences (ASRJETS). 2025.
6. Боков, О. Г. Аналіз архітектури сучасних ВЕБ-додатків. Automation and Development of Electronic Devices (ADED'2022): Coll. of Students' Papers. Kharkiv: Kind of Kharkiv National University of Radio Electronics. 2022. p. 127.

¹ Postgraduate 2nd year Baranichenko O. M.

¹ Assoc.prof., cand.eng.sc. Shapovalova S. I.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=biglE98AAAAJ>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

CONFLICT RESOLUTION OF PRODUCTION MODEL RULES BASED ON GROUP DECISION-MAKING

Statement of the problem and its relevance. Production models of knowledge representation are used in many modern intelligent systems. In the process of logical inference based on input data, the model selects those rules that can be activated. However, in the case of large systems, the problem of rule conflicts often arises when the selected rules are contradictory and cannot be executed simultaneously. The use of standard, generally accepted methods of conflict resolution is often used in simple small systems. However, their application has significant limitations in subject areas where solutions cannot be uniquely determined only by local rule priorities. The situation is complicated in the case of implementing a production model for an object that has a complex hierarchical structure. Then determining the possibility of activating a rule depends not only on the state of a specific component, but also on all other related components. Therefore, improving the method of conflict resolution based on group decision for complex hierarchical production models of knowledge representation is relevant and has practical application.

Analysis of the latest research. In paper [1], it was shown that the level of control accuracy depends on the correctness of conflict resolution in the decision-making process. In this article, an approach was presented to achieve consensus in the presence of conflicting opinions between participants in a group decision. Today, there are a large number of approaches to conflict resolution [2], but their implementation in software decision-making systems has a number of features related to the architectural features of production models. In paper [3], an approach to conflict resolution based on a hierarchical Bayesian network was presented, which is based on a directed acyclic graph with nodes selected by experts. The method has proven its effectiveness, productivity and stability. Another method, which was based on a multi-criteria quantum model of group decision-making, was presented in paper [4]. The authors presented an approach in which the presentation of evaluation information occurs in the form of fuzzy numbers of the second type with the integration of the Euclidean distance measure for the correct measurement of differences between alternatives. The feasibility and effectiveness of the presented method were demonstrated on a number of practical problems. In [5], an approach to resolving conflicts in fuzzy group decision-making problems was presented, where different preferences of experts make it difficult to achieve consensus. The authors proposed an approach that takes into account not only conflicts at the local level, but also at the inter-expert level. The proposed method is based on a mechanism for spreading trust taking into account the consistency index, a procedure for identifying and gradually eliminating conflicts, and a mechanism for selecting alternatives based on a special evaluation function. However, the application of group decision-making methods to resolve conflicts in the process of logical inference is a non-trivial task and requires detailed research.

Goal formulation. The goal of the work is to present a method for resolving conflicts of production model rules based on group decision to ensure the accuracy and correctness of decision-making in complex hierarchical information systems.

Main part. In most production models, a selection of rules that satisfy the current state of working memory (agenda) is formed during the logical inference process. However, these rules may contradict each other and lead to unpredictable consequences during execution. There are a number

of generally accepted methods to resolve conflicts, the most commonly used of which are the following:

1. Depth: new rules with a higher priority are placed higher in the queue (implementation of the LIFO – Last In First Out approach).
2. Breadth: those rules that were activated earlier are moved to the beginning of the execution queue (implementation of the FIFO – First In First Out approach).
3. Simplicity: rules with fewer conditions are executed first.
4. Complicity: rules with more conditions are executed first.

However, the use of these methods for complex hierarchical data representation models cannot guarantee the correctness and accuracy of the result due to the complexity of the architecture. For this, it is advisable to use group decision-making methods, in particular:

1. A weighted voting method in which permission to execute a rule is determined by the formula:

$$S = \sum_{i=1}^n \omega_i d_i, \quad (1)$$

where S – a decision on the possibility of performing an action, $S \geq 1$ – “permission”, otherwise – “prohibition”;

n – number of system components that make decisions;

ω_i – weight of the i -th component;

d_i – decision of the i -th component, $d_i \in \{+1, -1\}$.

The advantages of the method are its simplicity of implementation and high speed of work, however, the problem of dominance of components with a large weight may arise. The use of this approach is advisable in expert systems with a simple low-level hierarchy (no more than 3 levels).

2. The method of limited weighted voting, which is an improved version of the voting method and consists in normalizing the weights of the components

$$\sum_{i=1}^n \omega_i = 1. \quad (2)$$

The advantages of the method are to limit the contribution of individual components, but it is more complex due to the need to determine and adjust the weights of the components. Its use is advisable in systems with a fixed hierarchical structure.

3. Two-stage voting model with quorum, in which the standard voting model is improved by rejecting the permission to perform the operation in case of insufficient number of permissions.

$$\frac{N(S_i = +1)}{n} \geq q, \quad (3)$$

where q – threshold value of permission to perform the operation.

The advantages of the method are the simplification of determining weight coefficients with a guarantee of limiting the contribution of individual components to the decision-making process, however, in large hierarchical structures an additional problem arises with the possibility of the absence of a solution, which requires additional checks. Its use is advisable for critical control systems, in particular life support or safety systems.

The implementation of a group approach to resolving conflicts in production models occurs in 3 stages:

1. Determining the weights of components in accordance with the selected method.
2. Formation by the production model of a set of rules based on the current state of working memory that can be executed and determining the set of conflict rules.

3. Determining and executing rules based on one of the proposed methods for group conflict resolution.

The proposed approach was tested on the power supply management system of a manufacturing enterprise. The hierarchical model consisted of 3 levels: the local level of physical equipment, the level of complex nodes, and the level of system control. On its basis, the existing and proposed methods were compared, and the part of incorrect operations was compared (Fig. 1).

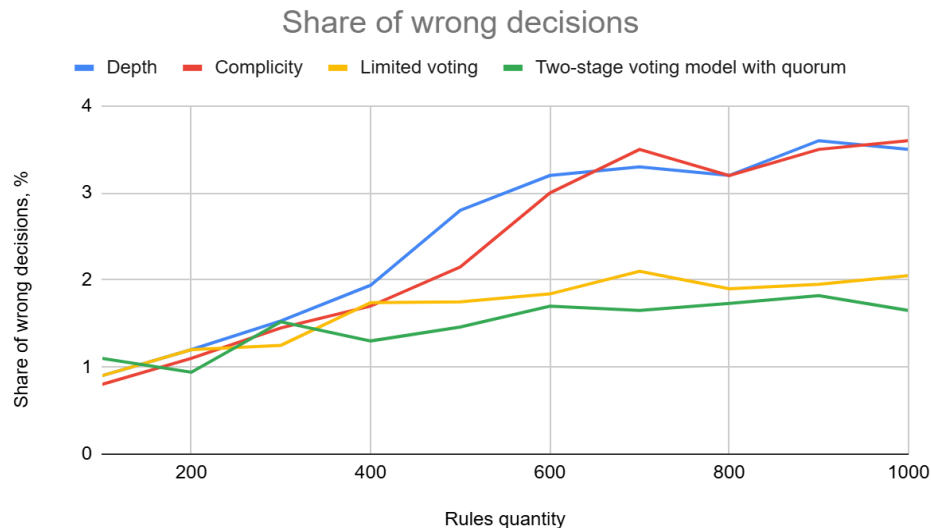


Figure 1 – Comparison of conflict resolution methods

The obtained data show higher accuracy of the proposed methods over the generally accepted ones, and the discrepancy in the number of errors confirms the importance of the correct choice of the method and setting its parameters for a specific task.

Conclusions.

1. Group decision-making methods are considered and their advantages over conventional ones are determined.

2. An approach to group decision-making in hierarchical production models based on component weight coefficients is proposed.

3. Testing is carried out on a power supply control and management system. The increase in decision-making accuracy by group conflict resolution models is confirmed.

References:

1. Ding R., Cheng R., Li M., et al. Conflict management-based consensus reaching process considering conflict relationship clustering in large-scale group decision-making problems. *Expert Syst. Appl.* 2024. 238, PD. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2023.122095>.
2. Tran T. N. T., Felfernig A., Le V. M. (2024). An overview of consensus models for group decision-making and group recommender systems. *User Model User-Adap Inter.* 2024. 34, P. 489–547. <https://doi.org/10.1007/s11257-023-09380-z>.
3. Rong Sh., Guo W., Zhang D. A study on group decision making problem based on fuzzy reasoning and bayesian networks. 2025. arXiv:2504.21568v1. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2504.21568>.
4. Li W., Lu S., Ren Z., Rehman O.U. (). A Novel Multi-Criteria Quantum Group Decision-Making Model Considering Decision Makers' Risk Perception Based on Type-2 Fuzzy Numbers. *Symmetry*. 2025. 17(7), 1006. <https://doi.org/10.3390/sym17071006>.
5. Pei F., Gao Y., Yan A., et al. Conflict elimination based on opinion dynamics in fuzzy group decision-making. *Expert Systems with Applications*. 2024. 254, 124308. <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2024.124308>.

¹ MS's programme 2nd year Novytskyi K. V.

¹ Prof., doc.eng.sc. Shushura O. M.

<https://scholar.google.com/citations?user=beUGko0AAAAJ&hl=en>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

HYBRID APPROACH FOR AUTOMATIC SUMMATIZATION OF LONG SCIENTIFIC DOCUMENTS

Statement of the problem and its relevance. The rapid growth of scientific literature necessitates efficient methods for automatic summary generation. Traditional transformer-based models demonstrate excellent results for short and medium-length texts, but face significant limitations due to fixed context windows (typically from 512 tokens to 1024 tokens), which complicates processing of documents longer than the context window [1]. Document truncation leads to incomplete processing and consequently inaccurate summarization. Moreover, purely extractive approaches, such as graph-based methods, cannot always provide the necessary quality of summarization [2].

Analysis of the latest research. Modern transformer models such as BART, PEGASUS, and T5 achieve good results through encoder-decoder architecture and pre-training [3, 4]. For processing long documents, several approaches have been proposed. Hierarchical Transformers employ multi-level architecture for processing local and global dependencies. Longformer applies sparse attention mechanisms to scale to longer sequences [5]. However, these models require significant computational resources and large training datasets. Hybrid approaches attempt to combine the advantages of extractive and abstractive methods, but the potential for integrating semantic vector representations with abstractive models to create scalable solutions without requiring extended context windows remains insufficiently studied [6].

Goal formulation. The aim of this work is to develop a hybrid summarization method for processing documents that exceed the standard context window limitations of transformer models, combining Map-Reduce approach with semantic selection and abstractive generation.

Main part. A hybrid method was developed based on a four-stage architecture, combining extractive and abstractive summarization approaches. The first stage performs document splitting into overlapping fragments, with each subsequent fragment including the last 100 words of the previous one to prevent loss of semantic connections at fragment boundaries.

The extractive phase employs the Sentence-BERT model to obtain semantic vector representations of sentences. Unlike statistical methods (TF-IDF) or positional methods (Lead-k), Sentence-BERT captures deep semantic meaning independently of lexical variation. The all-MiniLM-L6-v2 model with six layers was utilized, trained using contrastive learning on over one billion sentence pairs. For each fragment, a centroid is computed as the arithmetic mean of all sentence vectors. The centroid for a fragment with n sentences and vectors $e_1, e_2, \dots, e_n \in \mathbb{R}^{384}$ is defined by the formula:

$$c = (1/n) \sum_{i=1}^n e_i. \quad (1)$$

Sentences with highest cosine similarity to the centroid are selected, preserving the original order. To evaluate the effectiveness of different extractive approaches, a comparison was conducted on the extractive phase. Tab. 1 presents the comparative analysis of ROUGE-1 F1 scores for various sentence selection methods.

Table 1 – Comparison of ROUGE-1 F1 metric for different extractive methods

Method	ROUGE-1 F1
Lead-k (positional)	0.3319
TF-IDF (statistical)	0.2723
BERT CLS token	0.3760
Sentence-BERT + centroid	0.3460

The results demonstrate that while BERT CLS token approach achieves the highest score (0.3760), the Sentence-BERT with centroid-based selection (0.3460) provides an optimal balance between quality and computational efficiency, significantly outperforming traditional TF-IDF (0.2723) and positional Lead-k (0.3319) methods. The semantic approach captures important sentences regardless of their position in the document, unlike positional methods that rely primarily on document structure.

The third stage removes semantic duplicates based on cosine similarity of vector representations with a threshold of 0.85. Sentences are considered duplicates if their similarity exceeds this threshold. The algorithm has complexity $O(n \times m)$, where m is the size of the final unique sentence set.

The final abstractive generation phase utilizes the BART-large-CNN model (Bidirectional and Auto-Regressive Transformers), which combines bidirectional encoding of input text with autoregressive generation of output text. This enables creation of coherent summaries with model-generated phrasing, paraphrasing capabilities.

Software implementing the method was developed in accordance with SOLID principles, ensuring modularity and component replaceability. The architecture includes four interfaces and corresponding implementation classes coordinated through a central Pipeline class.

A comparative study of the complete method was conducted on a dataset of scientific articles from arXiv. Five documents of varying length (3000 words to 6000 words) from physics and mathematics were selected. Quality assessment employed ROUGE metrics (ROUGE-1, ROUGE-2, ROUGE-L) and BERTScore. The proposed method demonstrated the highest ROUGE-1 F1 score (0.5852 ± 0.027), which is 4.4 % better than the specialized LongT5 model with extended context window (16384 tokens) and 16.1 % better than baseline Map-Reduce+BART. For ROUGE-2 metric, the advantage was 44.9 % compared to LongT5. BERTScore results confirmed method effectiveness, showing the best result among all studied approaches.

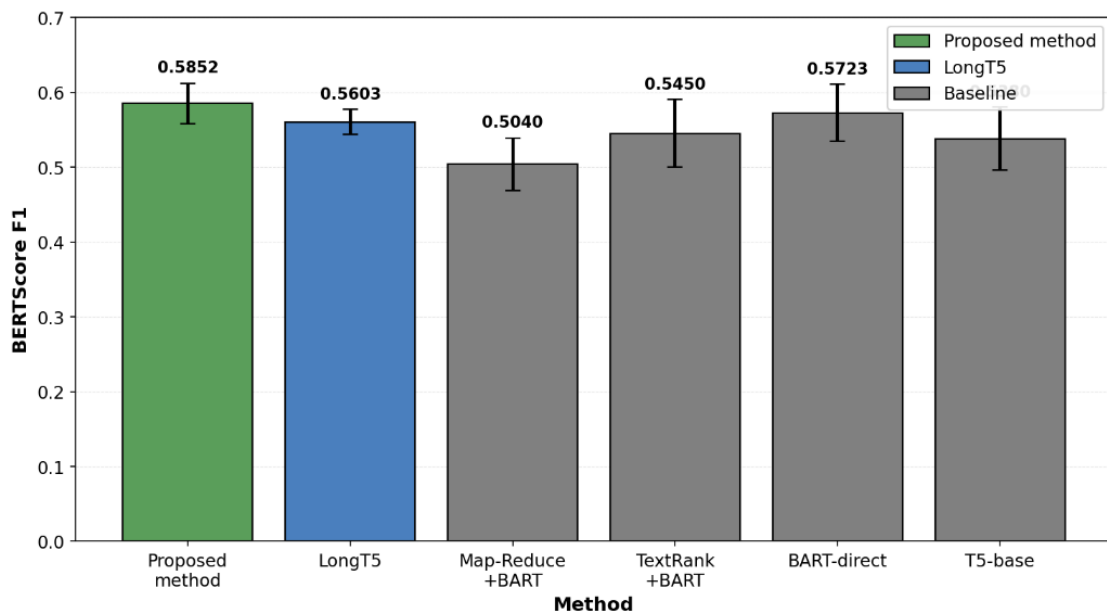


Figure 1 – BERTScore F1 comparison of different methods on arXiv documents

As demonstrated in Fig. 1, the proposed hybrid method achieved the highest BERTScore F1 of 0.5852, outperforming the specialized LongT5 model (0.5603) by 4.4 % and the baseline Map-Reduce+BART approach (0.5040) by 16.1 %. The method also surpassed BART-direct (0.5723), TextRank+BART (0.5450), and T5-base (0.5380) approaches. For ROUGE-2 metric, the proposed method demonstrated a 44.9 % advantage over LongT5. These results confirm that the integration of semantic extraction using Sentence-BERT with BART-based abstractive generation creates an effective solution for long document summarization without requiring specialized models with extended context windows or additional pre-training. The practical advantages of the proposed approach extend beyond quality metrics to deployment considerations. Unlike specialized long-context models that require substantial GPU memory (LongT5 demands approximately 16 GB for inference), the proposed method operates efficiently with standard hardware configurations, requiring only from 6 GB to 8 GB of GPU memory due to its chunk-based processing strategy. This reduced resource footprint enables deployment on widely available consumer-grade GPUs and facilitates integration into existing document processing pipelines without infrastructure upgrades. Furthermore, the modular architecture allows for incremental processing of extremely long documents (exceeding 20,000 tokens) that would be entirely impractical for monolithic transformer models, even those with extended context windows. These characteristics make the method particularly suitable for real-world applications in academic institutions and research organizations with limited computational resources.

Conclusions. A hybrid method for summarizing long scientific documents was developed, combining document splitting into overlapping fragments, semantic extraction using Sentence-BERT, semantic duplicate removal through cosine similarity of vector representations, and abstractive generation using BART-large-CNN. The method enables processing of documents of arbitrary length without specialized models with extended context windows. Software implementation adhering to SOLID principles ensures modularity and component replaceability. Comparative study results demonstrate that the proposed method achieves 4.4 % improvement over the specialized LongT5 model while using the standard BART-large-CNN model without additional pre-training, significantly reducing computational requirements. An important consideration in evaluating summarization systems is their behavior across different document structures and scientific domains. The proposed method demonstrates robust performance on documents with varying organizational patterns, including traditional IMRaD structure (Introduction, Methods, Results, Discussion) common in experimental sciences, as well as more theoretical papers in mathematics and computer science that may follow alternative structures. The semantic extraction approach adapts naturally to these variations because it identifies important content based on meaning rather than position or formatting conventions.

References:

1. See A., Liu P. J., Manning C. D. Get to the point: Summarization with pointer-generator networks. In Proceedings of the 55th Annual Meeting of the Association for Computational Linguistics. 2017. Vol. 1. P. 1073–1083. <https://doi.org/10.18653/v1/P17-1099>
2. Huang L., Wu L., Wang L. An empirical survey on long document summarization: Datasets, models, and metrics. *ACM Computing Surveys*. 2022. 55(8), Article 157. <https://doi.org/10.1145/3545176>
3. Lewis M., Liu Y., Goyal N., et al. BART: Denoising sequence-to-sequence pre-training for natural language generation, translation, and comprehension. In Proceedings of ACL 2020. P. 7871–7880. <https://doi.org/10.18653/v1/2020.acl-main.703>
4. Zhang J., Zhao Y., Saleh M., Liu P.J. PEGASUS: Pre-training with extracted gap-sentences for abstractive summarization. In Proceedings of ICML 2020. P. 11328–11339. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1912.08777>
5. Beltagy I., Peters M. E., Cohan A. Longformer: The long-document transformer. 2020. arXiv preprint arXiv:2004.05150. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2004.05150>
6. Reimers N., Gurevych I. Sentence-BERT: Sentence embeddings using Siamese BERT-Networks. In Proceedings of EMNLP 2019. P. 3982–3992. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1908.10084>

¹ Postgraduate 2nd year Titov V. M.

¹ Assoc.prof., cand.eng.sc. Shapovalova S. I.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=biglE98AAAAJ&hl=en>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

IMPROVING SHORT-TERM LOAD FORECASTING ACCURACY FOR THE UNIFIED POWER SYSTEM OF UKRAINE: AN ANALYSIS OF PROSPECTIVE DIRECTIONS

Statement of the problem and its relevance. Electricity consumption forecasting constitutes a fundamental task in the operational management of Ukraine's Unified Power System (UPS). The growing penetration of renewable energy sources, inherent non-stationarity in diurnal and seasonal load profiles, and the influence of meteorological factors collectively impose increasingly stringent demands on forecasting model accuracy. In the previous work [1], a comparative study of three architectures: LSTMSeq2Seq, Temporal Fusion Transformer (TFT), and Chronos-T5 Large was conducted using UPS data for 2017–2021. On a 168-hour forecast horizon, Chronos achieved a MAPE of 3,11 %, followed by LSTM (3,46 %) and TFT (3,78 %). However, a subsequent analysis of these results revealed systematic opportunities for improvement associated with the limited input feature space, architectural constraints of the models employed, and the evaluation methodology adopted.

Analysis of the latest research. Current research in power system load forecasting is advancing along several fronts. The work in [2] introduces a digital twin approach with multi-horizon analysis across 6 hours to 168 hours windows and a comparison of direct and recursive forecasting strategies. The integration of attention mechanisms into recurrent architectures [3] enables the decoder to dynamically attend to the most relevant time steps, while [4] demonstrates that domain-specific climate features yield substantial forecasting improvements. A distinct line of inquiry involves foundation model adaptation: [5] establishes the efficacy of contrastive curriculum learning for fine-tuning transformers on limited energy data. Notably, such approaches have shown promise even under data scarcity conditions typical of emerging energy markets, where historical records may span only a few years. Statistical rigour in model comparison is addressed in [6], where the Diebold-Mariano test provides a formal framework for assessing the significance of inter-forecast differences.

Goal formulation. Building upon the limitations identified in the preceding study [1], to systematize and substantiate the key directions for improving short-term electricity consumption forecasting for Ukraine's UPS through the application of neural network models.

Main part. Drawing on the limitations identified in [1] and the literature surveyed above, three principal directions for forecast quality improvement have been delineated, each targeting a specific bottleneck of the baseline study.

Feature space expansion. In the baseline study [1], the input space was confined to raw consumption values, generation output by plant type, and mean daily temperature, overall twelve parameters. The first avenue of improvement involves enriching the dataset with derived features. Cyclical encoding of temporal markers (sine/cosine transformations for hour of day, day of week, and month of year) ensures a correct representation of consumption periodicity in continuous space. The introduction of climate-derived variables heating degree days ($HDD = \max(18 - T, 0)$), cooling degree days ($CDD = \max(T - 22, 0)$), a thermal discomfort index, and interaction terms (temperature * hour of day, HDD * business hours) equips the model to capture the non-linear influence of temperature on load [4]. Further expansion through a lagged feature structure (spanning 1 hour to 168 hours), rolling window statistics over 168 hours windows, exponentially weighted moving averages, and calendar indicators (public holidays, weekends, and pre-holiday periods tailored to Ukraine's calendar) yields a feature space exceeding 70 variables.

Architectural modifications of neural networks. The baseline LSTMSeq2Seq architecture in [1] employed a unidirectional encoder without an attention mechanism. Transitioning to bidirectional encoding (BiLSTM) enriches the latent representation by simultaneously accounting for both forward and backward temporal context. Incorporating a Bahdanau attention mechanism [3] into the decoder allows the model, at each generation step, to dynamically weight the contributions of encoder hidden states, thereby focusing on the most informative time steps. To mitigate the train-inference discrepancy (exposure bias), a scheduled teacher forcing strategy with gradual annealing (from 0,8 to 0,1) is advisable, as it stabilizes predictions over longer horizons. Extending the comparison to eight models spanning distinct paradigms: statistical (SARIMA), gradient boosting (LightGBM, XGBoost), recurrent (LSTM), transformer-based (TFT, PatchTST), fully connected (N-BEATS), and foundation models (Chronos). It would establish a robust basis for principled model selection and ensemble strategies.

Multi-horizon validation and statistical rigour. In [1], forecast quality was assessed on a single 168-hour horizon using the MAPE metric. A comprehensive evaluation requires systematic analysis across a range of horizons from 6 hours to 168 hours. Revealing the boundaries of applicability for each model class [2]. The MASE metric, which normalizes the error against a naïve seasonal benchmark, offers a more objective assessment: a value of $MASE < 1$ serves as a formal criterion of superiority over the baseline approach. Applying the Diebold-Mariano test [6] for pairwise comparison of forecasts enables verification of whether inter-model differences are statistically significant, which is an essential prerequisite for drawing valid conclusions.

Conclusions.

1. Based on an analysis of experimental results in neural-network-based electricity consumption forecasting for Ukraine and a review of the relevant literature, three directions for improving UPS load forecasting quality have been systematized: feature space expansion, architectural modifications of neural networks, and refinement of the validation methodology.

2. Pathways for improving forecasting accuracy have been substantiated: expanding the dataset from 12 baseline parameters to over 70 derived features, and modifying neural network architectures through bidirectional encoding (BiLSTM), Bahdanau attention mechanisms, and teacher forcing annealing.

3. The necessity of transitioning to multi-horizon validation from 6 hours to 168 hours employing the MASE metric and the Diebold-Mariano test has been established. Experimental verification of the proposed directions constitutes the subject of further research.

References:

1. Shapovalova S. I., Titov V. M. Forecasting electricity consumption in Ukraine based on neural network approaches. Computer Modelling and Optimization of Complex Systems (CMOCS-2025) : proceedings of the IX International Scientific and Technical Conference. November 5–7, 2025. P. 224–225.
2. Bayer D. R., Felix H., Marco P., Konstantin H. Electricity demand forecasting in future grid states: a digital twin-based simulation study. Proceedings of the 9th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech). 2024.
3. Bahdanau D., Cho K., Bengio Y. Neural machine translation by jointly learning to align and translate. Proceedings of the 3rd International Conference on Learning Representations (ICLR). 2015.
4. Lim B., Arik S. Ö., Loeff N., Pfister T. Temporal fusion transformers for interpretable multi-horizon time series forecasting. International Journal of Forecasting. 2021. V. 37, № 4. P. 1748–1764.
5. Rui L., Yang D., Donghua X. et al. Enabling time-series foundation model for building energy forecasting via contrastive curriculum learning. arXiv preprint. 2024.
6. Diebold F. X., Mariano R. S. Comparing predictive accuracy. Journal of Business & Economic Statistics. 1995. V. 13, № 3. P. 253–263.

¹ Аспірант 2 курсу Заковоротний О. І.

¹ Проф., д.т.н. Аушева Н. М.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=KSRT4AAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ОПТИМІЗАЦІЯ СУПЕРПАРАМЕТРІВ НЕЙРОННИХ МЕРЕЖ У ЗАДАЧАХ ПРОГНОЗУВАННЯ ДИНАМІКИ ТРЕНДІВ ТА ЦІН ФОНДОВОГО РИНКУ

Постановка проблеми та її актуальність. Прогнозування динаміки трендів та цін на фондовому ринку є складною задачею через нестаціонарність фінансових часових рядів, високу волатильність та зміну статистичних залежностей у часі. Для моделювання таких процесів широко застосовуються рекурентні нейронні мережі, зокрема архітектура Long Short-Term Memory (LSTM), здатна враховувати довгострокові часові залежності між спостереженнями.

Якість прогнозу LSTM-моделі визначається не лише її вагами, які оптимізуються під час навчання, а й суперпараметрами – швидкістю навчання, кількістю шарів, розміром прихованого стану, параметрами регуляризації тощо. На відміну від ваг мережі, ці параметри не налаштовуються стандартними градієнтними методами та мають підбиратися окремим алгоритмом оптимізації.

Фактично для кожної конфігурації суперпараметрів необхідно навчити модель та оцінити її якість на вибірці, що перетворює задачу на пошук мінімуму складної, нелінійної та дорогої для обчислення функції якості. При високих наборах параметрів неефективні стратегії перебору швидко стають неприйнятними для обчислень, що обґрунтовує необхідність застосування спеціалізованих алгоритмів оптимізації [1–3]. Таким чином, вибір методу пошуку суперпараметрів є ключовим фактором підвищення точності LSTM-моделей у задачах прогнозування динаміки цін та трендів.

Аналіз останніх досліджень. Стохастичні підходи для пошуку конфігурацій показали високу ефективність у багатовимірних просторах, де лише частина параметрів суттєво впливає на якість моделі. Випадковий пошук забезпечує кращу ймовірність знаходження перспективних областей простору порівняно з повним перебором [1].

Байєсівська оптимізація розглядає задачу як послідовний процес побудови ймовірнісної моделі функції втрат та вибору наступної конфігурації з урахуванням невизначеності. Такий підхід дозволяє суттєво зменшити кількість необхідних запусків моделі при дорогому навчанні [2, 3].

Для складних та змішаних просторів параметрів запропоновано підхід Tree-Structured Parzen Estimator (TPE), який моделює умовні густини конфігурацій замість безпосередньої апроксимації функції втрат, що підвищує масштабованість алгоритму [4].

Методи багаторівневої оптимізації спрямовані на ефективний розподіл обчислювального ресурсу. Стратегія раннього відсіювання дозволяє зосередити обчислення на перспективних конфігураціях та скоротити сумарний час пошуку [5].

Поєднання оптимізації та навчання в межах популяції моделей реалізовано у Population-Based Training, що забезпечує адаптивність суперпараметрів у динамічних середовищах, зокрема при роботі з фінансовими часовими рядами [6].

Формулювання мети. Метою роботи є систематичний аналіз алгоритмічних принципів і практичної доцільності п'яти методів оптимізації суперпараметрів – Random Search, Bayesian Optimization, TPE, Hyperband та Population-Based Training – у задачах налаштування LSTM-моделей для прогнозування фондового ринку.

Основна частина. Випадковий пошук (Random Search) ґрунтується на незалежному виборі конфігурацій суперпараметрів з деякого розподілу:

$$\lambda^{(t)} \sim p(\lambda), t = 1, \dots, T. \quad (1)$$

Для кожної конфігурації виконується навчання моделі та обчислюється $F(\lambda^{(t)})$. Алгоритм не використовує інформацію про попередні результати, проте забезпечує рівномірне дослідження всього простору можливих варіантів. Його ефективність пояснюється тим, що лише частина параметрів суттєво впливає на значення функції втрат. Завдяки незалежності запусків метод легко паралелізується та часто застосовується як базовий етап пошуку [1].

Байєсівська оптимізація будує сурогатну модель функції $F(\lambda)$, зазвичай у вигляді гаусового процесу:

$$F(\lambda) \sim \mathcal{GP}(m(\lambda), k(\lambda, \lambda')). \quad (2)$$

Після кожного обчислення $F(\lambda)$ параметри процесу оновлюються, формуючи апостеріорний розподіл. Наступна конфігурація визначається шляхом максимізації acquisition-функції, яка відображає компроміс між дослідженням та використанням. Одна з найпоширеніших таких функцій має назву Expected Improvement і задається як

$$EI(\lambda) = \mathbb{E}[\max(0, F_{\text{best}} - F(\lambda))]. \quad (3)$$

Такий механізм дозволяє зменшити кількість необхідних експериментів, що особливо важливо при дорогому навчанні LSTM-моделей. Разом з тим, оновлення гаусового процесу має складність $\mathcal{O}(n^3)$, що обмежує масштабованість при великій кількості спостережень [2, 3].

Tree-Structured Parzen Estimator переосмислює байєсівську схему, моделюючи не безпосередньо $F(\lambda)$, а умовні густини:

$$p(\lambda \mid y < y^*), p(\lambda \mid y \geq y^*), \quad (4)$$

де y^* – певний квантиль розподілу втрат.

Вибір нової конфігурації здійснюється шляхом максимізації відношення:

$$\frac{l(\lambda)}{g(\lambda)}, \quad (5)$$

де $l(\lambda) = p(\lambda \mid y < y^*)$, $g(\lambda) = p(\lambda \mid y \geq y^*)$.

Такий підхід краще працює у випадку змішаних та ієрархічних просторів параметрів, що характерно для складних LSTM-архітектур [4].

Hyperband реалізує іншу стратегію – ефективний розподіл обчислювального бюджету. Нехай R – максимальна кількість епох, а $\eta > 1$ – коефіцієнт скорочення. На кожному етапі зберігається лише $\lceil n/\eta \rceil$ найкращих конфігурацій, для яких збільшується бюджет навчання. Такий підхід дозволяє швидко відсіювати неефективні конфігурації без повного навчання всіх моделей [5].

Population-Based Training поєднує оптимізацію та навчання. Розглядається популяція $\{(w_j, \lambda_j)\}_{j=1}^M$, яка періодично проходить етап відбору та модифікації. Суперпараметри оновлюються за правилом

$$\lambda_j \leftarrow \lambda_j + \varepsilon, \quad (6)$$

де ε – випадкова мутація.

Частина моделей може переймати ваги від більш успішних представників популяції. Це дозволяє адаптувати параметри в процесі навчання без повного перезапуску моделі [6].

Порівняльний аналіз методів. Random Search характеризується лінійною залежністю обчислювальних витрат від кількості запусків $\mathcal{O}(T \cdot C_{\text{train}})$, та високою масштабованістю за рахунок паралелізації [1].

Bayesian Optimization забезпечує високу ефективність використання вибірки, однак складність $\mathcal{O}(n^3)$ обмежує її застосування у великих експериментах [2, 3].

TPE зменшує обчислювальні накладні витрати та є більш придатним для складних просторів параметрів [4].

В свою чергу Hyperband дозволяє раціонально використовувати бюджет навчання, що є важливим для глибоких LSTM-моделей [5]. Population-Based Training забезпечує адаптивність до змін ринку, проте вимагає одночасного підтримання декількох моделей із витратами $\mathcal{O}(M \cdot C_{\text{train}})$ [6]. Табл. 1 відображає ключові моменти порівняльної характеристики описаний методів.

Таблиця 1 – Порівняльна таблиця методів оптимізації суперпараметрів моделі

Метод	Ефективність вибірки	Масштабованість	Паралелізація	Обчислювальна складність
Random Search	Низька–середня	Висока	Висока	$\mathcal{O}(T \cdot C_{\text{train}})$
Bayesian Optimization	Висока	Обмежена	Обмежена	$\mathcal{O}(n^3)$
TPE	Висока	Висока	Середня	Нижча за GP
Hyperband	Середня–висока	Висока	Висока	Залежить від параметрів R, η
PBT	Середня	Висока	Висока	$\mathcal{O}(M \cdot C_{\text{train}})$

Висновки. Оптимізація суперпараметрів є необхідною умовою побудови конкурентоспроможних LSTM-моделей для прогнозування фондового ринку. Розглянуті методи демонструють різні компроміси між ефективністю використання вибірки та обчислювальними витратами.

Для вирішення задачі прогнозування динаміки трендів та цін фондового ринку доцільно поєднувати підходи різних класів та оцінювати їх вплив на стабільність і точність прогнозів з урахуванням доступного обчислювального ресурсу.

Перелік посилань:

1. Bergstra J., Bengio Y. Random Search for Hyper-Parameter Optimization. Journal of Machine Learning Research. 2012. vol. 13, no. 10, P. 281–305.
2. Snoek J., Larochelle H., Adams R.P. Practical Bayesian Optimization of Machine Learning Algorithms. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2012. P. 2951–2959.
3. Brochu E., Cora V. M., de Freitas N. A Tutorial on Bayesian Optimization of Expensive Cost Functions, with Application to Active User Modeling and Hierarchical Reinforcement Learning. arXiv preprint arXiv:1012.2599, 2010.
4. Bergstra J., Bardenet R., Bengio Y., Kégl B. Algorithms for Hyper-Parameter Optimization. Advances in Neural Information Processing Systems (NeurIPS). 2011. P. 2546–2554.
5. Li L., Jamieson K., DeSalvo G., Rostamizadeh A., Talwalkar A. Hyperband: A Novel Bandit-Based Approach to Hyperparameter Optimization. International Conference on Learning Representations (ICLR), 2017.
6. Jaderberg M. et al. Population Based Training of Neural Networks. arXiv preprint arXiv:1711.09846, 2017.

¹ Магістрант 2 курсу Логвиненко В. Є.¹ Проф., д.т.н. Аушева Н. М.<https://scholar.google.com.ua/citations?user=KSRtRI4AAAAJ&hl=uk>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕТОДИ АПРОКСИМАЦІЇ РЕПУЛЬСИВНИХ СИЛ В СИЛОВОМУ МАКЕТУВАННІ ГРАФІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Зі зростанням обсягів даних, які традиційно представляються у вигляді графа (соціальні мережі, телекомунікаційні системи, платіжні транзакції тощо) задача побудови силових макетів вимагає більшої швидкості, аніж здатен запропонувати класичний силовий метод Фрухтермана-Рейнгольда [1] в тому вигляді в якому він є. Попри високу якість розміщення, квадратична складність алгоритму Фрухтермана-Рейнгольда є найбільшою проблемою при візуалізації графів з 10^5 та більше вершин.

Аналіз останніх досліджень. Останні дослідження в цій темі переважно зосереджені на зменшенні вартості однієї ітерації, оскільки інтерактивність візуалізації є ключовим фактором для ефективного аналізу великих графових структур. Одним із домінуючих напрямків є апроксимація сил відштовхування, оскільки саме цей компонент формує квадратичну складність алгоритму. В межах цього підходу можна виділити 3 основних методи – просторова апроксимація, стохастична та топологічна.

Алгоритм Барнса-Гата. Алгоритм Барнса-Гата (англ. *Barnes-Hut*) [2] для моделювання гравітаційної задачі N тіл знайшов своє застосування у якості алгоритму для побудови силових макетів графа. Метод використовує так звану просторову апроксимацію, суть якої полягає в об'єднанні вершин за їх початковим положенням у візуалізованому просторі.

Будемо вважати, що простір в якому відбувається відображення графа, є прямокутним. Такий простір рекурсивно поділяється на 4 рівні області до досягнення такої структури, де кожна підобласть містить одну або нуль вершин. Таким чином увесь граф зберігається в ієрархічному дереві, обхід якого проводиться під час підрахунку сумарної репульсії на конкретну вершину. Ті вузли, які задовольняють заздалегідь визначеному критерію апроксимації, не деталізуються. Такий неповний обхід дерева дозволяє спростити складність обчислення сил для однієї вершини до $O(\log n)$ замість $O(n)$, а складність повного алгоритму зменшується до $O(n \log(n))$.

Проте, попри асимптотичне прискорення, підхід демонструє суттєві обмеження при реалізації на GPU через нерегулярний обхід ієрархічного дерева, що призводить до так званого *thread divergence*, коли окремі потоки залишаються в режимі очікування попри наявність ресурсів [5, 6].

Випадкова вибірка вершин (англ. *Random Vertex Sampling, RVS*). Ідея стохастичної апроксимації [3] полягає в наступному. Нехай V – множина всіх вузлів графа. На кожній ітерації обирається випадковим чином множина $U \subset V$. Для кожної i вершини з множини U репульсія обчислюється лише з вузлами іншої випадкової множини S_i . Тоді оцінка сили має вигляд:

$$\tilde{F}_r(i) = \frac{n-1}{|S_i|} \sum_{j \in S_i} F_r(i, j), \quad (1)$$

де n – кількість вершин у графі;

$|S_i|$ – кількість елементів у випадковій множині S_i ;

$F_r(i, j)$ – репульсія, що діє на i -ту вершину від j -тої.

Для контролю складності автори пропонують ввести деякий параметр ϕ , що буде визначати кількість елементів в множинах U та S_i . Припустимо, що

$$|U| = n^\phi \text{ та } |S_i| = n^{1-\phi}, \quad (2)$$

де n – кількість вузлів в графі;

$|U|$ – кількість елементів в множині U ;

$|S_i|$ – кількість елементів в множині S_i .

Тоді можемо зазначити, що кількість пар, для яких потрібно обчислити репульсію на кожній ітерації i буде дорівнювати

$$|U| * |S_i| = n^\phi * n^{1-\phi} = n. \quad (3)$$

В такому випадку складність алгоритму зменшується від $O(n^2)$ до $O(n + m)$, де m – кількість ребер у графі.

Фактично RVS можна інтерпретувати як застосування методу Монте-Карло, де точна величина репульсії пропонують обчислювати через стохастичну оцінку цієї суми на основі випадкової підвибірki. Тобто:

$$F_r(i) = \mathbb{E}[\tilde{F}_r(i)], \quad (4)$$

де $\mathbb{E}[\tilde{F}_r(i)]$ – математичне сподівання репульсії отриманої з випадкової вибірки S_i . Важливо розуміти, що основною умовою для ствердження (4) є рівномірність відбору, тобто метод семплінгу повинен гарантувати однакову ймовірність потрапляння кожної величини в вибірку S_i . Тоді можемо вважати що $\tilde{F}_r(i)$ є точковою незміщеною статистичною оцінкою величини $F_r(i)$.

Важливим недоліком RVS є обернена пропорційність розміру вибірки S_i до дисперсії величини $F_r(i)$. Це означає, що для досягнення еквівалентної до стандартного алгоритму FR збіжності графу потребується більша кількість ітерацій. Таким чином, RVS може надати більшу швидкість ітерації, а одночасно більший FPS, проте буде потребувати більшого часу роботи для досягнення зазначених критеріїв збіжності.

Топологічна апроксимація. Топологічний підхід передбачає попередню побудову мультирівневої структури графів перед виконанням силового макетування. Кожна вершина графу верхнього рівня репрезентує зв'язний підграф нижнього. Автори [4] розділяють репульсію на 2 компоненти – внутрішньокластерна взаємодія лише з вершинами свого кластера (*англ. internal-electric-force*) та зовнішню компоненту сили (*англ. external-electric-force*), успадковану від батьківського графа, якщо такий існує.

Припустимо, що використовується стандартна модель сил:

$$F_{rep}(i, j) = f_{rep}(d_{ij}) * \mathbf{u}_{ij}, \quad (5)$$

де d_{ij} – евклідова відстань між i та j вершиною;

$\mathbf{u}_{ij}$ – одиничний вектор у напрямку застосування сили;

$f_{rep}(d_{ij})$ – функція відстані, що визначає силу відштовхування.

Також, припустимо що ієрархічну модель вже побудовано, та $c_a, c_b, \dots, c_M$ – вершини-кластери найвищого рівня, M – кількість кластерів на найвищому рівні. Тоді репульсія для кластеру c_i обчислюється як:

$$F_{rep}(c_i) = \sum_{\substack{v_l \in C_i \\ j \neq i}} w_i w_j f(d_{ij}) * \mathbf{u}_{ij}, \quad (6)$$

де w_i, w_j – ваги кластерів c_i і c_j відповідно;

C_i – множина вершин, що належать кластеру C_i .

Для кожної вершини v_k в кластері c_i виконується та рекурсивно повторюється в разі наявності дочірніх вузлів:

$$F_{rep}(v_k) = F_{rep}(c_i) + \sum_{l \neq k} f(d_{kl}) * \mathbf{u}_{kl}. \quad (7)$$

Топологічна апроксимація зменшує складність обчислювального алгоритму до $O(NP)$, де P – середній розмір кластера. Як і стохастична апроксимація, цей метод не гарантує швидкого досягнення критеріїв збіжності і фокусується на часі самої ітерації, проте коректність обраного методу кластеризації може суттєво вплинути на фактичну кількість ітерацій.

Висновки. У роботі виконано порівняльний аналіз просторової, стохастичної та топологічної апроксимацій сил відштовхування у задачі силового макетування графів. Просторова апроксимація забезпечує високу якість макету, однак є неефективною при GPU-реалізації. Стохастичний підхід характеризується лінійною складністю і простою паралелізацією, що робить його придатним для інтерактивних сценаріїв, проте він має повільнішу збіжність. Топологічна апроксимація дозволяє зменшити кількість ітерацій без суттєвої втрати якості, але потребує попередньої обробки та залежить від якості кластеризації.

Подальші дослідження пов'язані з розробкою адаптивних гібридних підходів, що поєднують різні стратегії прискорення в межах одного алгоритму, а також вивчають вплив методів попередньої обробки, формул обчислення сил та параметрів алгоритму на швидкість збіжності та кінцеву якість макету.

Перелік посилань:

1. Fruchterman T. M. J., Reingold E. M. Graph drawing by force-directed placement. Software: practice and experience. 1991. Vol. 21, no. 11. P. 1129–1164. URL: <https://doi.org/10.1002/spe.4380211102> (date of access: 27.02.2026).
2. Barnes J., Hut P. A hierarchical $O(N \log N)$ force-calculation algorithm. Nature. 1986. Vol. 324, no. 6096. P. 446–449. URL: <https://doi.org/10.1038/324446a0> (date of access: 27.02.2026).
3. Gove R. A Random Sampling $O(n)$ Force-Calculation Algorithm for Graph Layouts. Computer Graphics Forum EuroVis–2019. 2019. Vol. 38, No. 3.
4. Mi P., Sun M., Masiane M., Cao Y., North C. Interactive Graph Layout of a Million Nodes. Informatics. 2016. Vol. 3, No. 4. P. 23. DOI: 10.3390/informatics3040023.
5. Burtscher M., Pingali K. An Efficient CUDA Implementation of the Tree-Based Barnes Hut n-Body Algorithm. GPU Computing Gems. Boston: Morgan Kaufmann, 2011. Chapter 6. P. 75–92.
6. Lipp F., Wolff A., Hundt C., et al. Stochastic Barnes–Hut Approximation for Fast Force-Directed Graph Layout. IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics. 2021. Vol. 27, No. 2. P. 1230–1240.

¹ BS's programme 4th year Holub T. D.

¹ Assoc.prof., cand.econ.sc. Segeda I. V.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=cTob-AwAAAAJ>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

FINANCIAL MANAGEMENT SYSTEM WITH FORECASTING CAPABILITIES

Statement of the problem and its relevance. In the context of the ongoing digitalization of financial processes, there is a growing need for information systems that enable effective personal finance management. Irregular tracking of income and expenses, the lack of structured analysis of financial dynamics, and the absence of planning tools complicate the process of making well-grounded financial decisions. Most existing software solutions are implemented as monolithic systems, which limits their scalability, flexibility, and ability to integrate new functional modules. Therefore, the adoption of a microservices architecture is particularly relevant, as it ensures modularity, component independence, and deployment flexibility [1, 2].

Analysis of the latest research. In the field of modern information system development, there is a steady shift from monolithic architectures to microservices-based approaches. Microservices architecture enables the decomposition of a system into independent functional components, significantly simplifying scaling, updating, and maintaining software systems [2, 3]. This approach is especially critical for financial systems, where reliability, security, and gradual functional extensibility are key requirements.

Alongside architectural evolution, technologies for building user interfaces are also advancing. The use of component-oriented libraries such as React ensures high interactivity and responsiveness of web applications. Containerization, particularly with Docker, is considered an effective mechanism for isolated service deployment and environment standardization [3].

For storing financial data, the use of relational database management systems with transactional support and data integrity mechanisms, such as PostgreSQL, is appropriate [4].

In the domain of financial analytics, considerable attention is devoted to time series analysis. For assessing the dynamics of personal financial indicators, the application of basic statistical methods – specifically linear regression – is justified. This method enables the identification of trends and the generation of short-term forecasts [5]. The simplicity of the mathematical model ensures interpretability of results and allows the forecasting module to be implemented as a lightweight, standalone service.

The goal of this work is to develop a web-oriented personal finance management system based on a microservices architecture that provides structured accounting of financial transactions, monitoring of financial goal achievement, and budget forecasting using statistical analysis methods.

Main part. The system architecture is implemented in accordance with microservices principles, ensuring modularity, component isolation, and independent scalability of individual services. The client-side application is built using the React library, which enables the development of a dynamic and interactive user interface, supports component-based design, and simplifies further frontend updates. The server-side logic is distributed among the following components:

- user-service – implemented using Node.js; manages user profiles and provides authentication and authorization via JSON Web Token (JWT), ensuring secure data access;
- transaction-service – responsible for processing financial transactions, interacting with the database through an ORM layer, and maintaining logging and auditing of operations;

- goal-service – implements financial goal-setting logic and progress tracking, allowing users to evaluate achievement of planned objectives;
- analytics-service – performs mathematical calculations of trends and forecasting on the server side, including time series modeling.

A key architectural component is the API Gateway, which serves as the single entry point for all incoming requests. It acts as a protective layer, hiding the internal microservices network topology from external access. The Gateway performs centralized request routing, load balancing, and initial token validation, thereby unifying system-wide security.

Each service is deployed in a separate Docker container, ensuring isolation and enabling independent scalability. Interaction between services and the frontend is carried out via asynchronous requests to a RESTful API. Security is ensured through JWT-based authentication. Data storage is implemented using PostgreSQL, where transactional consistency and data integrity constraints are enforced for all entities.

Analytical Module. The system includes an analytical module designed to evaluate users' financial dynamics and forecast future indicators.

Linear regression is applied to formalize the general trend of income or expense changes over time. After aggregating data by month, a model of the following form is constructed:

$$y = a \cdot x + b,$$

where x – ordinal number of the period;

y – value of the financial indicator.

The coefficient a determines the nature of the trend (growth, decline, or stability), enabling estimation of the indicator for the subsequent period.

The module supports data aggregation by various periods (day, week, month) and implements filtering and expense categorization. This allows forecasting for specific groups of financial operations, such as utilities, groceries, or entertainment.

Analytical results are presented in the form of interactive charts and diagrams, enhancing the clarity of financial information and supporting effective planning.

Conclusions. The implementation of the system based on a microservices architecture transforms standard expense tracking into a flexible analytical tool. The use of linear regression enables the evaluation of financial dynamics and the generation of short-term forecasts even with limited user data. Future work will focus on incorporating seasonal budget fluctuations and implementing secure data synchronization mechanisms between services.

References:

1. Personal Finance Management in Modern Conditions: Scientific Analysis. Ministry of Education and Science of Ukraine. 2024. URL: <https://api.dspace.wunu.edu.ua/api/core/bitstreams/62988557-59c5-49cf-8177-39be45b23a2a/content> (date of access: 14.02.2026)
2. Gajula S. Architectural Transformation of Legacy Financial Systems: A Framework for Microservices, Cloud, and API Integration. International Journal of Information Technology and Management Information Systems. 2025. Vol. 16, Iss. 2. P. 75–84.
3. Suleymani T. Hands-On Microservices with JavaScript: Build scalable web applications with JavaScript, Node.js, and Docker. Packt Publishing. 2024. 450 p.
4. PostgreSQL 15 Documentation. PostgreSQL Global Development Group. 2025. URL: <https://www.postgresql.org/docs/15/index.html> (date of access: 15.02.2026).
5. Montgomery D. C., Peck E. A., Vining G. G. Introduction to Linear Regression Analysis. 6th ed. Wiley. 2021. 720 p. URL: <https://content.e-bookshelf.de/media/reading/L-16125104-1a3a7c5bd1.pdf> (date of access: 17.02.2026).

¹ BS's programme 4th year Malyarchuk B. V.

¹ Assoc.prof., cand.eng.sc. Demchyshyn A. A.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=uHZreb4AAAAJ&hl=uk>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

REVERSE PROXY LOAD-BALANCING SYSTEM

Statement of the problem and its relevance. In the modern world, users increasingly rely on online services for casual operations, such as image or audio format changes. To provide these services efficiently, backend systems must handle multiple requests concurrently while ensuring fast response times.

Building a system that integrates multiple conversion services under a single access point requires careful consideration of the balancing strategy. Each service has different computational requirements – for example, PDF conversion service is more CPU-intensive than audio format conversion—leading to heterogeneous workloads. An optimal load balancing strategy ensures that all service instances handle requests with minimal response times. In addition, monitoring and administrative interfaces are essential for analyzing resource utilization, and mitigating traffic surges.

Analysis of the latest research. Reverse proxy load balancing has been widely studied and implemented to optimize web service performance and reliability. Prominent software-based solutions include **Nginx**, **HAProxy**, and **Traefik** (a dynamic reverse proxy designed for modern containerized environments with native integration for Docker and Kubernetes). Cloud-oriented offerings, such as **AWS Elastic Load Balancer** and **Azure Application Gateway**, extend reverse proxy load balancing with automated scaling, SSL termination, and health checks.

Containerization technologies such as Docker opened the way for application portability and deployment consistency across diverse computing environments. Research efforts [1, 2] highlight the benefits of containers when compared to traditional virtual machines.

A specific challenge in distributed systems arise when the operated services differ in CPU, memory, and I/O usage characteristics, creating non-uniform workloads. Authors of [3] examine how different request distribution policies influence latency and throughput in multi-tier web services, demonstrating that static round-robin policies may be suboptimal when service execution times vary widely.

Evaluating balancing strategies under controlled conditions has also been a focus of the literature. Traffic generation tools such as Locust, Apache JMeter, and more recently k6 have been used to create synthetic workloads that mimic real-world user behavior, enabling precise measurement of latency, error rates, and resource usage across different configuration regimes. In containerized environments, studies often employ orchestration layers (e.g., Kubernetes, Docker Swarm) and overlay networks to assess how service discovery and internal routing affect end-to-end performance. Metrics collection via Prometheus, Grafana, or custom dashboards is commonly incorporated to provide real-time visualization of system state.

Goal formulation. The problem addressed in this paper is the design and implementation of a reverse-proxy-based load-balancing system for a multi-service web platform that performs file format conversions for multiple simultaneous users. The objective is to evaluate and compare different load balancing strategies at the reverse proxy level and determine which method provides the most efficient request distribution and optimal system performance while maintaining high availability.

Main part. The developed system is a reverse-proxy-based load-balancing system that routes client requests to multiple distributed backend service replicas using NGINX reverse proxy with routing behavior governed by system-controlled parameters. NGINX provides services under a single public IP address and performs TLS termination

The system consists of several coordinated components: configuration server with web-based GUI, a set of docker images hosted at hub.docker.com repository, services front page, k6 load and performance testing scenarios.

Configuration Server with web-based GUI allows users to register services and associate them with specific Docker images, register worker machines, and configure pools of machines available for each service. Metadata is stored in a persistent database. The web interface also provides monitoring and visualization of real-time statistics: machine load, health of running containers, and service latency.

“Services & Images” menu item brings panel where admin registers a new service and defines a respective Docker image name, access port and specifies the period of automatic container update or None for no automatic updates (fig. 1).

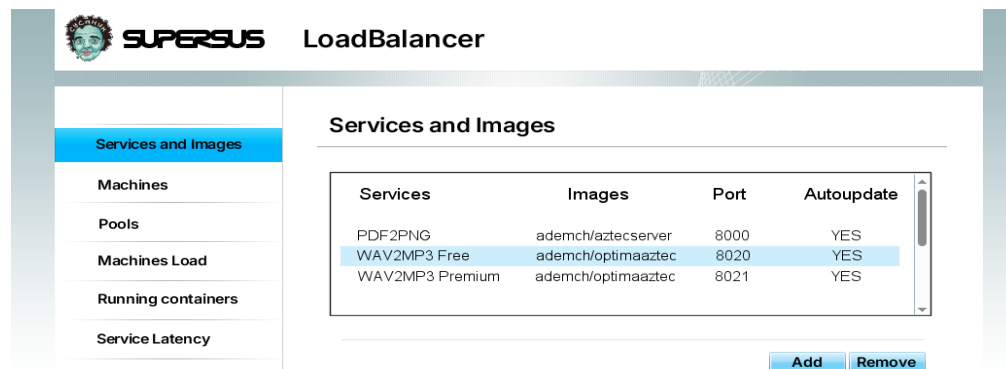


Figure 1 – “Services and Images” panel

“Machines” menu item brings panel for managing (adding and removing) IPs of available computers to run the services on (fig. 2).

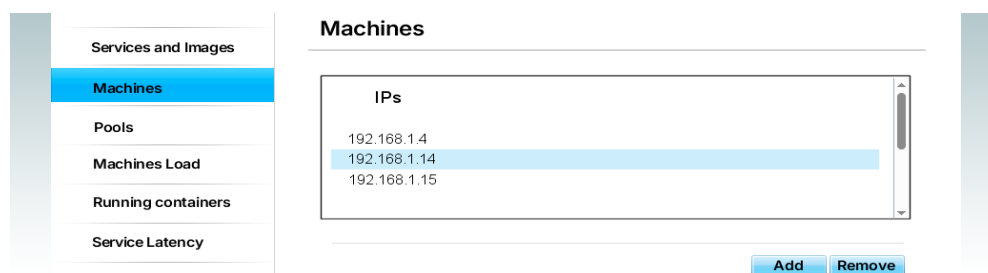


Figure 2 – “Machines” panel

“Pools” menu provides panel for specifying the contents of a pool for each service (fig. 3). It is possible to assign specific machines to the pool or select “Use All Machines” to make the service runnable on all registered computers. The panel contains conditions for containers horizontal growth, whether to start a new container when the number of existing connections is exceeded or the high load continues for more than specified number of minutes.

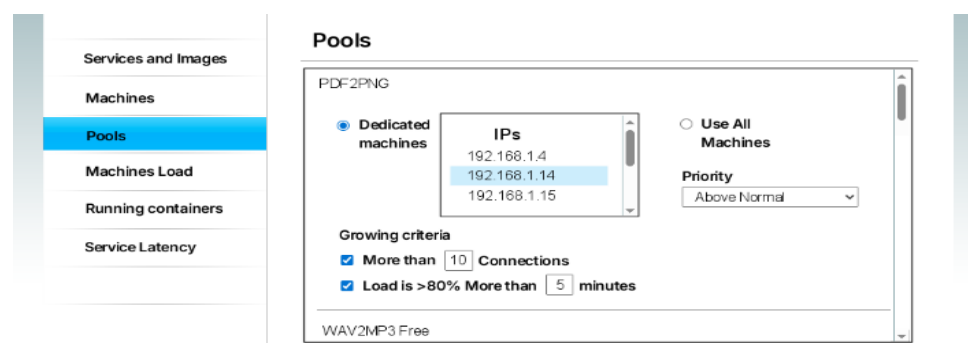


Figure 3 – “Pools” panel

“Machines Load” panel (fig. 4) provides the data as per individual machine helpful for managing existing computational resources.

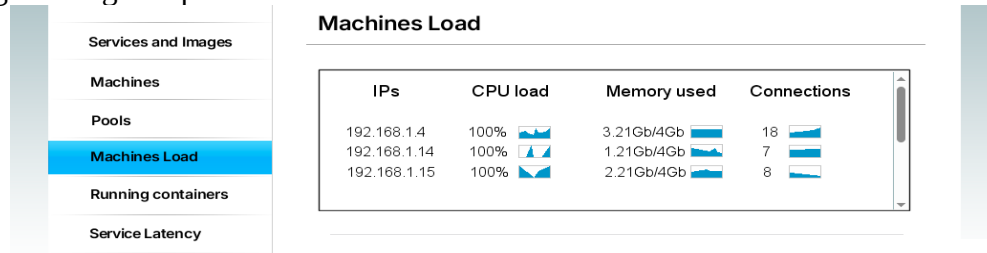


Figure 4 – “Machines Load” panel

“Running containers” panel (fig. 5) visualizes info on working containers and their versions.

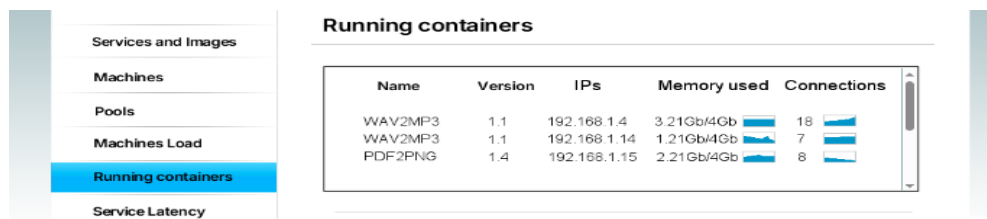


Figure 5 – “Running containers” panel

“Service Latency” panel (fig.6) monitors average completion time that is valuable during estimation of user satisfaction.

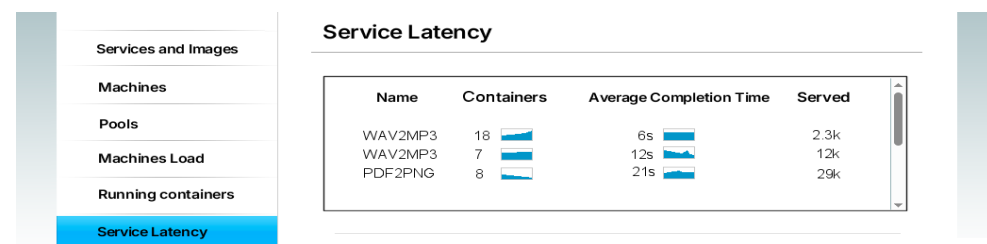


Figure 6 – “Service Latency” panel

User front page. At the front web page, the user can choose the service, upload a document for conversion and download processed result. *A set of docker images.* The backend consists of several containerized conversion services (PDF2PNG, WAV2MP3, and WEBP2PNG), each implemented as an independent Node.js application running in its own Docker container. This architecture enables independent scaling of services, isolation of failures, and supports controlled experimentation with different load balancing strategies. Each service exposes a REST API for file upload and download, as well as endpoints for control and monitoring, including the number of processed requests and the average request processing time.

Docker commands on remote machines are issued over SSH by generating an SSH key with ssh-keygen, copying the public key to the server using ssh-copy-id, and then running commands like ssh user@host docker ps.

Conclusions. Using a least-connections load balancer enhanced with weights and average service latency characteristic resulted in accurate traffic distribution by favoring both higher-capacity nodes and faster-responding instances, resulting in improved overall performance.

References:

1. Bernstein D. Containers and Cloud: From LXC to Docker to Kubernetes. IEEE Cloud Computing. 2014. 1(3). P. 81–84. DOI: 10.1109/MCC.2014.51.
2. Merkel D. Docker: Lightweight Linux Containers for Consistent Development and Deployment. Linux Journal. 2014. Article 2, 239. 5 p.
3. Cardellini V., Colajanni M., Yu P. S. Dynamic load balancing on web-server systems. IEEE Internet Computing. 1999. 3(3), P. 28–39.

¹ BS's programme 4th year Nahaivska D. O.

¹ Assist. Holovakin M. A.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=bdC3JMgAAAAJ>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

APPLICATION OF THE TRANSFORMER ARCHITECTURE FOR ATMOSPHERIC PRECIPITATION INTENSITY FORECASTING

Statement of the problem and its relevance. Atmospheric precipitation significantly affects the environment, agriculture, transportation, energy systems, and construction. Inaccurate or delayed forecasting of rain, snow, or heavy showers leads to economic losses and increases the risk of floods and traffic accidents. Traditional numerical weather models provide general forecasts but are limited in the quantitative prediction accuracy under local and rapidly changing weather conditions.

Analysis of the latest research. Recent studies in meteorological forecasting increasingly focus on machine learning and deep learning methods capable of capturing complex nonlinear relationships and long-term temporal dependencies. Traditional statistical and physical weather models (Numerical Weather Prediction, NWP) effectively describe large-scale atmospheric processes but show limited accuracy in quantitative precipitation forecasting at the local level, particularly during rapid weather changes. Therefore, recent research has actively explored machine-learning algorithms to improve short-term forecasting accuracy [1, 2].

Transformer-based neural network architectures demonstrate significant advantages in tasks involving multiple interrelated time series, including weather forecasting applications [3]. In this context, parameters with complex interdependencies such as temperature, humidity, and atmospheric pressure are typically analyzed.

The use of Transformers enables modeling these interdependencies, thereby improving forecasting performance. Owing to the self-attention mechanism, Transformers effectively capture long-term dependencies in sequential data, which is particularly important for short-term precipitation intensity forecasting. Combined with optimized training algorithms such as Adam and regression loss functions including MSE (Mean Squared Error) and MAE (Mean Absolute Error), these models can achieve predictive accuracy beyond that of classical machine learning approaches.

Research objective. The objective of this study is to investigate a precipitation intensity forecasting system based on historical meteorological data using a Transformer architecture.

Main part. To forecast atmospheric precipitation intensity, we employ a model based on the Transformer architecture, as proposed in [4]. The Transformer is a neural network architecture for sequence processing, relying entirely on the attention mechanism and not using recurrent or convolutional layers. The core component of the model is the self-attention mechanism, which enables the network to determine the relative importance of each element in the input sequence when generating a forecast.

The application of the Transformer architecture is justified by the nature of meteorological data, which involve complex nonlinear interactions among multiple variables and long-term temporal dependencies. Weather processes are influenced by numerous interrelated factors; therefore, accurate forecasting requires simultaneous analysis of multiple multivariate time series. Traditional recurrent models may lose information over long sequences or require substantial computational resources.

The model input consists of a historical sequence of meteorological parameters over a specified time window, including air temperature, relative humidity, atmospheric pressure, wind

speed and direction, as well as previous precipitation values. Each time step is represented as a feature vector. The self-attention mechanism allows the model to analyze relationships between all time steps in the sequence and identify which previous atmospheric states most strongly influence future precipitation intensity. The model generates an internal representation of the temporal dynamics of meteorological parameters, which is then used to generate a forecast for the target future time horizon.

The practical advantage of using Transformer models for precipitation forecasting lies in their ability to simultaneously consider multiple meteorological variables over long time horizons, capturing subtle temporal patterns and extreme events such as heavy showers or sudden storms. This capability allows for more accurate short-term local forecasts, which can directly support decision-making in agriculture, flood management, transportation, and energy sectors. By effectively modeling the interdependencies between variables, Transformers provide a robust framework for real-time adaptive forecasting, reducing economic losses and enhancing public safety during adverse weather conditions.

The model is trained in a supervised learning setting, where each input sequence corresponds to a known target precipitation intensity value. Regression loss functions such as MSE and MAE are used to evaluate prediction errors. Model parameters are optimized using the Adam algorithm through backpropagation. An important practical aspect of implementing the proposed model is the selection of the input time window and forecasting horizon. The length of the historical sequence influences the model's ability to capture both short-term fluctuations and longer atmospheric trends. A shorter window may allow faster adaptation to rapidly changing weather conditions, while a longer window enables the model to account for accumulated atmospheric dynamics preceding precipitation events.

In addition to model design, careful data preprocessing plays a crucial role in achieving high forecasting performance. Meteorological data often contain missing values, measurement noise, and temporal inconsistencies caused by sensor errors or maintenance interruptions.

Thus, the proposed approach is based on modern deep learning techniques for time series forecasting and enables effective modeling of complex relationships among meteorological variables for improved precipitation intensity prediction.

Conclusions. It is shown that numerical and statistical models have limitations in capturing complex relationships and long-term temporal dependencies among meteorological variables. A forecasting approach based on the Transformer architecture is proposed, which leverages the self-attention mechanism to effectively analyze interrelated time series data. The model structure, training procedure, and optimization methods are described. The implementation of the proposed approach is expected to improve short-term precipitation intensity forecasting accuracy and enable local predictions.

References:

1. Zhang T., et al. *Deep learning of flood forecasting*. 2025. URL : <https://hess.copernicus.org/articles/29/5955/2025/index.html> (date of access: 26.02.2026)
2. Rasp S., Dueben P. D., Scher S., Weyn J. A., Mouatadid S., Thuerey N. *WeatherBench: A benchmark dataset for data driven weather forecasting*. 2020. URL : <https://doi.org/10.48550/arXiv.2002.00469> (date of access: 26.02.2026)
3. Wu N., Green B., Ben X., O'Banion S. *Deep Transformer Models for Time Series Forecasting: The Influenza Prevalence Case* [Electronic resource]. 2021. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2001.08317> (date of access: 26.02.2026)
4. Vaswani A., Shazeer N., Parmar N. *Attention Is All You Need*. 2017. URL: <https://doi.org/10.48550/arXiv.1706.03762> (date of access: 26.02.2026)

¹ BS's programme 4th year Vanin A. V.

¹ Assist. Holovakin M. A.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=bdC3JMgAAAAJ>

¹ Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute

INTEGRATION OF A GENERATIVE AI MODEL INTO A SEMANTIC VECTOR-BASED MUSIC RECOMMENDATION SYSTEM

Statement of the problem and its relevance. With the increasing volume of media content, modern streaming services face the challenge of limited recommendation diversity. Traditional algorithms often suggest a narrow range of content based solely on listening history, resulting in low adaptability to a user's specific context or mood. The implementation of generative artificial intelligence models helps overcome these limitations by enabling personalization through the interpretation of complex natural language queries [1]. The integration of semantic and generative approaches represents a promising direction for improving adaptability, contextual awareness, and overall recommendation quality in contemporary streaming platforms.

Analysis of the latest research. An analysis of existing solutions demonstrates an active transition toward the application of transformer-based architectures in sequence modeling and multimodal representation learning [2]. Research in the field of Large Language Models and generative audio models shows high efficiency in understanding semantic relationships between text descriptions and musical characteristics [3]. However, the issue of integrating such models into high-load web applications with minimal latency remains open.

Contemporary research highlights the increasing importance of multimodal representation learning in music recommendation systems. Recent approaches integrate textual semantic embeddings with low-level acoustic features extracted directly from audio signals, including spectral, temporal, and harmonic descriptors. Such integration improves the alignment between user intent expressed in natural language and intrinsic musical characteristics, thereby enhancing recommendation accuracy and contextual sensitivity.

Research objective. To develop a method for generating personalized music recommendations based on semantic embeddings and implement it within the architecture of a music streaming web application.

Main part. To address the identified problem, a semantic matching method based on vector data representation was developed [4]. The web application architecture is implemented using the Node.js and React stack, ensuring asynchronous data processing. The method is based on a three-stage information transformation process (fig. 1), beginning with the formation of an input vector derived from the user's text prompt [5].

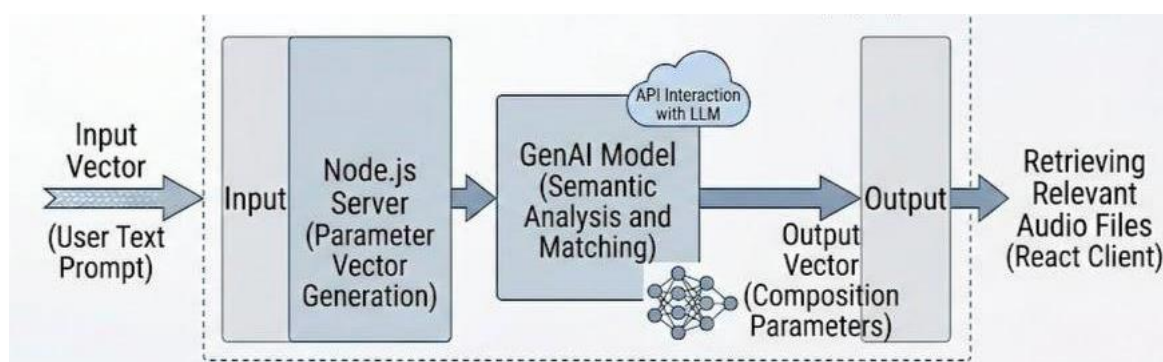


Figure 1 – Semantic Vector-Based Music Recommendation Process

The textual input is processed by a generative language model, which performs semantic analysis and produces a semantically enriched embedding representing the user's intent. This embedding is then matched with internal musical features such as tempo, key, and emotional tone. The final stage involves generating an output vector of relevant results used to query a vector database for the most appropriate audio tracks.

This architecture allows the Node.js server to efficiently coordinate interaction between the client interface and the intelligent model, ensuring high response speed and a significant increase in recommendation diversity beyond standard genre-based tagging.

The vector database stores precomputed embeddings of audio tracks generated using consistent feature extraction methods. By representing both user queries and audio files within the same semantic space, the system ensures efficient comparison through similarity metrics such as cosine similarity. This approach enhances scalability, as new tracks can be indexed by generating and storing their corresponding vectors without restructuring the database.

In addition, the modular architecture enables independent scaling of system components such as the AI inference layer, the database layer, and the frontend interface. The proposed system incorporates a feedback-driven refinement mechanism designed to continuously improve recommendation relevance. User interactions such as track skips, playlist additions, listening duration, and explicit ratings are collected and transformed into behavioral signals. These signals are subsequently embedded into the same semantic space as textual queries and audio features, enabling dynamic adjustment of recommendation vectors. As a result, the system gradually adapts not only to explicitly stated preferences but also to implicit behavioral patterns, increasing long-term personalization accuracy.

Overall, the integration of semantic embeddings, generative AI models, and scalable web technologies forms a cohesive framework capable of addressing modern challenges in music recommendation systems. The approach not only enhances contextual adaptability and diversity of suggested content but also establishes a flexible infrastructure for future extensions, including emotion-aware recommendation models and adaptive playlist generation.

Conclusions. The practical implementation confirms that semantic–generative integration can serve as an effective architectural paradigm for next-generation intelligent recommendation systems. The use of generative AI models enables flexible recommendation generation based on contextual understanding of user intent rather than solely on statistical listening history. The proposed architecture demonstrates the practical feasibility of integrating semantic embeddings and generative models within a scalable web-based system.

References:

1. Spotify Research. Text2Tracks: Improving Prompt-based Music Recommendations with Generative Retrieval. URL: <https://research.atspotify.com/2025/04/text2tracks-improving-prompt-based-music-recommendations-with-generative-retrieval> (date of access: 26.01.2026)
2. Vaswani A. et al. Attention Is All You Need. Advances in Neural Information Processing Systems. 2017. URL: <https://arxiv.org/abs/1706.03762> (date of access: 26.01.2026)
3. Huang Z., Chen C., Zeng Z. Dynamic Music Playlist Generation Using Deep Learning Techniques. Expert Systems with Applications. 2023. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0952197623017888> (date of access: 26.01.2026)
4. Spotify Research. Contextual and Sequential User Embeddings for Music Recommendation. URL: <https://research.atspotify.com/contextual-and-sequential-user-embeddings-for-music-recommendation> (date of access: 26.01.2026)
5. Mikolov T., Chen K., Corrado G., Dean J. Efficient Estimation of Word Representations in Vector Space. 2013. arXiv preprint. URL: <https://arxiv.org/abs/1301.3781> (date of access: 28.01.2026)

¹ Бакалаврант 4 курсу Білоус О. В.

¹ Доц., к.е.н. Сегеда І. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=cTob-AwAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ВЕБ-ЗАСТОСУНКУ ДЛЯ ПЛАНУВАННЯ ЗАДАЧ З ЕЛЕМЕНТАМИ ІГРОФІКАЦІЇ ТА ВІРТУАЛЬНИМ АВАТАРОМ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасному світі з вільним доступом до цифрового середовища, користувачі все частіше стикаються з проблемою дефіциту уваги та втрати мотивації при використанні традиційних методів планування завдань (To-Do lists). Звичайні цифрові або ж паперові плани швидко стають рутиною. Впровадження елементів ігрофікації та механік утримання інтересу через віртуального аватара є одним з варіантів вирішення питання залученості користувачів.

Аналіз останніх досліджень. Остання дослідження підтверджують, що впровадження ігрових елементів у неігрові процеси (такі як навчання або планування) дозволяє ефективно мотивувати користувача через систему віртуальних нагород та індикаторів прогресу [1].

Проекти, до прикладу Habbitica, демонструють успішне використання RPG-елементів у тайм-менеджменті, що доводить перспективу використання даної стратегії для розробки цифрових продуктів.

Метою даної роботи є розробка архітектури та реалізація веб-застосунку, який інтегрує механіки виконання запланованих завдань з ігор тематики RPG у процес планування задач, заохочуючи користувача виконувати поставлені задачі отриманням віртуальної нагороди.

Основна частина. Архітектура веб-застосунку побудована на принципах клієнт-серверної взаємодії з використанням принципу SPA (Single Page Application).

Архітектурними рівнями є:

Клієнтська частина реалізована з використанням фреймворку Angular, що базується на компонентно-орієнтованій архітектурі. Кожен елемент інтерфейсу (список задач, панель аватара, ігровий магазин) є окремим ізольованим модулем.

Для управління станом додатку та взаємодії з API в проєкті передбачені сервіси: «Сервіс автентифікації/авторизації»; «Сервіс управління завданнями»; «Сервіс артефактів» та «Сервіс аватарів».

Серверна частина – виступає в ролі REST API, обробляє запити від клієнта та реалізує основну бізнес-логіку додатку. В ній реалізовані контролери, що приймають HTTPS-запити, валідують отримані дані та повертають відповіді у форматі JSON. В склад серверної частини входить Шар логіки. Він відповідає за операції обчислення досвіду та ігрової віртуальної валюти, з урахуванням отриманих штрафів та використанням допоміжних модифікаторів заробітку валюти.

Для забезпечення зручної та безпечної взаємодії з базою даних, передбачається використання Entity Framework, як ORM-прошарок між різними рівнями архітектури.

Рівень даних – реалізований через реляційну СУБД SQL Server. Концептуальну схему базу даних представлено на рис. 1.

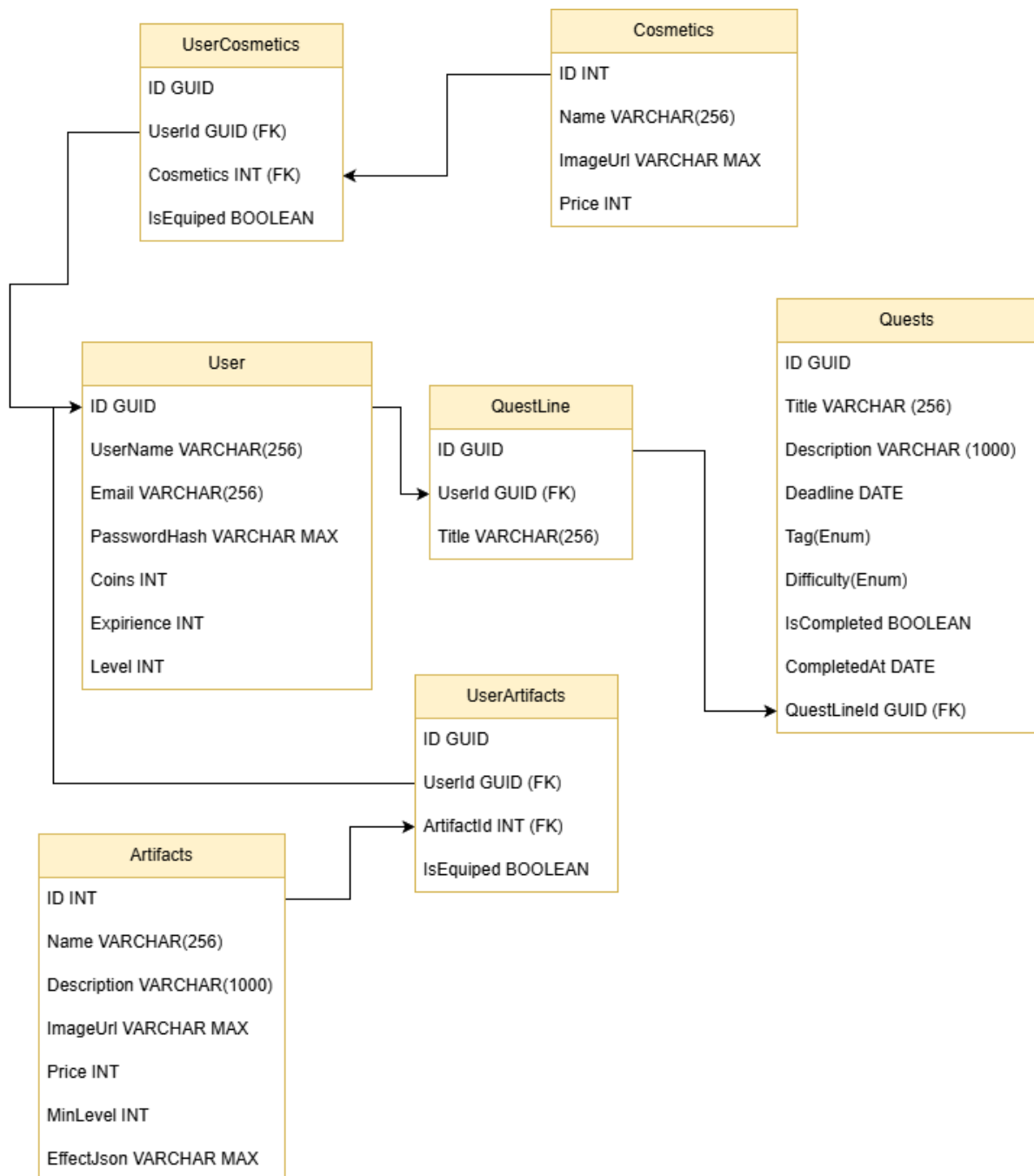


Рисунок 1 – Концептуальна схема бази даних веб-додатку

Протокол взаємодії. Зв'язок між Angular-клієнтом та ASP.NET-сервером відбувається через асинхронні HTTPS-запити.

Кожна створена задача при виконанні приносить певну кількість віртуальної ігрової валюти (Coins) та одиниць досвіду (XP). Кількість заробленої валюти залежить від рівня складності(Легка, Середня, Складна) поставленої задачі та досягнення певного рівня досвіду. За зароблену валюту можна придбати віртуальні аватари або модифікатори, які збільшують об'єм отриманих винагород.

Функціональна модель системи надає користувачу повний контроль над життєвим циклом завдань. Користувач має доступ до персонального списку задач з можливістю їх створення, редагування, виконання та видалення. Реалізовано право користувача за зароблену валюту придбати покращення для власного облікового запису: новий аватар чи артефакт для збільшення ефективності заробітку віртуальних ресурсів. Всі права доступу валідуються серверною частиною через протокол HTTPS.

Користувач має виключне право на доступ до власного профілю після проходження процедури аутентифікації. Всі операції захищені на рівні бекенду, що унеможливорює доступ сторонніх осіб до персональних списків задач або маніпуляції з ігровим балансом інших учасників.

Через інтерфейс користувач має можливість переглядати наступну статистику на сторінці користувача: рівень досвіду, кількість заробленого досвіду, куплені та екіпіровані модифікатори прогресу, аватар, який використовується в поточний період.

Для реалізації клієнтської частини обрано фреймворк Angular у поєднанні з мовою TypeScript. Використання Angular дозволяє створювати масштабовані веб-застосунки з чіткою структурою коду, що значно спрощує підтримку складних ігрових механік та анімацій [2]. Для обробки бізнес-логіки застосунку обрано ASP.NET Core, що дозволяє реалізувати надійну архітектуру REST API для взаємодії з клієнтською частиною на Angular. Використання даної платформи сприяє створенню безпечних та масштабованих інформаційних систем [3].

У розробленому веб-застосунку серверна частина відповідає за валідацію виконаних завдань, обрахунок ігрової валюти та збереження прогресу користувача, що гарантує цілісність даних та захист від некоректних маніпуляцій з ігровими показниками.

Для збереження структурованих даних про користувачів, їхні списки задач та поточні характеристики віртуального супутника застосовано реляційну систему керування базами даних SQL Server.

Алгоритм взаємодії системи працює наступним чином:

1. Користувач створює задачу, параметри якої (назва, опис, складність, термін, сфера життя) зберігаються в SQL Server та обраховується винагорода за виконання.
2. При відмітці про виконання, Angular-клієнт надсилає запит на сервер, де логіка на C# нараховує зароблені ресурси.
3. Своєчасне виконання задач призводить до накопичення валюти та досвіду, тоді як порушення кінцевих термінів виконання зменшує винагороду через систему штрафу.

Реалізація програмного продукту поділена на окремі етапи реалізації:

1. Визначення вимог, функціоналу, проектування реляційної бази даних у 3NF та структури проєкта;
2. Розробка серверної логіки на ASP.NET Core для обрахунку ігрових показників, створення моделей даних, API-контролерів та системи автентифікації користувачів;
3. Побудова інтерактивного SPA-інтерфейсу на Angular;
4. Тестування та налагодження роботи додатку.

Висновки. Розробка додатку-планувальника з елементами ігрофікації та віртуальним аватаром дозволяє змінити підхід сприйняття процесу планування з обов'язку в інтерактивно-ігровий досвід. Подальша розробка програмного продукту може бути спрямована на впровадження соціальних механік взаємодії між користувачами та адаптивних алгоритмів для автоматичного коригування складності завдань залежно від успішності гравця.

Перелік посилань:

1. Матвійчук О. О. Гейміфікація як невід'ємний чинник підвищення ефективності елементів дистанційного навчання. URL: <https://eprints.zu.edu.ua/17143/1/357.pdf> (дата звернення: 26.02.2026).
2. Angular. Робота з сервісами. Блог Hillel. URL: <https://blog.ithillel.ua/videos/angular-kak-rabotat-s-servisami> (дата звернення: 26.02.2026).
3. Аналіз сучасного фреймворка ASP.NET CORE для WEB-додатків. URL: <https://openarchive.nure.ua/entities/publication/f046f6e2-3e03-41cd-a6d1-5974781f8abf> (дата звернення: 26.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Булак В. В.

¹ Асист. Кардашов О. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=gtnZz4EAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ІНТЕРАКТИВНОГО КООПЕРАТИВНОГО 2D EXTRACTION-ШУТЕРА

Постановка проблеми та її актуальність. Жанр шутерів з евакуацією (extraction shooters) на сьогодні є одним з найрозповсюдженіших динамічних складових ігрової індустрії. Особливістю даного жанру є постановка гравця в умови необхідності збору ресурсів із високою цінністю відносно внутрішньоігрової економіки, та завданням евакуації з ігрового рівня в умовах конкуренції за відповідні ресурси із іншими гравцями. Проте значна частина ігор розроблена для пристроїв з високою апаратною потужністю та містить ресурсоємну 3D графіку, що суттєво звужує коло потенційних користувачів серед казуальних гравців, що в більшості володіють мобільними пристроями з низькою апаратною потужністю. Актуальність проекту полягає у створенні 2D гри, яка містить головні аспекти жанру extraction-шутера, а саме, менеджмент ресурсів, PvP-середовище із кооперативною складовою та концепцію основного геймплею «фізик-втрата», згідно із якою ризик втрати цінних ресурсів компенсується користю їхнього подальшого використання гравцем для внутрішньоігрової прогресії. Основною задачею є програмування надійної архітектури ігрових об'єктів та синхронізація дій гравців у кооперативному режимі для платформи Windows для персональних комп'ютерів, із можливістю подальшого перенесення проекту для мобільних пристроїв на платформи Android та iOS [1].

Аналіз останніх досліджень. Сучасні дослідження у сфері розробки ігрових застосунків демонструють зменшення уваги з візуальної складності на глибину ігрових процесів та системність взаємодії елементів і об'єктів. Зокрема, значне різноманіття інді-ігор у стилі 2D-шутерів доводить дієвість застосування спрощеної графіки для створення складних тактичних моделей. У більшості випадків ігри такого жанру розроблюється на рушіях Unity або Unreal Engine для проектів із високим ступенем динамічності та значною кількістю однотипних елементів. Проте для навчання та швидкого створення макета 2D ігор ефективним є використання у роботі мови програмування Python та спеціальної бібліотеки Pygame, завдяки архітектурі та низькому рівні абстракції при взаємодії із системними засобами. Також слід відзначити наявність алгоритму AABB (Axis-Aligned Bounding Box) [2, 3] інтегрованого в бібліотеку Pygame через об'єкти Rect, який забезпечує легку і швидку обробку колізій, що є однією з основних вимог для extraction шутера.

Спираючись на аналіз сучасних підходів для моделювання ігрових механік та сутностей, методи об'єктно-орієнтованого програмування (ООП) є оптимальним рішенням для розробки проекту. Використання ООП дає змогу створити високий рівень абстракції, де кожна ігрова механіка є незалежним об'єктом із прописаним для нього станом і поведінкою [4].

Формулювання мети. Метою роботи є не лише програмна реалізація ігрового клієнта, а й дослідження ефективності застосування об'єктно-орієнтованих підходів проектування для створення масштабного ігрового простору. Головними завданнями є створення програмного шаблону, із можливістю обробки взаємодії динамічних та статичних сутностей у реальному часі з високою та стабільною частотою оновлення кадрів. Визначається мета створення архітектури і реалізація 2D extraction-шутера, що підтримує кооперативну взаємодію; мета створення системи ігрових класів та механіки збирання ресурсів на ігровому рівні з можливістю евакуації.

Основна частина. В основі створеної системи знаходиться ієрархія класів - Player, Enemy, Box (перешкоди) та Loot. Для формування ігрового рівня застосовано спосіб матричного відображення рівня. Цей спосіб дає змогу перетворити текстову інформацію у графічні сутності з визначеною сіткою координат. Особлива увага приділена на алгоритм опрацювання переміщення та колізій. Процес переміщення ігрових персонажів базується на дискретному оновленні координат об'єкта у просторі відповідно до вектору швидкості V . У процесі створення була застосована модель рівномірного прямолінійного руху де розташування персонажа у кожному кадрі t обчислюється за формулою (1) [5]:

$$P_t = P_{t-1} + V \cdot \Delta t, \quad (1)$$

де P_t - поточна позиція;

V - швидкість;

Δt - час між кадрами.

Особливістю реалізації переміщення у цьому проєкті є запровадження системи зміни швидкості (Sprinting). Вона втілена завдяки коефіцієнту прискорення k , що вмикається після отримання відповідної дії від пристрою введення. Це змінить величину вектору швидкості який визначається за формулою (2):

$$V_{res} = V_{base} \cdot k, \quad (2)$$

де V_{res} - результуюча швидкість;

V_{base} - початкова швидкість;

k - коефіцієнт прискорення.

Для усунення проблеми діагонального прискорення, коли при одночасному натисканні клавіш переміщення по осях Ox та Oy результуюча швидкість згідно з теоремою Піфагора стає вищою за основну, передбачено нормалізацію вектору руху, що гарантує сталу швидкість ігрового персонажа незалежно від вектору руху.

Метод AABB (Axis-Aligned Bounding Box) базується на порівнянні граничних координат об'єктів за принципом, що зіткнення вважається істинним коли діапазон значень (x_{min} , x_{max}) та (y_{min} , y_{max}) обох об'єктів перекриваються (рис. 1):

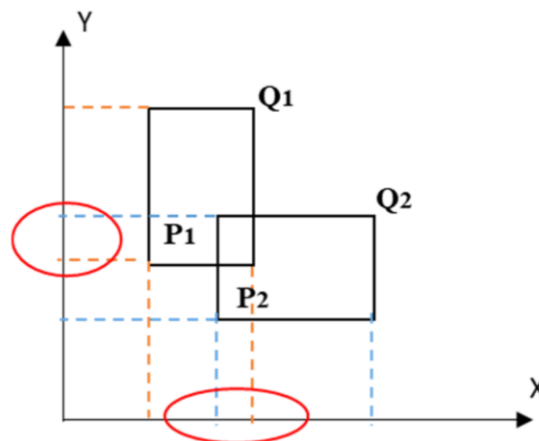


Рисунок 1 – Геометрична інтерпретація алгоритму AABB [2]

Розглядаючи алгоритм обробки колізій, звичайні методи часто спричиняють застрягання об'єкта в текстурах при русі по діагоналі. На відміну від простого обмеження руху, створено метод відкату координат, який розділяє вектор переміщення на компоненти, виконуючи перевірку зіткнень окремо для кожної координати. Це підтверджує можливість пересування персонажа вздовж перешкод, що покращує плавність ігрового процесу та є ключовим для динамічного шутера. Сам процес складатиметься з етапів збереження поточних

координат об'єкта, зміни координат відповідно до напрямку переміщення користувача, перевірки на колізії з об'єктами класу *Box*, а при виявленні контакту – повернення до збережених координат.

Система ведення стрільби у створеному *extraction*-шутері спирається на динамічне створення об'єктів класу *Bullet*. Кожен снаряд є незалежною програмною сутністю, що має власні характеристики - початкові координати та вектор напрямку.

Математичний опис траєкторії снаряду відображає зміну координат у реальному часі без врахування сили тяжіння, оскільки проєкт є двовимірним шутером з видом згори, або, *top-down* шутером. Положення кулі визначається за формулою (3):

$$\begin{aligned}x &= x_0 + V \cdot \cos(\alpha) \cdot t, \\y &= y_0 + V \cdot \sin(\alpha) \cdot t,\end{aligned}\tag{3}$$

де α – кут пострілу, спрямований у бік курсора миші.

Для підвищення ефективності використання оперативної пам'яті запроваджено метод життєвого циклу снарядів. Об'єкт видаляється із пам'яті за виконання однієї з умов виходу за межі ігрового поля, зіткнення зі статичною перешкодою, контакту з динамічним об'єктом.

Метод генерації ігрових ресурсів ґрунтується на підході інтерактивного виключення. Алгоритм створює випадкові координати після чого виконує перевірку на перетин з областями статичних перешкод. Лише за умови відсутності взаємодії об'єкт додається до переліку активних сутностей. Такий алгоритм допомагає запобігти логічним помилкам, пов'язаних із недоступністю ресурсів для додавання в інвентар гравця.

Для механіки евакуації втілено систему тригерів, згідно із якою, після проходження певного часу активується зона евакуації, контакт з якою завершує ігровий цикл з фіксацією прогресу.

Висновки. Результатом проєкту є функціональний зразок 2D *extraction* шутера з оптимізованою моделлю взаємодії об'єктів із застосуванням мови *Python*. Що дає стабільну продуктивність у складних сценаріях екстракшн-шутера. Застосування матричного методу побудови ігрового рівня дало змогу створити стійку систему без використання громіздких ігрових рушіїв, де складні ігрові механіки працюють із невеликими навантаженнями на процесор. Запропонований підхід до керування колізіями та станом об'єктів можна застосувати для створення кооперативних ігор із більш глибокими ігровими механіками.

Перелік посилань:

1. Epic Games. Networking Overview for Unreal Engine. – Epic Developer Community. URL : <https://dev.epicgames.com/documentation/en-us/unreal-engine/networking-overview-for-unreal-engine> (дата звернення: 23.02.2026)
2. Wang C. C., Wang M., Sun J., Mojtahedi M. A Safety Warning Algorithm Based on Axis Aligned Bounding Box Method to Prevent Onsite Accidents of Mobile Construction Machineries. *Sensors* (Basel). 2021. Vol. 21, No. 21. Art. 7075. <https://doi.org/10.3390/s21217075>
3. Pygame developers. *pygame.Rect* - *pygame v2.6.0 documentation*. Pygame. 2023. URL : <https://www.pygame.org/docs/ref/rect.html?highlight=rect> (дата звернення: 23.02.2026)
4. Wingqvist D., Wickström F., Memeti S. Evaluating the performance of object-oriented and data-oriented design with multi-threading in game development. 2022 IEEE Games, Entertainment, Media Conference (GEM), St. Michael, 27–30 Nov. 2022. 2022. P. 1–6. <https://doi.org/10.1109/GEM56474.2022.10017610>
5. Unity Technologies. *Time.deltaTime* (Unity Scripting API). URL : <https://docs.unity3d.com/6000.3/Documentation/ScriptReference/Time-deltaTime.html> (дата звернення: 22.02.2026)

¹ Бакалаврант 4 курсу Діброва Є. В.

¹ Доц., к.т.н. Кублій Л. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=rXA1eMIAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВЕБЗАСТОСУНОК ДЛЯ ВИВЧЕННЯ ІНОЗЕМНИХ МОВ

Постановка проблеми та її актуальність. На сучасному ринку праці знання іноземної мови є важливою і часто обов'язковою вимогою до кваліфікованого працівника в багатьох галузях, зокрема й у сфері інформаційних технологій. Насамперед ключовим компонентом мовної компетентності виступає великий і добре структурований словниковий запас, оскільки саме він визначає здатність фахівця працювати з технічною документацією, брати участь у міжнародних проєктах, впевнено опановувати нові технології та інформацію.

Наявні застосунки для вивчення мов не завжди враховують професійну спрямованість лексики або не пропонують достатньо гнучких механізмів повторення слів, які адаптувалися б до реального прогресу користувача. Часто такі ресурси орієнтовані на пасивне споживання матеріалу без активної взаємодії, що знижує ефективність засвоєння нової лексики та ускладнює її подальше практичне застосування.

Аналіз останніх досліджень. Питання ефективного вивчення іноземної лексики активно досліджується. Серед відомих способів особливо виділяють метод інтервального повторення. Дослідження підтверджують, що інтервальне навчання допомагає формувати довготривалу пам'ять [1] і зменшує забування вивченого матеріалу завдяки повторному перегляду інформації через щоразу довші проміжки часу.

Розповсюдженим способом виконання цього методу є розподілення карток з інформацією на секції і їхнє подальше переміщення між секціями залежно від того, чи було дано правильну відповідь під час повторення. Недоліком такого методу є поступове накопичення великої кількості матеріалу, через що підтримувати чітку організацію секцій самостійно стає дедалі складніше. Тому для довготривалого систематичного навчання зручно використовувати саме цифрові застосунки.

До поширених інструментів, які реалізують принцип інтервального повторення, належать застосунок Anki [2] і навчальний сервіс Quizlet [3]. Вебзастосунок Anki базується на алгоритмі SM-2, розробленому спеціально для оптимізації інтервалів повторення. Користувач самостійно оцінює, наскільки добре запам'ятав слово чи поняття, після чого система автоматично визначає наступний інтервал появи картки. Завдяки цьому, а також можливості створювати власні набори карток і додавати до них звуковий супровід, Anki забезпечує високу адаптивність і гнучкість. На відміну від нього Quizlet використовує інтервальне повторення більше як допоміжний інструмент і акцентує увагу радше на тестах, тренуваннях і різноманітних режимах перевірки знань. Цей сервіс є зручним і все ще залишається розповсюдженим серед тих, хто надає перевагу більш ігровому формату навчання.

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка вебзастосунку для вивчення іноземної мови шляхом ефективного розширення словникового запасу. Вебзастосунок повинен надавати користувачам можливість додавати власний матеріал, мати зручний інтерфейс для доступу до його функціональних можливостей.

Основна частина. Створений вебзастосунок орієнтований на вивчення іноземної лексики шляхом систематичного повторення доданих користувачем слів. Застосунок побудований за клієнт-серверною архітектурою і складається з клієнтської частини, серверної частини та бази даних. Клієнтська частина відповідає за відображення інтерфейсу

користувача, інструменти додавання нових слів, їхнє повторення і взаємодію з сервером. Серверна частина реалізує бізнес-логіку застосунку, обробляє запити користувачів, виконує обчислення інтервалів повторення, забезпечує доступ до бази даних. У базі даних зберігається інформація про користувачів, результати повторень, а також кожне додане слово разом із його визначенням, додатковою інформацією, набором спеціальних міток. Ці мітки відображають рівень засвоєння конкретного слова і визначають оптимальний момент для його повторення відповідно до інтервального принципу навчання.

У системі також передбачається роль адміністратора, який відповідає за керування користувачами, здійснює контроль структури бази даних і моніторинг стабільності роботи системи.

Користувач має можливість створювати власні колекції слів, додавати нові записи, редагувати наявні. Під час сеансів повторення система автоматично формує добірку слів відповідно до розрахованого інтервалу, фіксує результати відповідей. На основі отриманих даних застосунк оновлює рівень засвоєння слів та обчислює дату їхньої наступної появи. Механізм повторення реалізовано таким чином, що слова з нижчим рівнем засвоєння з'являються частіше, а добре засвоєні – рідше. Це дає можливість зосередити увагу на проблемній лексиці і зменшити появу вже вивченого матеріалу. Такий підхід реалізовує повністю адаптивне навчальне середовище, де кожне слово повторюється з тією частотою, яка гарантує його запам'ятовування, а поява нових слів залежить саме від рішень користувача.

Клієнтська частина вебзастосунку створена з використанням мови розмітки гіпертексту HTML, мови стилів CSS і мови для розробки інтерактивних динамічних вебсайтів JavaScript, що забезпечує інтуїтивний і сучасний інтерфейс користувача, швидку взаємодію з системою і динамічне оновлення даних без повного перезавантаження сторінки. Серверна частина створена з використанням мови програмування PHP, яка добре підходить для розробки веб-застосунків, оскільки забезпечує гнучкість реалізації бізнес-логіки та ефективну обробку HTTP-запитів.

Для зберігання даних застосовано систему керування базами даних MySQL, яка забезпечує підтримку складних запитів, високу швидкість роботи, цілісність даних. Використання бази даних дає можливість логічно структурувати доданий користувачами навчальний матеріал та організовувати набори слів. Це значно оптимізує витрати часу на роботу із системою, роблячи навчальний процес не тільки якісним, а й набагато ефективнішим.

Сукупність використаних технологій забезпечила можливість створити стабільний, продуктивний і доступний вебзастосунок. Оскільки доступ до системи здійснюється через веббраузер, то головною перевагою є відсутність необхідності встановлення спеціального програмного забезпечення – вебзастосунок можна безперешкодно використовувати з різних пристроїв та операційних систем.

Висновки. Розроблений вебзастосунок забезпечує структуроване зберігання лексичного матеріалу, адаптивне планування повторень, враховує індивідуальний прогрес користувача. Він створює умови для підвищення ефективності самостійного вивчення іноземної мови. Цей вебзастосунок також може бути використаний як основа для подальшого вдосконалення цифрових інструментів вивчення іноземних мов.

Перелік посилань:

1. Smolen P., Zhang Yi., Byrne J. H. The right time to learn: mechanisms and optimization of spaced learning. URL: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC5126970/> (дата звернення: 09.02.2026).
2. Anki : веб-сайт. URL: <https://apps.ankiweb.net/> (дата звернення: 09.02.2026).
3. Quizlet : веб-сайт. URL: <https://quizlet.com/> (дата звернення: 09.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Зелінська В. В.

¹ Доц., к.т.н. Кублій Л. І.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=rXA1eMIAAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ВЕБЗАСТОСУНОК ДЛЯ ПРОВЕДЕННЯ ОНЛАЙН-КОНФЕРЕНЦІЙ

Постановка проблеми та її актуальність. Дедалі більше людей працюють і навчаються віддалено. Дистанційний формат співпраці став новим стандартом, а очна взаємодія відходить на задній план. Це стало поштовхом до швидкого розвитку значної кількості технологій, зокрема засобів аудіо- та відеозв'язку в реальному часі. Наявні рішення не завжди задовольняють вимоги користувачів щодо гнучкості функціональних можливостей, інтеграції додаткових інструментів для взаємодії, зручності організації запланованих подій.

Аналіз останніх досліджень. Сучасні підходи до проведення онлайн-конференцій зосереджуються на забезпеченні якісного аудіо- та відеозв'язку в реальному часі за допомогою вебтехнологій. Одним із ключових стандартів є WebRTC (Real-Time Communication) – відкрита технологія, яка дає змогу браузерам здійснювати передавання відео й аудіо з мінімальною затримкою, гарантує безпечну й масштабовану комунікацію [1]. Завдяки цьому технологія WebRTC лежить в основі багатьох сучасних систем відеоконференцій. Також набули популярності хмарні сервіси на базі WebRTC. Прикладом є PaaS-продукти (Platform-as-a-Service), такі як платформа для автоматизації вбудовування в застосунки відео- та аудіозв'язку в реальному часі Agora [2] чи хмарна комунікаційна платформа Twilio [3], а також готові SaaS-продукти (Software-as-a-Service), наприклад, Zoom. Використання цих рішень спрощує впровадження відеозв'язку, проте забезпечення стабільності й масштабованості залишається предметом активних досліджень. Зокрема, в роботах аналізується вплив навантаження на якість досвіду користувачів [4] – розробляються підходи до стрес-тестування WebRTC-систем і визначаються метрики для запобігання погіршенню якості при великій кількості учасників [5].

Популярними для проведення онлайн-конференцій є такі платформи, як Zoom, Google Meet і Microsoft Teams. Вони забезпечують базові функції відео- та аудіозв'язку, проте через різноманітність їхньої цільової аудиторії вони спрощені, їхній дизайн і функціональні можливості не мають чіткої спеціалізації, через що не повністю покривають потреби онлайн-конференцій і навчальних заходів.

Формулювання мети. Метою дослідження є розробка веб-застосунку для проведення онлайн-конференцій із можливістю планування подій і взаємодії між учасниками.

Основна частина. Розроблений вебзастосунок має клієнт-серверну архітектуру з чітким розмежуванням функцій. Клієнтська частина відповідає за інтерфейс користувача і керування станом конференції. Вона забезпечує підключення учасників до конференцій, керування мікрофоном і камерою, а також доступ до інструментів взаємодії. Серверна частина реалізує бізнес-логіку застосунку, обробку запитів клієнта, створення й планування конференцій, взаємодію з сервісом аудіо- й відеозв'язку, забезпечуючи централізоване керування процесами і можливість масштабування системи.

Реалізовано механізм створення онлайн-конференцій із прив'язкою до конкретного часу проведення і можливістю надання доступу учасникам за унікальним посиланням або ідентифікатором конференції.

Функціональні можливості аудіо- та відеозв'язку в реальному часі реалізовано за допомогою інтеграції зі стороннім сервісом Agora [2] з використанням формату трансляції в реальному часі Interactive Streaming [6], що забезпечує стабільну передачу мультимедійних даних і підтримку багатокористувацьких сесій.

Вебзастосунок призначений для проведення онлайн-конференцій у режимі реального часу й забезпечує створення, планування й проведення відеозустрічей. Застосунок підтримує передачу аудіо та відео, керування мікрофоном і камерою, підняття руки, можливість додавання спільних нотаток, обмін повідомленнями.

Інтерфейс користувача спроектований із врахуванням вимог зручності та інтуїтивності. Структура елементів керування дає можливість швидко підключатися до конференцій, керувати налаштуваннями і взаємодіяти з іншими учасниками без необхідності додаткового навчання. До уваги взято недоліки платформ-конкурентів, такі як «ефект Zoom-виснаження» [7].

Клієнтську частину веб-застосунку реалізовано з використанням бібліотеки React [8], що загалом є популярним рішенням для фронтенд-частини застосунку. Серверну частину, яка відповідає за обробку запитів і підключення сторонніх сервісів, побудовано на платформі Node.js [9]. Для реалізації аудіо- та відеозв'язку інтегровано сервіс Agora [2], який забезпечує стабільну передачу мультимедійних даних і гладку масштабованість при низькій ціні.

Висновки. Створений вебзастосунок для проведення онлайн-конференцій забезпечує стабільний відео- та аудіозв'язок, підтримує планування подій і надає додаткові інструменти для взаємодії учасників, зручний у використанні. Розроблене рішення може бути основою для подальшого розвитку й розширення шляхом додавання нових функцій таких, як опитування в реальному часі, користувацькі фони. Перспективними напрямками також є реалізація інтерактивної дошки для спільної роботи учасників у реальному часі, інтеграція інструментів штучного інтелекту для автоматичного занотовування, підсумовування обговорень або асистування під час конференцій. Використання таких рішень може підвищити ефективність взаємодії учасників і розширити можливості застосунку без суттєвих змін базової архітектури.

Перелік посилань:

1. What is WebRTC: A Beginner's Guide. URL: <https://medium.com/@nakrani/what-is-webrtc-6e9cc2a51222> (дата звернення: 09.02.2026).
2. Agora Real-Time Voice and Video Engagement : веб-сайт. URL: <https://www.agora.io/en/> (дата звернення: 09.02.2026).
3. Twilio : веб-сайт. URL: <https://www.twilio.com/en-us> (дата звернення: 09.02.2026).
4. QoS vs QoE: Measuring and Optimizing RTC User Experience. URL: <https://trtc.io/blog/details/qos-vs-qoe> (дата звернення: 09.02.2026).
5. Improving End-User Experience through Analytics: Quality of Experience (QoE) and Quality of Service (QoS) for RTC. URL: <https://www.agora.io/en/blog/quality-of-service-and-quality-of-experience-for-rtc/> (дата звернення: 09.02.2026).
6. Nesler Tyler. What Is Interactive Streaming? URL: <https://www.streamingmedia.com/Articles/Editorial/Short-Cuts/What-Is-Interactive-Streaming-157505.aspx> (дата звернення: 09.02.2026).
7. Four causes of 'Zoom fatigue' and their causes. URL: <https://news.stanford.edu/stories/2021/02/four-causes-zoom-fatigue-solutions> (дата звернення: 09.02.2026).
8. React Documentation : веб-сайт. URL: <https://react.dev/> (дата звернення: 09.02.2026).
9. Node.js Documentation : веб-сайт. URL: <https://nodejs.org/en> (дата звернення: 09.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Карпенко Д. І.

¹ Доц., к.ф.-м.н. Донець А. Г.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=IDeYM00AAAAJ>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

КОРПОРАТИВНА ВЕБ-СИСТЕМА УПРАВЛІННЯ РОБОЧИМИ ЗМІНАМИ ТА ПЕРСОНАЛОМ

Постановка проблеми та її актуальність. У сучасних умовах управління персоналом вимагає автоматизації розподілення людського ресурсу. Використання застарілих методів призводить до помилок в організації робочого процесу, накладання змін та складнощів у підрахунку відпрацьованих годин. Веб-система управління персоналом має вирішувати ці проблеми шляхом створення єдиного цифрового простору для менеджерів та співробітників. Система має оптимізувати процес планування змін завдяки зручному інтерфейсу, мінімізувати помилки при складанні графіку та забезпечити прозорість нарахування робочих годин для співробітників.

Аналіз останніх досліджень. Інформаційне забезпечення менеджменту найчастіше реалізується за принципами «чистої архітектури» (Clean Architecture), що забезпечує гнучкість, тестованість та легкість підтримки коду [1].

Серверна частина створена з використанням платформи ASP.NET Core Web API. Розподілена на 3 рівні (Core, Infrastructure, WebApi). Використовується ORM Entity Framework Core в поєднанні з СУБД Microsoft SQL Server [2]. Автентифікація реалізовується засобами ASP.NET Core Identity та JWT (JSON Web Token). Для зручного тестування і подальшого розширення функціоналу додаються тести з бібліотекою xUnit.

SPA (Single Page Application) реалізовано з використанням бібліотеки React [3]. З метою спрощення реалізації використовуються UI компоненти Bootstrap, FullCalendar та react-chartjs-2 (діаграми та графіки). Взаємодія з бекендом через HTTP запити побудована на основі бібліотеки Axios.

Формулювання мети. Метою та навіть необхідною умовою існування сучасних бізнес-організацій є існування спеціалізованої корпоративної веб-системи, спрямованої на цифрову трансформацію процесів управління трудовими ресурсами підприємства. На сучасному етапі економічного розвитку вимоги до таких систем не обмежуються лише ліквідацією недоліків, якісною візуалізацією та захистом. Головною концептуальною метою є розробка програмної логіки для розподілу часових ресурсів у режимі «нон-стоп» та можливості постійного автоматичного оновлення.

Основна частина. Логіка роботи системи поділяється на кілька основних функціональних модулів, доступ до яких регулюється підсистемою ролівої авторизації.

Механізм автентифікації та розмежування прав доступу. Робота системи розпочинається з процедури ідентифікації користувача. На основі введених облікових даних сервер генерує JWT-токен, який містить зашифровану інформацію про ідентифікатор користувача та його роль. Цей токен використовується для підписання кожного наступного HTTP-запиту, що забезпечує захист кінцевих точок API та розмежування доступу до функціоналу на рівні серверної логіки.

Модуль планування робочого часу. Ключовим елементом системи є інтерактивний календар. Адміністратор ініціює створення робочих змін, вказуючи працівника та часовий інтервал. Система автоматично виконує валідацію даних на стороні сервера: перевіряється коректність дат та наявність перетинів з вже існуючими змінами даного працівника. У разі виявлення накладання змін, транзакція відхиляється, а користувач отримує відповідне сповіщення. У свою чергу працівник може переглядати лише свої робочі зміни. Дані про зміни відображаються у вигляді подій на календарній сітці з можливістю перегляду в розрізі тижня або місяця.

Аналітичний модуль та статистика. Система в реальному часі опрацьовує дані про відпрацьовані зміни та формує статистичні звіти:

- загальний облік – розрахунок сумарної кількості відпрацьованих годин за обраний період.
- рейтингування – формування списку «Топ працівників» на основі навантаження.
- розподіл навантаження – візуалізація кількості змін по днях тижня за допомогою діаграм, що дозволяє виявляти пікові навантаження та оптимізувати штатний розклад.

Управління персоналом. Адміністративний модуль дозволяє здійснювати повний цикл CRUD-операцій над обліковими записами співробітників, що дозволяє оперативно актуалізувати базу даних персоналу відповідно до кадрових змін на підприємстві.

Підсистема корпоративних сповіщень. Для забезпечення оперативної комунікації в системі реалізовано механізм глобальних оголошень. Адміністратор має можливість створювати текстові повідомлення, які зберігаються в базі даних та автоматично транслюються всім користувачам системи. Це забезпечує централізоване інформування персоналу про важливі події, зміни в графіку або організаційні розпорядження без необхідності використання сторонніх месенджерів.

Структура бази даних. Маємо наступні таблиці БД – робочих змін, користувачів та їх ролей і повідомлень. Основний акцент робиться на автоматизації планування робочих змін, забезпеченні прозорого та точного обліку робочого часу, а також на наданні інструментів для детального аналізу ефективності персоналу задля оптимізації управлінських рішень. Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити наступний комплекс завдань:

1. Дослідити існуючі підходи до управління графіками роботи, виявити недоліки ручного планування та визначити ключові вимоги до автоматизованої системи.
2. Розробити архітектуру програмного забезпечення на основі принципів «Clean Architecture» для забезпечення масштабованості, а також спроектувати реляційну базу даних для зберігання інформації про користувачів, зміни та корпоративні оголошення.
3. Розробити підсистему автентифікації та авторизації користувачів, що забезпечить чіткий розподіл прав доступу та функціональних можливостей між ролями.
4. Створити інтерактивний календарний інтерфейс для візуалізації робочого навантаження, що дозволить адміністраторам оперативно створювати, редагувати та переглядати зміни як у розрізі всього підприємства, так і для окремих співробітників.
5. Розробити та впровадити програмну логіку для автоматичного виявлення та запобігання конфліктам у розкладі (часові накладання змін, перевищення лімітів робочого часу).
6. Реалізувати модуль генерації статистики, який візуалізує дані про продуктивність працівників та розподіл навантаження по днях тижня у вигляді графіків та діаграм, а також забезпечує формування звітів.
7. Впровадити функціонал глобальних корпоративних оголошень, що дозволить адміністрації централізовано інформувати персонал про важливі події безпосередньо через інтерфейс веб-додатку.
8. Провести перевірку коректності роботи всіх модулів системи, зокрема валідації даних та безпеки доступу до API.

Висновки. Веб-додаток, призначений для автоматизації процесів складання розкладу робочих змін, обліку робочого часу та управління людськими ресурсами, вирішує актуальну проблему неефективності застарілих методів планування, пропонуючи сучасне цифрове рішення з єдиним інформаційним простором, що забезпечує прозорість нарахування відпрацьованих годин та значно скорочує час, який витрачається менеджерами на складання графіків. Використання розробленого веб-додатку дозволяє оптимізувати бізнес-процеси підприємства, підвищити дисципліну та ефективність управління персоналом.

Перелік посилань:

1. ESPOSITO, Dino. Clean Architecture with. NET. Microsoft Press, 2024. 336 p.
2. Документація Entity Framework Core. URL: <https://learn.microsoft.com/en-us/ef/core/> (дата звернення: 25.02.2026).
3. Banks A., Porcello E. Learning React. Sebastopol, CA : O'reilly. 2020. 295 p.

¹ Бакалаврант 4 курсу Коханевич Д. Г.

¹ Асист. Кардашов О. В.

<https://scholar.google.com.ua/citations?user=gtnZz4EAAAAJ&hl=uk>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

РОЗРОБКА ВЕБ-ОРІЄНТОВАНОЇ ERP-СИСТЕМИ УПРАВЛІННЯ МЕБЛЕВИМ ВИРОБНИЦТВОМ З ІНТЕГРАЦІЄЮ ДАНИХ САПР

Постановка проблеми та її актуальність. Цифрова трансформація деревообробної галузі України в області меблевого виробництва потребує впровадження сучасних інформаційних технологій, що об'єднують процеси інженерної розробки та бізнес-управління. У галузі меблевого виробництва, у компаніях що спеціалізуються на індивідуальних проектах замовників, критичною проблемою є швидкість передачі технічних даних від конструктора до виробництва. Використання сучасних САПР дозволяє створювати комплексні 3D-моделі, проте процес розрахунку собівартості, закупівлі матеріалів та видачі завдань для виробництва часто залишається неавтоматизованим або базується на паперовому документообігу [1].

Актуальність даної роботи полягає у створенні веб-орієнтованого середовища (ERP-системи), яке б виступало централізованим джерелом інформації та електронних ресурсів для всіх учасників процесу. Це дозволяє усунути помилки ручного введення даних, забезпечити прозорість виробництва в реальному часі та отримувати доступ до проектною документації через мобільні пристрої без необхідності встановлення спеціалізованого конструкторського ПЗ на індивідуальних робочих місцях співробітників підприємства.

Аналіз останніх досліджень. Дослідження в галузі інтеграції CAD та ERP систем, зокрема дослідження [2, 3] вказують на переваги хмарних архітектур для промислових рішень. Проте специфіка меблевого виробництва - складні ієрархічні структури виробів та динамічна зміна специфікацій, залишається недостатньо автоматизованою в контексті веб-додатків. Більшість існуючих рішень мають закриту архітектуру, що унеможлиблює їх гнучку адаптацію під різні САПР без значних фінансових витрат. Невирішеною проблемою є розробка універсального механізму парсингу, який би трансформовував неструктуровані дані формату XML або JSON для конструкторських проектів у реляційну модель бази даних.

Формулювання мети. Метою роботи є проектування та розробка веб-орієнтованої ERP-системи, яка базується на використанні крос-платформних технологій та забезпечує автоматизоване перетворення інженерних даних із CAD-систем у бізнес-процеси управління складом, цехом та монтажними роботами.

Основна частина. Архітектурна організація розробленого програмного комплексу базується на використанні фреймворку FastAPI (Python) для реалізації серверної логіки та СКБД PostgreSQL [4, 5] для зберігання нормалізованих даних. В основу системи покладено алгоритм «Generic CAD Connector», який виконує обробку вихідних файлів САПР через деревоподібну декомпозицію об'єктів (рис.1).

Механізм інтеграції реалізовано за допомогою асинхронного парсера, що обробляє XML-структури специфікацій. Кожна одиниця виробу розглядається як сукупність вузлів, де кожному елементу присвоюється унікальний UUID. Це дозволяє реалізувати наскрізне відстеження замовлення на всіх технологічних етапах.

Серверна частина реалізує логіку «Generic CAD Connector» на основі програмного модуля парсера, вхідними даними якого виступає файл експорту з САПР. Алгоритм автоматично ідентифікує ієрархію виробу – від загальної назви замовлення до кожної окремої деталі, її розмірів, матеріалу крайок та необхідної фурнітури. Після парсингу дані проходять процес валідації та нормалізації для збереження в реляційній базі даних.

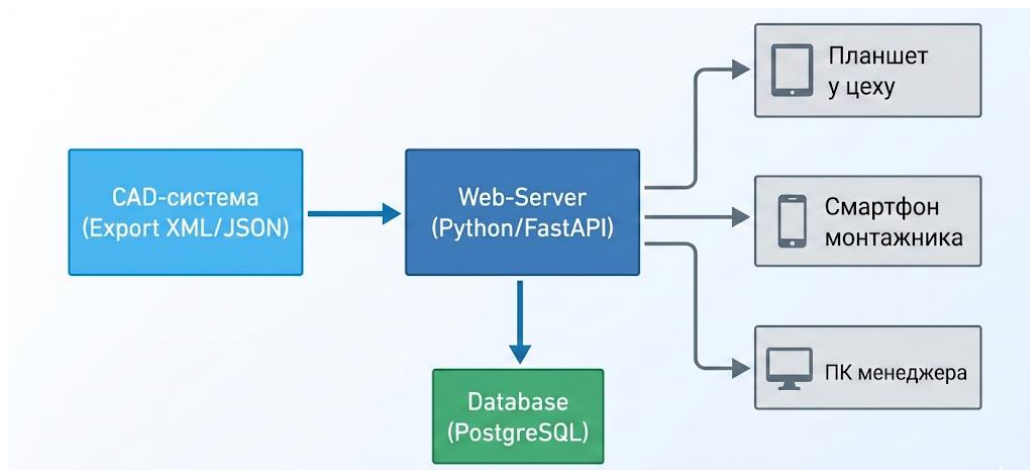


Рисунок 1 – Загальна архітектура інтегрованої ERP-системи

Функціональна реалізація «Цифрового цеху» базується на впровадженні State machine для кожної деталі. Оператори на дільницях розпили, крайкування та присадки взаємодіють із системою через адаптивні веб-інтерфейси, що виключає потребу у паперових картах замовлень. За алгоритмом складського контролю система виконує атомарні операції резервування матеріалів у момент завантаження проекту із САПР. Якщо розрахункова потреба перевищує поточні залишки, ERP-система автоматично ініціює створення транзакції на закупівлю, враховуючи технологічні допуски та коефіцієнти відходів матеріалу.

Для виїзних бригад монтажників реалізовано PWA-модуль (Progressive Web App), що забезпечує доступ до конструкторської документації у векторних форматах (SVG або PDF). Це дозволяє переглядати деталізовані схеми збирання безпосередньо з хмарного сховища. Інтегрований механізм фотофіксації через API мобільних пристроїв забезпечує миттєву передачу звітів про виконані роботи в центральну базу даних, що автоматично змінює фінансовий стан замовлення на «виконано».

Висновки. У результаті проведеного дослідження розроблено архітектурне рішення та програмний прототип веб-орієнтованої ERP-системи, яка ефективно інтегрує інженерні дані у виробничий цикл. Використання сучасного технічного стеку з використанням Python, PostgreSQL дозволило створити гнучкий інструмент, що мінімізує вплив людського фактору на етапах підготовки та реалізації замовлення. Практичне впровадження системи забезпечує скорочення часу на обробку конструкторської документації та підвищує точність складського обліку.

Перелік посилань:

1. ERP-система для меблевого виробництва: особливості функціональності. SoftInform. 2024. URL: <https://www.softinform.com.ua/news/erp-systema-dlia-meblevoho-vyrobnytstva-osoblyvosti-funktsionalnosti/> (дата звернення: 28.02.2026).
2. Плєскач В. Л., Загонацька Т. Г. Інформаційні системи і технології : навч. посіб. Київ : КНУ ім. Тараса Шевченка. 2011. 720 с. ISBN 978-966-346-622-4
3. Жаріков Е. В. Інформаційна технологія управління ІТ-інфраструктурою хмарного центру оброблення даних : дис. д-ра техн. наук : 05.13.06. КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ. 2020. 402 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/76421a26-dde8-4dbc-9d33-f7d57bc8a9cb> (дата звернення: 28.02.2026)
4. Sweigart A. Automate the Boring Stuff with Python: Practical Programming for Total Beginners. 2ed. San Francisco : No Starch Press. 2019. 592 p. ISBN 978-1-59327-599-0
5. Drake J., Worsley J. Practical PostgreSQL. Sebastopol, CA : O'Reilly Media. 2002. 320 p. ISBN 1-56592-846-6.

¹ Бакалаврант 4 курсу Малюк І. О.¹ Доц., к.т.н. Кублій Л. І.<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=rXA1eMIAAAAJ>¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МЕРЕЖЕВИЙ ЕКСПОРТЕР МЕТРИК ВУЗЛА У ФОРМАТІ OPENMETRICS І ЙОГО ІНТЕГРАЦІЯ В СИСТЕМУ МОНІТОРИНГУ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні інформаційні системи, вебсервіси й корпоративні застосунки функціонують у середовищах з високим рівнем динамічності – віртуалізована інфраструктура, контейнеризація, хмарні платформи, мікросервісні архітектури. У таких умовах стабільність сервісів значною мірою залежить від стану мережевої підсистеми вузлів: якості мережевих інтерфейсів, коректності роботи TCP/IP-стека, наявності втрат пакетів і помилок передавання, перевантаження каналів зв'язку, а також системних обмежень (наприклад, таблиць з'єднань). Нерідко деградація продуктивності або відмови сервісів викликані саме мережевими аномаліями, які проявляються у вигляді збільшення повторних передач TCP, росту втрат на інтерфейсах, стрибків затримок і нестабільності встановлення з'єднань. Особливо це критично для розподілених систем, де навіть мікродеградація мережі на одному вузлі може призвести до каскадних збоїв у роботі всього застосунку.

Оперативне виявлення і діагностика мережевих проблем потребують регулярного збору метрик з вузлів інфраструктури, їхнього уніфікованого подання і подальшої інтеграції в систему моніторингу з візуалізацією і сповіщеннями. Проте наявні універсальні агенти або експортери метрик часто надають тільки базовий набір показників або не забезпечують достатню деталізацію мережевих характеристик, необхідну для практичних сценаріїв DevOps/SRE (аналіз інцидентів, виявлення деградації, контроль якості мережевих з'єднань, оцінка пропускну здатності). Це обумовлює необхідність створення спеціалізованого мережевого експортера, орієнтованого на розширені мережеві метрики і сумісного зі стандартним форматом експорту. Стандарт OpenMetrics забезпечує узгоджений підхід до опису й передачі метрик, що спрощує інтеграцію з інструментами збору й аналізу часових рядів даних, а також сприяє відтворюваності й масштабованості моніторингу. Таким чином, актуальним є створення рішення, яке збирає розширені мережеві метрики вузла, експортує їх у форматі OpenMetrics та інтегрується з типовим контуром моніторингу (збір – зберігання – інформаційні панелі – сповіщення).

Аналіз останніх досліджень. Побудова систем моніторингу інфраструктури здебільшого ґрунтується на принципах спостережуваності, де метрики є одним із ключових сигналів поряд із лог-файлами і відстеженням маршрутів. У практиці експлуатації широко застосовують модель опитування або підхід витягування (pull-модель), за якої система моніторингу періодично запитує кінцеву точку (endpoint) метрик вузла. Стандарт OpenMetrics визначає формат подання метрик, їхні типи (лічильники, значення стану), правила іменування й метадані, що забезпечує сумісність між компонентами екосистеми моніторингу [1].

Для збору мережевої статистики в ОС Linux традиційно використовуються системні джерела, зокрема файли підсистеми procfs (наприклад, статистика інтерфейсів і мережевих протоколів), а також утиліти для перегляду станів програмних інтерфейсів обміну даними між процесами (сокети) і лічильників TCP/IP-стека [2]. На основі таких даних можуть будуватися метрики пропускну здатності, помилок і втрат на інтерфейсах, повторних передач TCP, показників встановлення чи закриття з'єднань тощо [3]. У практичних рішеннях важливо також контролювати кардинальність метрик (щоб уникнути надмірної

кількості комбінацій міток), тому розробники часто обмежуються агрегованими метриками на рівні інтерфейсу або вузла [2]. У сучасних інфраструктурних середовищах візуалізація й аналіз метрик часто реалізуються через інформаційні панелі (дашборди), які відображають ключові показники трафіку й помилок, а також через правила сповіщення, які дають можливість автоматично повідомляти інженерів про аномалії [4]. Відтак, актуальним є створення спеціалізованого експортера метрик, який доповнює стандартний набір показників необхідними мережевими індикаторами і легко інтегрується в типовий моніторинговий стек.

Формулювання мети. Метою роботи є створення системи збору та експорту розширених мережових метрик вузла у форматі OpenMetrics та інтеграція її в систему моніторингу. Система забезпечує: збір статистики мережових інтерфейсів і TCP/IP-стека на вузлі; формування метрик у форматі OpenMetrics і надання HTTP-кінцевої точки для опитування; інтеграцію з системою моніторингу й візуалізації; налаштування сповіщень про мережеві аномалії на основі правил; оцінку продуктивності й накладних витрат роботи експортера.

Основна частина. Для досягнення поставленої мети:

- визначено перелік інформативних мережових метрик для експлуатаційних сценаріїв (загальний трафік, пакети, апаратні помилки, втрати, повторні передавання TCP, помилки встановлення з'єднань, агреговані показники станів сокетів);
- спроектовано модель метрик (імена, типи, одиниці вимірювання, рекомендовані мітки) із врахуванням обмеження кардинальності;
- реалізовано модуль збору даних із системних джерел ОС Linux (зокрема, структурування файлів підсистеми procfs і використання інших системних інтерфейсів);
- реалізовано HTTP-сервер, що надає кінцеву точку /metrics, яка генерує дані в сумісному OpenMetrics-форматі;
- забезпечено гнучку конфігурацію (частота оновлення, список інтерфейсів, мережеві пороги для сповіщень, параметри роботи сервісу);
- реалізовано контейнеризацію і відтворюване розгортання в тестовому середовищі за допомогою платформи Docker;
- налаштовано контур інтеграції: збір метрик, інформаційні панелі, сповіщення;
- проведено експериментальну оцінку таких показників, як стабільність, вплив на процесор та оперативну пам'ять, час відповіді кінцевої точки, коректність при різних інтервалах опитування.

При створенні системи обрано сучасні галузеві інструменти. Як основний засіб реалізації програмної частини експортера використано мову програмування Go (Golang). Вибір цієї мови обґрунтований її високою продуктивністю, низьким споживанням системних ресурсів (що є критичним для агентів моніторингу на кінцевих вузлах), а також потужними вбудованими засобами для конкурентного виконання задач. Крім того, екосистема Go має офіційну й найбільш стабільну бібліотеку для роботи з метриками (Prometheus client library), що значно спрощує процес нормалізації даних у формат OpenMetrics і розгортання HTTP-сервера. Завдяки статичній компіляції, готовий експортер розповсюджується у вигляді єдиного бінарного файлу без зовнішніх залежностей, що ідеально підходить для мікросервісних і контейнеризованих середовищ [5]. Для збору часових рядів даних обрано систему Prometheus [6], оскільки вона нативно використовує підхід витягування (pull) для збору даних і повністю підтримує формат OpenMetrics. Для візуалізації та сповіщень застосовано платформу Grafana [4], яка тісно інтегрується із системою Prometheus. Для отримання системних метрик обрано підсистему procfs (файли /proc/net/dev і /proc/net/snmp), оскільки цей метод є найшвидшим і не створює надмірного навантаження на систему, на відміну від перехоплення пакетів на рівні ядра.

Запропонована система складається з мережевого експортера метрик, який виконується на вузлі як окремий сервіс і надає HTTP-кінцеву точку /metrics. Збір метрик організовано циклічно – із заданим інтервалом експортер зчитує системні лічильники,

виконує нормалізацію значень та оновлює відповідні метрики у своїй пам'яті. Далі зовнішня система моніторингу періодично опитує цю точку і зберігає часові ряди даних для подальшого аналізу. У системі передбачено кілька груп метрик:

- метрики інтерфейсів – для кожного мережевого інтерфейсу формуються лічильники прийнятих/переданих байтів і пакетів, а також лічильники помилок і втрат пакетів. На основі цих даних розраховується швидкість трафіку, відсоток помилок, виявляються проблемні інтерфейси;

- метрики TCP/IP-стека – формуються агреговані показники роботи TCP такі, як кількість переданих/отриманих сегментів, повторні передавання, невдалі спроби встановлення з'єднань, скидання. Ці метрики є особливо корисними для діагностики проблем, коли втрати пакетів або затримки неочевидні на рівні фізичного інтерфейсу, але проявляються на логічному рівні TCP;

- агреговані метрики станів з'єднань – для зменшення кардинальності система не збирає детальну статистику щодо кожного порту за кожною IP-адресою, а формує узагальнені показники (наприклад, загальна кількість з'єднань у стані ESTABLISHED або TIME_WAIT). Це забезпечує практичну цінність для експлуатації без надмірного навантаження на сховище.

Важливою частиною є інтеграція з контуром моніторингу. Налаштовується автоматичний збір метрик, створюються інформаційні панелі, які відображають ключові графіки швидкості трафіку, динаміку помилок і втрат по інтерфейсах, показники повторних передавань TCP і загальну кількість активних з'єднань. Додатково створюються жорсткі правила сповіщень для виявлення таких аномалій, як стає зростання втрат або помилок на інтерфейсі, зростання TCP-ретрансмісій, різке падіння чи зростання обсягів трафіку, недоступність кінцевої точки експортера. Для демонстрації працездатності передбачено сценарії імітації навантаження і погіршення мережевих умов у тестовому середовищі з подальшим аналізом графіків і спрацювання сповіщень. Виконується оцінка накладних витрат експортера (CPU/RAM) залежно від інтервалу оновлення й частоти опитування.

Висновки. Запропонована система забезпечує збір розширених мережевих метрик вузла і надає їх у форматі OpenMetrics, що спрощує інтеграцію з сучасними інструментами моніторингу. Реалізація експортера та налаштування візуалізації і сповіщень дають можливість оперативно виявляти мережеві аномалії, підвищувати прозорість стану мережевої підсистеми і значно скорочувати час діагностики інцидентів. Подальший розвиток роботи може включати розширення набору метрик (наприклад, показники підсистеми відстеження з'єднань conntrack), підтримку вибіркового збору для контейнеризованих середовищ, а також поглиблену інтеграцію з розподіленими сценаріями моніторингу в кластерній інфраструктурі.

Перелік посилань:

1. OpenMetrics. Specification : вебсайт. URL: <https://github.com/OpenObservability/OpenMetrics/blob/main/specification/OpenMetrics.md> (дата звернення: 12.02.2026).
2. Kerrisk M. The Linux Programming Interface: A Linux and UNIX System Programming Handbook. San Francisco: No Starch Press, 2010. 1552 p. URL: <https://broman.dev/download/The%20Linux%20Programming%20Interface.pdf> (дата звернення: 21.02.2026).
3. Transmission Control Protocol (TCP). RFC 9293. August 2022. URL: <https://datatracker.ietf.org/doc/html/rfc9293> (дата звернення: 13.02.2026).
4. Grafana Documentation : вебсайт. URL: <https://grafana.com/docs/grafana/latest/> (дата звернення: 13.02.2026).
5. The Go Programming Language : вебсайт. URL: <https://go.dev/> (дата звернення: 21.02.2026).
6. Prometheus Documentation: Metric types : вебсайт. URL: https://prometheus.io/docs/concepts/metric_types/ (дата звернення: 13.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Сахацька І. М.

¹ Доц., к.ф.-м.н. Тарнавський Ю. А.

<https://scholar.google.com/citations?user=g3-qVSgAAAAAJ&hl=en>

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

МОБІЛЬНИЙ ЗАСТОСУНОК ДЛЯ КООРДИНАЦІЇ ВОЛОНТЕРСЬКИХ ПРОЦЕСІВ

Постановка проблеми та її актуальність. Сучасні інформаційні технології відіграють важливу роль у розвитку волонтерських ініціатив, забезпечуючи ефективну комунікацію, координацію та доступ до ресурсів. Мобільні застосунки, зокрема на платформі Android, створюють широкі можливості для реалізації таких рішень. Використання мови Kotlin та сучасних архітектурних підходів дозволяє забезпечити якість, надійність і масштабованість програмного продукту. Метою дослідження є розробка мобільного застосунку для підтримки волонтерської діяльності з використанням сучасних технологій клієнтської та серверної частини, а також аналіз інструментів і принципів його побудови.

Аналіз останніх досліджень. Аналіз існуючих цифрових платформ для волонтерства, зокрема UNV Volunteering Service [1], веб-системи «СпівДія» [2] та мобільного застосунку «Волонтер» [3], засвідчив наявність функціональних та архітектурних обмежень. Частина рішень не забезпечує прямої та оперативної взаємодії між волонтерами й отримувачами допомоги, інші мають складну навігаційну структуру або неповну інтеграцію механізмів управління подіями. У більшості випадків відсутня чітка модульність системи, що ускладнює масштабування та подальший розвиток функціоналу. Це зумовлює потребу у створенні мобільного застосунку, орієнтованого на ефективну координацію процесів, із використанням сучасних архітектурних принципів та підходів до автоматизації.

Формулювання мети. Метою роботи є проектування та реалізація мобільного застосунку на основі принципів Clean Architecture, що забезпечують розділення відповідальностей, слабке зв'язування компонентів та незалежність бізнес-логіки від інфраструктурних деталей. Такий підхід дозволяє мінімізувати вплив змін у зовнішніх технологіях на внутрішню логіку системи та підвищує її стійкість до модифікацій. Завданнями дослідження є формалізація функціональних і нефункціональних вимог, побудова багаторівневої архітектури, реалізація клієнт-серверної взаємодії, впровадження механізмів керування доступом та забезпечення тестованості основних модулів.

Основна частина. Архітектура застосунку побудована на чотирирівневій структурі, у якій виокремлено три основні шари: presentation, domain та data [4].

Рівень presentation реалізує користувацький інтерфейс із застосуванням Jetpack Compose та відповідає за відображення стану системи й навігацію між екранами [5]. У межах цього рівня використовується підхід односпрямованого потоку даних, що спрощує керування станом інтерфейсу.

Domain-рівень містить сутності предметної області, інтерфейси репозиторіїв та сценарії використання (use cases), ізольовані від платформозалежних компонентів, що відповідає принципу інверсії залежностей і сприяє повторному використанню коду.

Data-рівень інкапсулює джерела даних, реалізує патерн Repository та забезпечує взаємодію з локальною базою Room і віддаленим сервером через REST API.

Серверна частина розроблена мовою Kotlin із використанням Ktor та реалізує маршрутизацію HTTP-запитів, автентифікацію, авторизацію і доступ до централізованої бази даних MySQL.

На рис. 1 представлено діаграму компонентів, що демонструє логічну структуру системи з використанням принципів Clean Architecture.

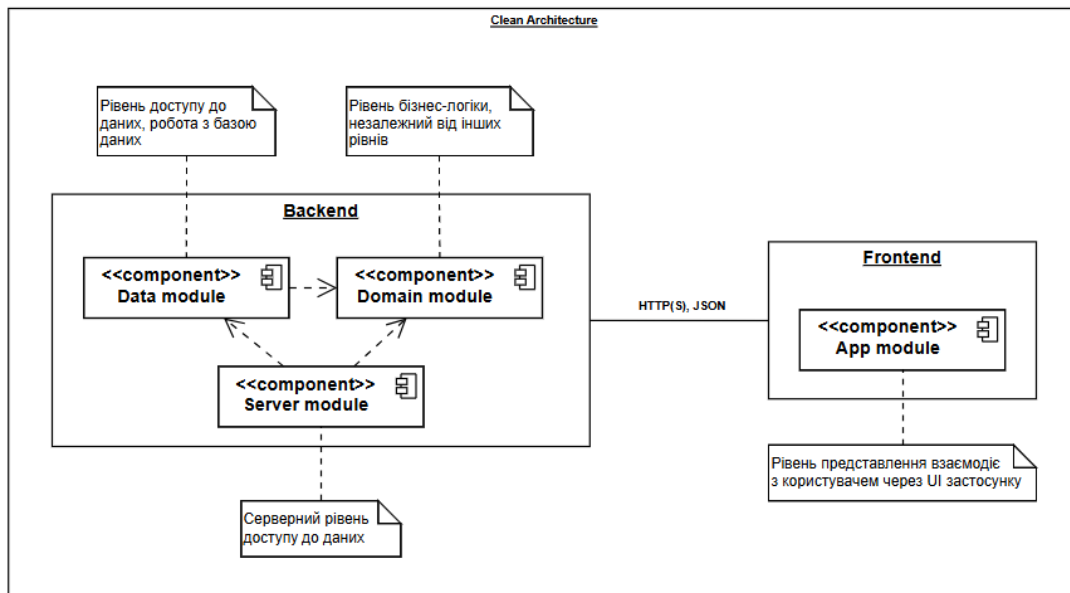


Рисунок 1 – Діаграма компонентів

Функціональна модель системи включає управління обліковими записами, створення, редагування та обробку запитів на допомогу, фільтрацію за категоріями та географічними параметрами, а також механізм розмежування ролей користувачів із контролем доступу до ресурсів. Асинхронна обробка реалізована за допомогою Kotlin Coroutines, що забезпечує неблокуюче виконання мережевих операцій та оптимальне використання системних ресурсів [6]. Навігація між екранами здійснюється з використанням Navigation Compose [7], що дозволяє централізовано керувати переходами та станом навігаційного графа. Для підвищення надійності передбачено обробку виняткових ситуацій, валідацію вхідних даних та логування серверних подій.

Архітектура мобільного застосунку у вигляді діаграми розгортання [8] показана на рис. 2.

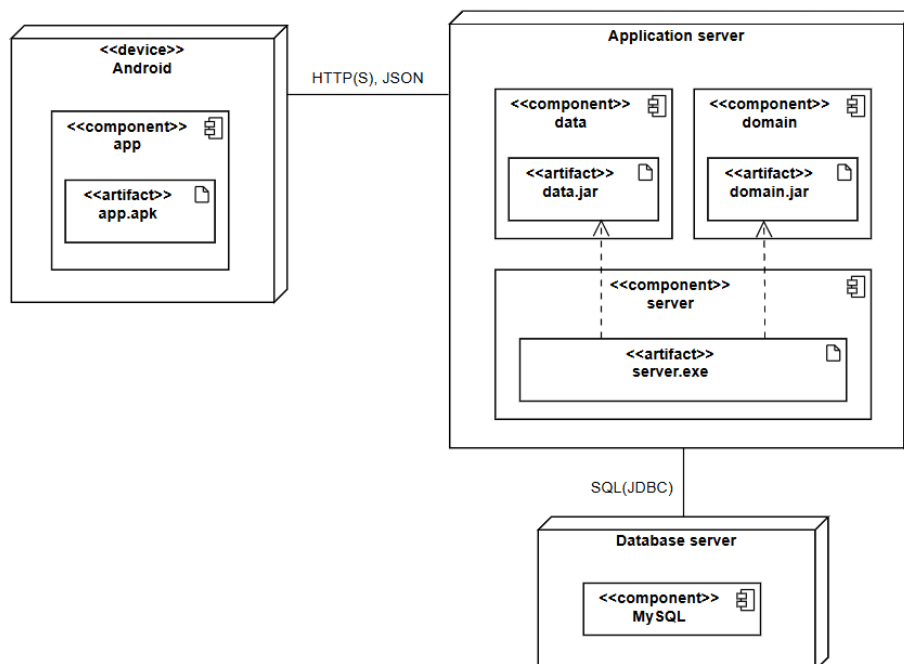


Рисунок 2 – Діаграма розгортання

Діаграма наочно демонструє фізичну архітектуру мобільного застосунку для волонтерської діяльності та розміщення його компонентів на вузлах системи. На Android-

пристрої працює мобільний застосунок у вигляді файлу `app.apk`, який містить користувацький інтерфейс, реалізований за допомогою фреймворку Jetpack Compose, та локальну базу даних Room (SQLite) для кешування й тимчасового зберігання інформації. Застосунок обмінюється даними з сервером через HTTP(S) у форматі JSON, що забезпечує платформонезалежність і стандартизований спосіб передачі структурованих даних.

Серверна частина, реалізована на Kotlin із використанням фреймворку Ktor, надає REST API, обробляє бізнес-логіку, автентифікацію та авторизацію користувачів. Виконуваним файлом серверної частини є `server.exe`, який використовує модулі `data` та `domain`, зібрані у відповідні JAR-файли, що забезпечує модульність і розмежування відповідальностей між шарами архітектури. Для централізованого зберігання даних використовується сервер MySQL, з яким сервер застосунку взаємодіє через SQL-запити, забезпечуючи цілісність, узгодженість та надійність збереження інформації. Такий підхід дозволяє масштабувати систему, відокремлювати клієнтську й серверну частини та підтримувати гнучке розширення функціональності в майбутньому.

Висновки. Дотримання принципів Clean Architecture при проєктуванні архітектури мобільного застосунку для волонтерської діяльності забезпечує чітке розділення відповідальностей між рівнями системи, зменшує зв'язаність компонентів і спрощує підтримку й розвиток проєкту в довгостроковій перспективі. Такий підхід підвищує тестованість окремих модулів і дозволяє вносити зміни до одного шару без суттєвого впливу на інші частини системи.

Використання Kotlin як основної мови програмування для клієнтської та серверної частини гарантує узгодженість технологій, безпеку типів та зручність розробки.

Розроблений мобільний застосунок демонструє ефективне поєднання сучасних технологій та архітектурних підходів, що дозволяє створити надійний, масштабований та зручний інструмент для організації волонтерської діяльності. Така реалізація відкриває перспективи для подальшого вдосконалення системи, інтеграції нових сервісів та розширення функціоналу відповідно до потреб користувачів.

Перелік посилань:

1. Engage Online Volunteers. URL: <https://www.unv.org/engage-online-volunteers> (date of access: 25.02.2026).
2. Екосистема проєктів СпівДії. URL: <https://spivdiia.org.ua/#projects> (date of access: 25.02.2026).
3. Solutions N. Волонтер – Додатки в Google Play. Android Apps on Google Play. URL: <https://play.google.com/store/apps/details?id=com.olegnovosad.volunteer&hl=uk> (date of access: 25.02.2026).
4. Yadati N. S. P. K. Architecture Design (MVVM + Clean Architecture). Journal of Artificial Intelligence, Machine Learning and Data Science. 2023. Vol. 1, no. 3. P. 703–706. URL: <https://doi.org/10.51219/jaimld/naga-satya-praveen-kumar-yadati/177> (date of access: 25.02.2026).
5. Aditya Undirwadkar. Understanding Jetpack Compose: Building Superior Android Apps. International Journal of Advanced Research in Science, Communication and Technology. 2025. P. 562–571. URL: <https://doi.org/10.48175/ijarsct-24471> (date of access: 25.02.2026).
6. Patel A., Kumar K., Kumar Pandey D. B. Kotlin Coroutines. Kotlin Mastery. Berkeley, CA. 2025. P. 177–191. URL: https://doi.org/10.1007/979-8-8688-1618-5_7 (date of access: 25.02.2026).
7. Panjuta D., Nwokike L. Menus and Navigation in Jetpack Compose. Tiny Android Projects Using Kotlin. Boca Raton. 2023. P. 318–341. URL: <https://doi.org/10.1201/9781032622538-12> (date of access: 25.02.2026).
8. Тихоход В., Гурін А., Беспала О. Технології розробки програмного забезпечення. Курс лекцій : навч. посіб. (електрон.). Київ : КПП ім. Ігоря Сікорського. 2024. 230 с. (date of access: 25.02.2026).

¹ Бакалаврант 4 курсу Хнюкало В. С.

¹ Доц., к.т.н. Полягушко Л. Г.

https://scholar.google.com/citations?user=_IcFLHwAAAAJ&hl=en

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

ЗАСТОСУВАННЯ МЕТОДІВ КОМП'ЮТЕРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ ДЛЯ ОЦІНЮВАННЯ БЕЗПЕКИ ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВІДПОВІДНО ДО СТАНДАРТУ OWASP ASVS

Постановка проблеми та її актуальність. У наш час, коли всі сфери нашого життя цифровізуються, що в свою чергу супроводжується збільшенням кількості та інтенсивності кібератак, звичні нам методи забезпечення безпеки, що здебільшого є якісними та суб'єктивними, стають недостатньо ефективними [1]. Сучасний підхід до захисту вимагає його впровадження на ранніх етапах життєвого циклу розробки [2]. І саме стандарт OWASP ASVS надає структуровані вимоги до безпеки веб-додатків і дозволяє формалізувати процес оцінки [3].

Особливо актуальним це є для інформаційних систем медичного призначення, адже такі системи обробляють чутливі персональні та медичні дані.

Однак їх впровадження не гарантує повної безпеки, якщо не будуть використовуватись методи системного аналізу та моделювання загроз. Внаслідок цього стає актуальним застосування кількісного комп'ютерного моделювання, яке дозволяє оцінити рівень відповідності системи вимогам згідно зі стандартом, виявити проблеми та допомогти обрати головні кроки в захисті, без втрати часу на другорядні речі [4].

Аналіз останніх досліджень. Аналіз останніх досліджень з оцінки безпеки інформаційних систем показує, що зараз вже сформовано низку трендів.

Перш за все, це перехід від якісної до кількісної оцінки. Старі методи оцінки безпеки сильно залежать від думки експерта і не дозволяють порівнювати системи. У свою чергу нові підходи дозволяють використовувати математичні та комп'ютерні методи, наприклад моделі загроз і алгоритми обчислення ризиків, щоб порахувати показники безпеки і знайти найслабші місця системи [4].

Також набрала популярності інтеграція стандартів у процес розробки, адже це дозволяє формалізувати вимоги і перетворювати їх на критерії для моделей загроз. Саме тому набрало популярності використання методології STRIDE, attack-trees та інші графічні моделі загроз, які допомагають виявляти потенційні вразливості ще на етапі проектування [3].

Слід також згадати сучасні інструменти, наприклад OWASP Threat Dragon, які автоматизують побудову моделей загроз, дозволяють співставляти їх із вимогами стандартів і візуалізовувати критичні точки системи [5]. Окремо варто відзначити роль машинного навчання та штучний інтелект, які допомагають швидше і точніше оцінювати ризики, а також зменшувати хибні спрацьовування систем автоматичного аналізу.

Таким чином, головними трендами останніх років є кількісна оцінка, інтеграція стандартів, проактивне моделювання загроз, автоматизація процесів, а також використання штучного інтелекту та машинного навчання.

Формулювання мети. Для оцінки інформаційних систем за допомогою комп'ютерного моделювання відповідно до стандарту OWASP ASVS можна використовувати побудову моделей загроз із подальшим порівнянням виявлених атак із вимогами стандарту. Саме такий підхід дозволяє виявляти дефекти в безпеці системи ще на початкових етапах.

Основна частина. Першим кроком для того, щоб оцінити безпеку, необхідно зрозуміти внутрішню структуру системи. Для того, щоб це зробити, застосовують діаграми потоків даних (DFD) [6]. Такі діаграми дозволяють наочно відобразити, як відбувається процес переміщення інформації між процесами, сховищами даних та зовнішніми сутностями. Вони допомагають визначити критичні точки, де дані перетинають межі довіри – точках, де дані переходять із неконтрольованого середовища у внутрішню мережу системи. Такі діаграми є дуже важливими, адже без продемонстрованої ними інформації, а саме без чіткого розуміння меж довіри, буде неможливо визначити можливі вектори атак, а тому і правильно підібрати правила захисту зі стандарту для захисту цих ділянок.

Наступним кроком йде визначення конкретних загроз для кожного елемента. Для цього використовується методологія STRIDE [3, 6], яка полягає в тому, щоб розбити атаки на 6 категорій, з яких і складається відповідний акронім: Spoofing (підміна особистості), Tampering (втручання в дані), Repudiation (відмова), Information Disclosure (розголошення інформації), Denial of Service (відмова в обслуговуванні), Elevation of Privilege (підвищення привілеїв).

Загрози, що будуть виявлені, слугуватимуть основою для побудови моделей атак, таких як дерево атак. Структуризуються атаки у вигляді ієрархічної системи, тобто зверху буде розташована головна ціль зловмисника, а вже на рівнях нижче розписані способи того, як може бути досягнута ця ціль. Кожна загроза, що буде виявлена розгалужується на кілька сценаріїв того, як атака може бути виконана, а саме послідовність дій і умов, за яких атака буде успішною.

Зручність побудови такої моделі полягає в тому, що вона дозволяє наочно побачити всі потенційні ризики, оцінити їх критичність і ймовірність реалізації, визначити слабкі місця системи, пріоритезувати заходи захисту, а також простежити взаємозв'язок між конкретними сценаріями атак і контрольними механізмами безпеки [5, 6].

Ключовим етапом методики є зіставлення виявлених сценаріїв атак з верифікаційними вимогами стандарту OWASP ASVS [3]. Так як стандарт складається з понад 280 вимог та правил безпеки, що охоплюють різні аспекти веб-додатків – від аутентифікації і управління сесіями до захисту даних і логування, впровадження всіх цих вимог може бути надлишковим для системи.

Саме тому замість цього користуються моделями загроз і зіставленнями: спочатку знаходимо реальні загрози, а потім їх нейтралізуємо шляхом впровадження реально потрібних пунктів стандарту [3, 5, 6]. Наприклад, загроза типу втручання в дані може бути нейтралізована шляхом впровадження валідації та санітизації даних, а загроза розголошення інформації – шляхом шифрування даних тоді, коли вони перебувають у стані спокою, та при їх передачі [3]. Такий підхід дозволяє розробникам зосередити ресурси на ліквідації реальних, а не гіпотетичних загроз [4, 6].

Слід також зазначити, що такий підхід робить процес прозорим і для розробників, і для замовників: можна чітко показати, які заходи контролю застосовуються для захисту конкретних компонентів системи, які сценарії атак вони закривають і чому певні вимоги стандарту були обрані, а інші – ні [3, 5]. Це дозволяє пріоритезувати заходи безпеки, не розсіюючи увагу на непотрібні контролі [1, 2].

Наступним важливим аспектом моделювання є визначення рівня верифікації безпеки, який у стандарті OWASP ASVS позначається як L1, L2 або L3. Кожен рівень має свою глибину захисту системи [3]:

- L1 – базовий рівень перевірки, використовується для будь-якої веб-системи та охоплює лише основні механізми безпеки, що критичні для захисту користувачів.

- L2 – середній рівень перевірки, містить в собі усі контролі L1, але також передбачає впровадження додаткових контрольних-верифікаційних заходів для бізнес-критичних компонентів.

■ L3 – високий рівень перевірки, застосовується для систем з високими вимогами до безпеки; включає усі контролю L1 і L2 плюс додаткові перевірки та суворі політики безпеки.

Після цього здійснюється кількісне оцінювання: на основі моделей загроз і обраних контролів ASVS розраховується «Індекс захищеності системи», який відображає співвідношення фактично впроваджених механізмів до кількості критичних вимог. Це дає змогу оцінити рівень безпеки, порівнювати модулі системи та визначати, які заходи впроваджувати насамперед [4].

Крім того, комп'ютерне моделювання також дозволяє постійно оцінювати безпеку системи. Для цього існують спеціальні інструменти, такі як OWASP Threat Dragon або Microsoft Threat Modeling Tool, які автоматично порівнюють загрози з вимогами стандартів та оновлюють модель при кожній зміні системи [5, 6]. Таким чином, моделювання контролює якість протягом усього життєвого циклу системи.

Висновки. Отже, застосування методів комп'ютерного моделювання відповідно до стандарту OWASP ASVS дозволяє замінити особисту думку експерта на точні розрахунки. Методологія STRIDE та дерева атак роблять процес наочним, допомагаючи знайти вразливості та правильно розподілити ресурси для захисту протягом усього життєвого циклу проєкту.

Без застосування описаних методів моделювання процес оцінки став би складним та хаотичним, адже за відсутності стратегії, розробникам довелося би мати справу з величезною кількістю вимог стандарту, без розуміння, що є важливим саме для їх системи. Це в свою чергу призвело б до того, що значні ресурси витрачалися на другорядні механізми захисту, у той час як критичні моменти залишалися поза увагою.

Перелік посилань:

1. Stallings W., Brown L. Computer security: principles and practice. 4th ed. Harlow, England : Pearson Education Limited, 2018. 800 p. URL: [https://ebooks.karbust.me/Technology/Stallings,%20William_%20Brown,%20Lawrie%20-%20Computer%20Security_%20Principles%20and%20Practice-Pearson%20Education%20Limited%20\(2018\).pdf](https://ebooks.karbust.me/Technology/Stallings,%20William_%20Brown,%20Lawrie%20-%20Computer%20Security_%20Principles%20and%20Practice-Pearson%20Education%20Limited%20(2018).pdf) (date of access: 28.02.2026).

2. Sommerville I. Software engineering. 10th ed. Harlow, England : Pearson Education Limited. 2016. 811 p. URL: https://www.studyhalo.com/media/resources/resources/INF3705/Textbook/Software_Engineering_-_Ian_Sommerville.pdf (date of access: 28.02.2026).

3. OWASP application security verification standard (ASVS) | OWASP foundation. OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security | OWASP Foundation. URL: <https://owasp.org/www-project-application-security-verification-standard/> (date of access: 28.02.2026).

4. Wen S.-F., Katt B. A quatitative security evaluation and analysis model for web applications based on OWASP application security verification standard. Computers & security. 2023. Vol. 135. 103532. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S016740482300442X> (date of access: 28.02.2026).

5. OWASP threat dragon | OWASP foundation. OWASP Foundation, the Open Source Foundation for Application Security | OWASP Foundation. URL: <https://owasp.org/www-project-threat-dragon/> (date of access: 28.02.2026).

6. Shostack A. Threat modeling: designing for security. Indianapolis : John Wiley & Sons. 2014. 624 p.

¹ Postgraduate 3d year Proskurin O. S.

² Sn.res.fellow, cand.eng.sc. Saveliev M. V.

<https://scholar.google.com.ua/citations?hl=en&user=ETFquT0AAAAJ>

¹ IPMMS NASU

² ISP NPP NASU

INFORMATION TECHNOLOGY OF SUPERVISORY CONTROL BASED ON A DIGITAL TWIN FOR SAFE EXTRACTION OF LFCM AT THE SHELTER OBJECT

Statement of the problem and its relevance. With the approaching 40th anniversary of the Chornobyl NPP accident, transforming the Shelter object into an ecologically safe system remains a priority. The most critical stage of this process is the extraction of localized fuel-containing materials (LFCM) [1]. Performing these tasks with human participation is impossible due to severe radiation and technological conditions, requiring the use of remotely controlled mobile robotic platforms.

Traditional approaches to operations at the Shelter object are limited to direct teleoperation, which is highly inefficient in unexplored environments, complex topology, and a high risk of communication loss. Most existing industrial robotic complexes are supplied with a closed control architecture (proprietary APIs). This precludes the implementation of modern autonomous navigation algorithms and the creation of flexible, scalable safety loops. Developing a modular, hardware-independent information technology capable of providing reliable localization and autonomous platform reaction to radiation threats remains an unsolved problem.

Analysis of the latest research. In modern robotics, the concept of digital twins is predominantly used for offline training, mission planning, or as BIM models for passive telemetry display during the decommissioning of nuclear facilities [2]. However, a digital copy without interactive real-time control does not solve autonomy issues. At the same time, using twins as the core of supervisory control for mobile platforms, where environmental physics is directly integrated into decision-making algorithms, remains underexplored.

Goal formulation. Development of a modular, safe, and scalable information technology for supervisory control based on a digital twin to automate operations, increase mission reliability, and ensure the safe extraction of LFCM.

Main part. The architecture of the proposed system relies on the hierarchical logical topology of the Edge-Fog-Cloud Continuum, implemented via the open ROS 2 framework and the DDS standard [3]. This distributed approach dynamically scales the system by offloading resource-intensive calculations to the server level, while retaining critical autonomy algorithms on the robot's onboard computers.

To transition from theoretical modeling to applied control, a physically accurate simulation within the Gazebo environment acts as the core of the digital twin. By integrating the BIM model of the Shelter object, the system generates a reference Pose Graph for preparatory mission analysis. To mitigate severe communication delays, the system utilizes a predictive control mechanism – Shadow Mode. This method employs a virtual leader to validate operator commands against the digital twin's physical constraints before executing them on the physical hardware testbench.

Autonomous operation in hazardous zones is achieved by embedding the ALARA radiation safety principle directly into the Nav2 navigation stack. Instead of passive monitoring, the system utilizes a non-linear penalty function to transform radiation gradients into a customized Costmap2D layer [4]. This approach enables the global planner to optimize routes by minimizing

the projected accumulated dose rather than merely treating radiation as rigid obstacles. The navigation task is formalized as the minimization of a total cost functional:

$$J(S) = \int_S \left(M(x(t), y(t)) + \frac{1}{2} |v(t)|^2 \right) dt, \quad (1)$$

where $M(x, y)$ represents the combined costmap of obstacles and radiation fields, and $v(t)$ is the velocity of the robotic platform.

Crucially, the maximum cost value within the radiation layer is strictly bounded; this prevents complete path invalidation (navigation blocking) when the robot is forced to traverse high-intensity fields. The decision-making logic is orchestrated via Behavior Trees (BT.CPP v4), enabling asynchronous reflex actions – such as dynamic speed adjustment or mission abortion. The system implements an ALARA Speed Reflex, where V_{limit} is increased to V_{max} upon exceeding a radiation threshold $D_{threshold}$ to minimize exposure time.

Navigating over the unstructured debris of the Shelter object severely degrades classical planar algorithms. To overcome this, a 2.5D sensory data reduction pipeline is implemented. By fusing 3D point cloud data with IMU kinematics, the system dynamically compensates for spatial chassis oscillations and extracts a gravity-aligned 2D slice. Feeding this stabilized data into the Lifelong SLAM continuous mapping algorithm guarantees robust long-term localization [5], effectively neutralizing odometry errors by implementing a kinematic model with an effective track width B_{eff} to compensate for longitudinal track slippage.

To ensure comprehensive situational awareness and facilitate mission planning, a specialized Human-Machine Interface (HMI) was implemented using the Foxglove Studio platform (fig. 1, 2). The system augments mandatory real-time video streams with lightweight instrumental telemetry and parsed 3D SDF (Simulation Description Format) environment models. This synergy of direct visual data with 2.5D navigation maps and semantic radiation layers significantly enhances operator perception in complex topologies. Consequently, this meso-level of control allows the operator to monitor the Behavior Tree execution states in real-time and dynamically adjust mission parameters without interfering with the low-level autonomy algorithms.

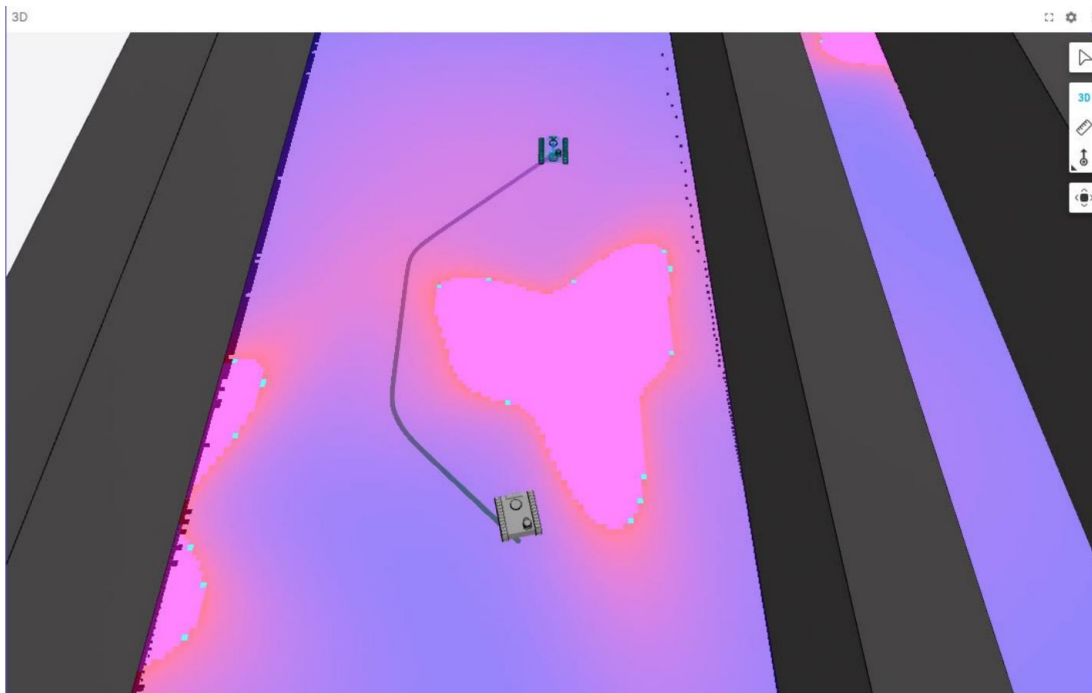


Figure 1 – Multilayer visualization of the digital twin with the Costmap2D radiation layer in Foxglove Studio

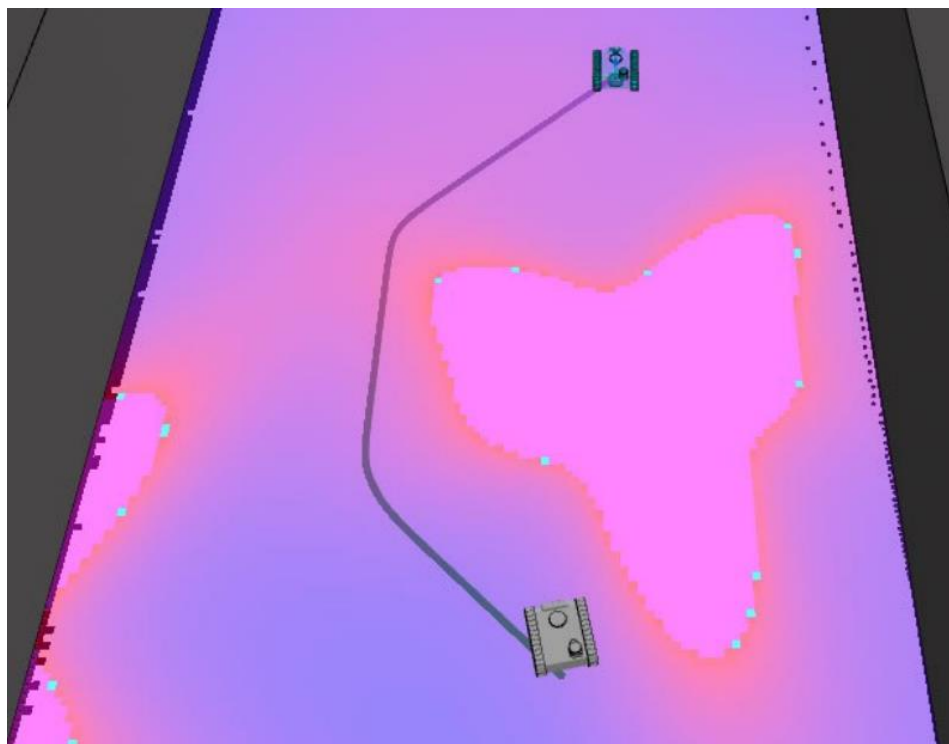


Figure 2 – Zoomed part of the multilayer visualization of the digital twin

Experimental validation of this distributed architecture confirms its resilience. The integration of behavior trees and semantic radiation mapping provides the system with the capability to autonomously adapt to threats, ensuring equipment survivability even during temporary communication loss. The synergy of Shadow Mode predictive control and 2.5D LiDAR stabilization effectively eliminates the critical problem of navigation map corruption on rough terrain.

Conclusions. The proposed information technology proves the expediency of transitioning from direct teleoperation to modular supervisory control based on open standards. Developing the distributed architecture and hardware testbench confirmed the effectiveness of integrating radiation safety directly into Nav2 autonomous navigation algorithms. Using predictive shadow control, 2.5D data reduction, and the Lifelong SLAM algorithm solves the problem of stable localization on the debris of the Shelter object, radically reducing the risk of losing robotic complexes during liquidation works. Current work focuses on the final hardware integration and refinement of control scripts for distributed Edge-Fog nodes to ensure system reliability during field-testing.

References:

1. Proskurin O. Use of the Laser Fragmentation Method in the Extraction of LFCM from the Shelter / O. Proskurin, M. Saveliev, N. Molitor, A. Wetzig, P. Herwig, J. Hauptmann // Nuclear and Radiation Safety. 2023. No. 4(100). P. 80–88.
2. Jacques M.-B. The use of digital twins for waste estimation in nuclear facilities' dismantling and decommissioning: the PLEIADES project / M.-B. Jacques, S. Gentes, J. Ridao, D. Daniska // Safety of Nuclear Waste Disposal. 2023. Vol. 2. P. 11–12.
3. Macenski S. Robot Operating System 2: Design, Architecture, and Uses In The Wild / S. Macenski, T. Foote, B. Gerkey, C. Lalancette, W. Woodall // Science Robotics. 2022. Vol. 7, No. 66.
4. West A. Real-Time Avoidance of Ionising Radiation Using Layered Costmaps for Mobile Robots / A. West, T. Wright, I. Tsitsimpelis, K. Groves, M. J. Joyce, B. Lennox // Frontiers in Robotics and AI. 2022. Vol. 9.
5. Sousa R. B. A systematic literature review on long-term localization and mapping for mobile robots / R. B. Sousa, H. M. Sobreira, A. P. Moreira // Journal of Field Robotics. 2023. Vol. 40, No. 5. P. 1245–1322.

¹ Бакалаврант 1 курсу Накоренко Д. А.; ² Бакалаврант 2 курсу Руденко Н. А.

¹ Проф., д.м.н. Деєва Ю. В.

<https://scholar.google.com/citations?user=8uIQBhEAAAAJ&hl=uk&oi=sra>

¹ Проф., д.е.н. Хлобистов Є. В.

¹ КМУ ім. О.О. Богомольця

² НУ «Києво-Могилянська академія»

СОЦІАЛЬНО-ЕКОНОМІЧНІ ВИКЛИКИ РЕІНТЕГРАЦІЇ ТИМЧАСОВО-ОКУПОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ (ПРИКЛАД ОРГАНІЗАЦІЇ УПРАВЛІННЯ ОХОРОНОЮ ЗДОРОВ'Я В АР КРИМ)

Постановка проблеми та її актуальність. Соціально-економічна політика реінтеграції тимчасово-окупованих територій України передбачає не стільки акцентування на конкретних заходах та планах, скільки формування цілісної стратегічної візії реалізації потенціалу державного управління та точкового урядування у найбільш проблемних чи складних сферах діяльності. Першими кроками після деокупації буде забезпечення базових потреб життєдіяльності населення та створення перехідних, а, згодом, і постійних інституцій. Серед таких інституційних викликів сфера охорони здоров'я займає провідну позицію та визначну роль, бо саме надання базових та стаціонарних медичних послуг може стати першою «візитівкою» ефективної реінтеграції. Для оцінки ефективності соціальної політики реінтеграції в сфері охорони здоров'я проведемо SWOT-аналіз її запровадження на прикладі АР Крим, який є певною мірою «ідеальним» полігоном для формування політики реінтеграції, з урахуванням відносно мирної анексії у 2014 році та відсутності на півострові активних бойових дій.

Аналіз останніх досліджень. Проблематика реінтеграції тимчасово окупованих територій України, та, зокрема, Криму, розглядалась контексті загальних викликів та методології державної політики [1], управління охороною здоров'я чи особливостей надання медичних послуг для військовослужбовців [2], але не в сфері державної політики охорони здоров'я для окремого регіону України. Тому тема пропонованого дослідження вважається авторами актуальною та своєчасною при формуванні планів, політик та програм реалізації повоєнної реінтеграції тимчасово окупованих територій України.

Основна частина. Зазначимо сильні сторони, які може реалізувати український уряд при реінтеграції тимчасово окупованих територій України. Розглянемо ці проблеми та виклики на прикладі Криму. До сильних сторін можна віднести: можливість швидкої імплементації розробленого програмного забезпечення в роботу медичних закладів півострова. Високий рівень цифровізації процесу надання медичної допомоги. Наявність потужної команди молодих лікарів різних спеціальностей, які володіють сучасними цифровими технологіями в медичній сфері. Надання допомоги за сучасними європейськими протоколами. Практична орієнтованість підготовки фахівців.

Слабкими сторонами є: психологічні і комунікаційні проблеми надання допомоги з населенням півострова (мовні, політичні розбіжності). Інша система надання допомоги (використання препаратів з доказовою базою, інші шляхи введення препаратів, інша система роботи невідкладної допомоги – це буде призводити до невдоволення населення (наприклад, «Швидка допомога» не поспішає на високу температуру, сильний головний біль тощо). Супротив лікарів, які залишались на місцях(це може стосуватись заповнення документації українською мовою, можливості працювати в медичних програмах, інші підходи до діагностики призначення лікування. Нерівномірність можливостей надання допомоги(різниця в оснащенні лікарень у великих містах і на периферії). Дефіцит кадрів, пов'язаний з не допуском до роботи або втечею російських лікарів. Відсутність реальної

інформації про епідемічну ситуацію щодо інфекційних хвороб особливо в ендемічних районах(в умовах дефіциту води). Відсутність реальної інформації щодо змін вікового складу населення та стану здоров'я, що необхідно для планування кількості фахівців певних спеціальностей (педіатри, неонатологи, акушери тощо).

Наявні можливості реалізації ефективної державної політики в цій сфері пов'язані з підготовкою медичних кадрів для роботи в умовах реінтеграції територій (лікарі сімейної медицини з посиленою підготовкою з невідкладних станів, інфекційних хвороб, епідеміології, педіатрії, психології). Підготовкою психологів для роботи з пацієнтами різних етнічних, соціальних груп. На час перехідного періоду законодавчо визначити умови та порядок надання медичної допомоги різним групам населення. Провести облік населення, яке залишається на реінтегрованих територіях з цього треба було б почати, або підготувати заздалегідь, але навіть ті хто «понаїхали з Росії» за день, і місяць не поїдуть, і тут буде питання, на яких засадах і як їм надавати допомогу, а хворіти вони не припинять.

Основні загрози. Російська медицина звична населенню. Дільничний лікар до квартири, «швидка» на температуру – скоріше всього звична і зрозуміла, зміна буде викликати обурення та тихий супротив. Українська система охорони здоров'я ще й в нас не дуже відпрацьована, і імплементувати її швидко не вийде не тільки з позиції цифровізації, роботи в медичних системах, але й з огляду на кількість лікарень, поліклінік, персоналу, його перенавчання, об'єднання певних установ – все це потребуватиме біля 5 років, і то за умови створення попереднього плану імплементації чинної української системи в медичні установи Криму. Немає інформації щодо рівня оснащення сучасним медичним обладнанням та проведення високотехнологічних хірургічних та консервативних методів лікування, але якщо вони і існують, то це лише в великих містах (Симферополь) і реалізуються, скоріше, не за рахунок місцевих фахівців. Тобто, одразу після деокупації, до оновлення бази і підготовки фахівців єдиним шляхом вирішення проблеми буде евакуація таких пацієнтів або вахтова робота висококласних спеціалістів. Серйозним викликом буде допомога онкологічним хворим, які потребують комплексної державної програми допомоги (і цих пацієнтів буде найбільше). Також виникнуть ускладнення щодо допомоги пацієнтам з діабетом, орфаними захворюваннями, з психічними розладами тощо. Всі ці групи потребують державної соціальної підтримки (суто фахової медичної і фінансового забезпечення відповідних ліків, апаратів тощо). Особливою організаційною проблемою будуть люди з інвалідністю, які потребуватимуть медичного супроводу і соціального забезпечення.

Висновки. Уряд та органи центральної виконавчої влади мають вже сьогодні піклуватися про створення державної програми надання медичної допомоги населенню деокупованих територій України, з урахуванням регіональної специфіки, сценаріїв деокупації, кадрового резерву, наявних технічних та логістичних засобів тощо. Розробка такою програми, а також переліку заходів до її практичній реалізації, мають бути створені як «дорожня карта» реінтеграції всіх тимчасово окупованих територій України.

Представлене дослідження здійснено за підтримки Canadian Institute of Ukrainian Studies (CIUS) в межах Ivan Makohon Endowment Fund, за що автори висловлюють щирі подяки.

Перелік посилань:

1. Політики реінтеграції тимчасово окупованих територій України: досягнення та виклики: аналітичний звіт /Анна Осипчук, Антон Суслов, Станіслав Шулімов, Вероніка Усачова, Максим Яковлев; за участі: Олега Сабури, Данила Метельського; Школа політичної аналітики НаУКМА. – Київ: [б. в.], 2021. – 50 с.

URI <https://ekmair.ukma.edu.ua/handle/123456789/24787>

2. Логвиненко Б. О. ПРАВО НА ОХОРОНУ ЗДОРОВ'Я У МЕХАНІЗМІ РЕІНТЕГРАЦІЇ ТИМЧАСОВО ОКУПОВАНИХ ТЕРИТОРІЙ УКРАЇНИ (2024). Дніпровський науковий часопис публічного управління, психології, права.115–118. <https://chasopys-ppp.dp.ua/index.php/chasopys/article/view/621>.

DOI: <https://doi.org/10.51547/ppp.dp.ua/2024.3.17>.

ЗМІСТ

ПЛЕНАРНІ ДОПОВІДІ	3
Нормативне забезпечення та експертні оцінки безпеки експлуатації комплексу нового безпечного конфайнменту та об'єкта «укриття» в умовах військових загроз	4
<i>ДИБАЧ О. М., директор ВП «Центр «ІНТЕНСА» ДНТЦ ЯРБ, к.т.н.</i>	
<i>ГОНТАР Ю. М., фахівчиня відділу безпечного зняття з експлуатації Державного науково-технічного центру з ядерної та радіаційної безпеки</i>	
<i>ВЕСЕЛОВ Є. В.</i>	
<i>Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки</i>	
СЕКЦІЯ № 1 АТОМНА ЕНЕРГЕТИКА	8
Ймовірнісна оцінка ризиків інтегрованої системи виробництва водню на базі АЕС	9
<i>ДОЛИНКЕВИЧ В. М., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В. І.</i>	
Перспективи ММР в умовах післявоєнної відбудови України	12
<i>МАРТИШИНА Є. Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Філатов В. І.</i>	
Підвищення автономності систем контролю АЕС з ВВЕР-1000 на базі термоелектричної рекуперації тепла	15
<i>ЩОКІН В. Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Хайрнасоев С. М.</i>	
Методика уніфікації комплексу даних автоматизованого радіаційного моніторингу для використання у системах підтримки прийняття рішень	17
<i>ЛЯХОР Д. О., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Коньшин В. І.</i>	
Аналіз впливу на безпеку енергоблоку №2 ХАЕС вихідних подій на майданчику водневої станції	19
<i>ТОПАЛ А. О., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.н.спів., д.т.н. Хайрнасоев С. М.</i>	
Комп'ютерне моделювання феноменологічних процесів, що супроводжують розвиток аварій на реакторній установці	21
<i>ЮРОВ М. С., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Овдієнко Ю. М.</i>	
Україноцентрична методика підвищення стійкості енергоблоку ВВЕР-1000 до збурень енергосистеми	24
<i>ПЕЧЕРИЦЯ І. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Клевцов С. В.</i>	
Огляд сучасного стану методології аналізу надійності персоналу при багатоблокових аваріях	26
<i>ШАХОВ Є. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Клевцов С. В.</i>	
Assessment of Criticality Potential in Large Vertical Flow of Fuel-Containing Materials at Chornobyl NPP	28
<i>SUSHCHENKO K. O., postgraduate</i>	
<i>Academic leader - prof., doc.eng.sc. Nosovskyi A. V.</i>	

Оптимізація ядерного паливного циклу України шляхом впровадження технологій замкненого циклу	32
<i>СПІРИН Г. Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Коньшин В. І.</i>	
 СЕКЦІЯ № 2 ЯДЕРНА ЗАХИЩЕНІСТЬ ТА НЕРОЗПОВСЮДЖЕННЯ	35
 Building Nuclear Futures Together: The NucTalks Initiative of the Black Sea Women in Nuclear Network	36
<i>GERGIEVA V. O., young scientist</i>	
Прогалини у правовому регулюванні фізичного захисту джерел іонізуючого випромінювання та радіоактивних відходів	38
<i>САМСОНЕНКО А. В., мол. вчений; ОСТАПЕНКО І. А., асист.</i>	
<i>Керівник - асист., к.ф.-м.н. Драней С. С.</i>	
Фізична ядерна безпека на етапі зняття з експлуатації атомних станцій	41
<i>КАТУНІН Є. В., пров. інженер</i>	
<i>Керівник - заст. директора з навчально-виховної роботи, к.пед.н. ПухтарМ. П.</i>	
<i>заст. директора з планування та координації розвитку, к.т.н. САЛІЙ Л.М.</i>	
Роботизоване обстеження зовнішньої обшивки НБК після удару російського БПЛА	45
<i>ШТЕФАН В. М., аспірант</i>	
<i>Керівник – зав. відділу, к.т.н. Гречанінов В. Ф.</i>	
 СЕКЦІЯ № 3 ТЕПЛОГІДРАВЛІЧНІ ПРОЦЕСИ В ТЕПЛО- І ПАРОГЕНЕРУЮЧИХ УСТАНОВКАХ	48
 Чисельне моделювання перехідних теплових режимів систем складної конструкції за дії нестационарних променевих теплових потоків	49
<i>ПОЛОВИНКІН К. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Сорокова Н. М.</i>	
Формування вентильованої каверни при турбулентному режимі обтікання дискового кавітатора	52
<i>КОВАЛЬ С. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - ст.н.спів., д.т.н. Хайрнасоев С. М.</i>	
Енергетичний підхід у визначенні економії природного газу при його заміщенні низькокалорійним газовим паливом	55
<i>НОВОСАД Ю. І., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Воробйов М. В.</i>	
Методологічні аспекти CFD-моделювання роботи топки котла на біомасі при змінній вологості палива	58
<i>ВОЛОШИН В. С., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є. В.</i>	
Відведення тепла від басейну витримки АЕС	60
<i>ПЕТРУК А. І., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є. В.</i>	
Підвищення довговічності трубопроводів другого контуру атомних електростанцій шляхом зменшення ерозійно-корозійних процесів	62
<i>ГАПОНЕЦ Є. Р., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новаківський Є. В.</i>	

Максимальні теплові потоки при кипінні на дискретно-неізотермічних поверхнях з крапковим джерелом енергії	65
<i>ЧИКАЛО В. Б., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В. Ю.</i>	
Вплив коефіцієнта заповнення на теплопередавальні характеристики двофазних термосифонів	68
<i>БАРИЧУК З. В., магістрант; ШЕПЕЛЬ Г. С., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Кравець В. Ю.</i>	
Концепція побудови моделі капілярного транспорту рідини та її випаровування з капілярної структури	72
<i>СЦЕЛЬНИК Д. Р., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Хайрнасов С. М.</i>	
СЕКЦІЯ № 4 СУЧАСНІ ТЕХНОЛОГІЇ В ТЕПЛОВІЙ ТА АЛЬТЕРНАТИВНІЙ ЕНЕРГЕТИЦІ	75
Проведення реконструкції котла Hagomatic 5/12 на спалювання біогазу	76
<i>БАЛАНДА О. Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.</i>	
Аналіз ефективності переведення парового котла Hagomatic 5/12 на спалювання біопалива	79
<i>БАЛАНДА О. Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.</i>	
Маловитратні підходи до відновлення працездатності парових турбін	82
<i>ОЛИМЕНКО І. О., магістр</i>	
<i>ОРЄХОВА М. О., магістр</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В. А.</i>	
Динамічна модель енергоефективності системи сонячного теплопостачання із сезонним ґрунтовим акумулюванням теплоти	85
<i>СЛИЖЕВСЬКИЙ К. Д., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Недбайло О. М., проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.</i>	
Визначення кінетичних параметрів термічної конверсії паливних сумішей пісного вугілля з рослинною біомасою	88
<i>ДЖЕЖУЛЕЙ В. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сірий О. А.</i>	
Розрахунок граничних умов теплообміну проточної частини циліндра середнього тиску турбіни К-200-130	91
<i>СЕПІК А. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В. А.</i>	
Розробка лабораторної установки для дослідження характеристик теплових насосів	94
<i>ТКАЧЕНКО М. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д. В.</i>	
Прогнозування складу продуктів піролізу у внутрішній камері модифікованого газифікатора	97
<i>ШАХБАЗОВ І. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сірий О. А.</i>	
Оцінка ефективності впровадження струменево-нішевої технології в енергетичні котли ГМ-50	100
<i>КНЬОВЕЦЬ Д. М., бакалавр</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Баранюк О. В.</i>	

Вибір і характеристика біогазової установки	102
<i>КОВАЛЬЧУК І. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Власенко О. В.</i>	
Теплогідравлічний аналіз та еколого-економічна оптимізація системи теплопостачання індивідуального житлового будинку	105
<i>КРИВОХИЖА М. А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Баранюк О. В.</i>	
Вдосконалення системи утилізації тепла пікової водогрійної котельні ТЕЦ за рахунок ORC-установки	107
<i>МИХАЙЛЕНКО К. Є., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В. А.</i>	
Порівняльний аналіз використання газу та мазуту для роботи пікових водогрійних котлів в аварійних режимах ТЕЦ	110
<i>МЯГКИЙ Р. А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.</i>	
Дослідження екологічних та енергетичних показників спалювання пелет у побутових котлах	113
<i>ПРИХОДЬКО Н. С., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Рачинський А. Ю.</i>	
Проектування охолоджувача для газогенератора малої потужності	115
<i>СТЕПАНЧЕНКО А. А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д. В.</i>	
The importance of using biogas technologies in Ukraine	117
<i>LUSCHNIG O., ; BÜRGER C.,</i>	
<i>Academic leader - sen. lect., cand.eng.sc. Vlasenko O. V.</i>	
Чисельне дослідження характеристик котла ГМ-50 в діапазоні навантажень 40-100% при переході з природного газу на біогаз	120
<i>БАРАНЮК О. В., доц., к.т.н.</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.</i>	
Дослідження нестационарної газодинаміки та ризиків високоциклової втоми регулювального клапана турбіни К-1000-60/3000	123
<i>БЕДНАРСЬКА І. С., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Риндюк Д. В.</i>	
Методи визначення пульсацій витрати вугільного пилу, що йде на пальники котла	126
<i>МЕРЕНГЕР П. П., ст.викл.</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Борисенко А. В.</i>	
Чисельне моделювання процесів спалювання паливних гранул (пелет) в енергетичних установках	129
<i>РАЧИНСЬКИЙ А. Ю., доц., к.т.н.</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Черноусенко О. Ю.</i>	
Втомне пошкодження деталей турбін через нерівномірність теплового поля при пуску	132
<i>КОНОВАЛЮК О. Л., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В. А.</i>	
Огляд сучасних конструкцій та матеріалів кінцевих ущільнень турбін для забезпечення економічності та довговічності	135
<i>ГОЛІВЕЦЬ О. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Пешко В. А.</i>	

СЕКЦІЯ № 5 ПРОБЛЕМИ ТЕОРЕТИЧНОЇ І ПРОМИСЛОВОЇ ТЕПЛОТЕХНІКИ

Зниження холодильного навантаження вентиляційної установки шляхом адаптивного регулювання рециркуляції повітря	138
<i>БЕЖИК О. М., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Припула Н. О.</i>	
Підвищення енергетичної ефективності проточної ТНСУ за рахунок байпасування теплового насоса	139
<i>ВОВК В. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Безродний М. К.</i>	
Експериментальне дослідження теплопередачі під час осушення повітря	142
<i>ЛЯШЕНКО А. М., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Припула Н. О.</i>	
Вплив характеристик рекуператора на ефективність роботи теплонасосних схем повітряного опалення і вентиляції	145
<i>МАТУСЕВИЧ Х. Б., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Безродний М. К., доц., к.т.н. Припула Н. О.</i>	
Порівняльний аналіз техніко-економічної ефективності повітряних та геотермальних теплових насосів в умовах реальної експлуатації	148
<i>МЕНЖИНСЬКИЙ О. Ю., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Соломаха А. С.</i>	
Підвищення енергоефективності котельної установки шляхом оптимізації повітряно-паливного співвідношення	151
<i>ПРАВОВЄРОВ А. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Романова К. О.</i>	
Гібридні системи опріснення води з мінімальним скиданням розсолу	154
<i>ТЕЛИЧКО І. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Середа В. В.</i>	
Дослідження системи уловлення діоксиду вуглецю із використанням біогазу	158
<i>ЗАБОЛОТНИЙ О. А., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Соломаха А. С.</i>	
Підвищення енергетичної ефективності промислово-опалювальної котельні при встановленні утилізаторів теплоти димових газів	161
<i>МІЛЕЙКО Б. Д., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Боженко М. Ф.</i>	
Контактний зволожувач повітря з використанням ерліфтного ефекту	164
<i>АЛТИН В. І., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Соломаха А. С.</i>	

СЕКЦІЯ № 6 ЕНЕРГЕТИЧНИЙ МЕНЕДЖМЕНТ ТА ІНЖИНІРІНГ

Методологічні підходи до аналізу життєвого циклу (LCA) систем теплопостачання та енергопостачання	170
<i>БАБІЧ Т. М., аспірант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Буяк Н. А.</i>	
Застосування інформаційних технологій для комплексного енергетичного моделювання будівель закладів освіти	171
<i>КОРЧМА В. О., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Шевченко О. М.</i>	

Програмні засоби енергетичного моделювання для аналізу енергосистем промислових підприємств: homer pro, trnsys, times та energyplan	177
<i>КУРАН Ю. Р., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Дешко В. І.</i>	
Комплексна оцінка потенціалу впровадження відновлювальних джерел енергії для досягнення стандарту NZEB на прикладі навчального закладу	180
<i>ЛЄНКОВ Д. Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Суходуб І. О.</i>	
Універсальні заходи з енергозбереження в будівлях: систематизація та оцінка ефективності	183
<i>ЛЄНКОВ Д. Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Шевченко О. М.</i>	
Підвищення рівня енергоефективності та теплового комфорту будівлі готелю «Сікорський»	186
<i>МОСКАЛЕНКО Ю. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., к.т.н. Буяк Н. А.</i>	
Smart energy system для України в умовах війни та нестабільної генерації електроенергії й тепла	189
<i>ТОЧИНСЬКИЙ Я. Р., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Білоус І. Ю.</i>	
Заощадження теплової енергії шляхом встановлення теплового насосу для гарячого водопостачання об'єкту	192
<i>ШУТЕНКО А. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Дубровська В. В.</i>	
Оптимізація конструктивних і режимних параметрів вентиляційних систем овочесховищ з використанням CFD-моделювання	194
<i>ІЛЬЧЕНКО Д. С., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Суходуб І. О.</i>	
Особливості CFD моделювання процесів теплообміну в теплових акумуляторах на основі PCM	196
<i>ЛАЗАРЄВ Є. С., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Суходуб І. О.</i>	
Теплотехнічний моніторинг режимів охолодження комерційних приміщень при термомодернізації: підхід та структура даних	199
<i>ЛЕВИЦЬКИЙ О. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Дешко В. І.</i>	
Використання цифрового двійника багатоквартирного житлового будинку для динамічного налаштування системи тепlopостачання	202
<i>ПОЛІТИКІН М. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - викл., к.т.н. Яценко О. І.</i>	
Енергоефективні режими роботи системи вентиляції житлової будівлі	205
<i>БІЛОУС І. Ю., мол. вчений; КРАМАРЕНКО С. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Суходуб І. О.</i>	
СЕКЦІЯ № 7 АВТОМАТИЗАЦІЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПРОЦЕСІВ	207
Проектне і ad-hoc імітаційне моделювання операційно ефективної системи автоматичного регулювання теплового режиму промислової топки	208
<i>БЕРДНИЧЕНКО Р. М., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Батюк С. Г.</i>	

Портативний лабораторний стенд для навчального процесу в сфері автоматизації та автоматизації	211
<i>БУГАЙ Д. І., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Волощук В. А.</i>	
Ідентифікація параметрів об'єкта керування в рамках технології цифрового двійника	213
<i>БУГАЙ Д. І., магістрант; НИКИФОРОВИЧ О. Є., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Волощук В. А.</i>	
Прогнози в системі керування сонячними електростанціями з установками зберігання електричної енергії	216
<i>ВЕРЕМЧУК О. Ю., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Волощук В. А.</i>	
Автоматизована система керування вентиляційною установкою з рециркуляцією	218
<i>ГАЖА М. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.</i>	
Інтелектуальний оператор-помічник(AI Operator Assistant)	220
<i>ІЩЕНКО І. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунке О. С.</i>	
Сучасні ефективні технології опалення	223
<i>КІСІЛЬ В. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новіков П. В.</i>	
Налаштування ПІД-регулятора системи охолодження процесора залежно від потужності	226
<i>МАВРОДІ В. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.</i>	
Рішення з енергоефективності для досягнення pzeb для історичних будівель	229
<i>МАРЮХІН М. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новіков П. В.</i>	
Алгоритми керування рухом крокуючих робототехнічних платформ та сучасні методи їх адаптації	231
<i>ОМЕЦИНСЬКИЙ С. О., бакалаврант; СІЧКОВСЬКИЙ М. А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Захарченко А. С.</i>	
Ідентифікація залежності продуктивності системи на кристалі від характеристик обчислювального навантаження	234
<i>ЗІНЧЕНКО Д. Д., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Маріяш Ю. І.</i>	
Застосування нейронних мереж з фізичним підкріпленням (PINNS) для ідентифікації фізичних параметрів об'єкта	237
<i>КУЧИНСЬКА К. А., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Новіков П. В.</i>	
Програмно-технічний комплекс колаборативного маніпулятора myCobot 280 із використанням технологій комп'ютерного зору на базі цифрового двійника	240
<i>ТУРАНСЬКИЙ С. К., бакалаврант; ШВАБ М. І., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Захарченко А. С.</i>	
Протокол координації мультиагентної системи керування індивідуальним тепловим пунктом	242
<i>ЗДОЛЬНИК М. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Степанець О. В.</i>	

Математичне моделювання та розробка навчального стенда-балансира для дослідження характеристик ПД-регулятора	245
<i>ОЛІЙНИК Д. А., бакалаврант; КЛИМЮК А. С., бакалаврант; ЧМИХАЛО Б. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Захарченко А. С.</i>	
Метод керування роботизованим маніпулятором для захоплення дефектних компонент друкованих плат на основі навчання з підкріпленням	248
<i>СЕЛЬОТКІН В. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., д.т.н. Волощук В. А.</i>	
Автоматизована система діагностики та підтримки мікроклімату стенда серійного тестування обчислювальної техніки	251
<i>БОЦІОН С. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	
Особливості побудови автоматизованої системи контролю якості водопостачання	253
<i>ВОРОШИЛОВ О. Д., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Грудзинський Ю. Є.</i>	
Автоматизована система керування комбінованою системою теплопостачання будинку на базі ІТП	255
<i>ДРИНЕВСЬКИЙ В. Р., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Любицький С. В.</i>	
Аспекти використання навчально-дослідного стенду системи автоматизації тваринницького підприємства	258
<i>КРАСАН Д. М., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Степанець О. В.</i>	
Автоматизація котлів-утилізаторів	260
<i>МАЛЕВИЦЬКА А. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	
Дослідження методів автоматизованого керування системами гарячого водопостачання та процесами накопичення теплової енергії у житловому секторі	262
<i>МЕЛЬНИК О. Г., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Захарченко А. С.</i>	
Автоматизована система керування тепловим режимом та водопідготовкою басейну	264
<i>МЕРЖИЄВСЬКИЙ А. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	
Автоматизована система керування камерною сушаркою деревини	266
<i>МУХА Н. С., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	
Інтелектуальна система управління технологічними процесами регенеративної скловарної печі	269
<i>СЕРГІЄНКО М. В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Батюк С. Г.</i>	
Автоматизована система керування тепловим пунктом лікарні	272
<i>СТЕЛЬМАХ М. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	
Автоматизована система керування мікрокліматом хірургічного відділення лікарні	275
<i>СТЕЛЬМАХ М. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	

Автоматизація процесу підтримання температурного режиму у виставковому залі з використанням рециркуляції повітря	278
<i>ТИМЧЕНКО А. Р., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Бунь В. П.</i>	

СЕКЦІЯ № 8 СТИЙКА ЕНЕРГЕТИКА	280

Застосування міжнародних промислових стандартів в розробці цифрових двійників	281

АРШАНСЬКИЙ Д. І., аспірант
Керівник - доц., к.т.н. Степанець О. В.

Автоматизація захисної споруди цивільного захисту у київській міській клінічній лікарні із застосуванням технологій PoT	284

БАЛИЦЬКА Т. О., магістрант
Керівник - доц., к.т.н. Степанець О. В.

Порівняльний аналіз бездротових технологій для систем дистанційного діагностування індивідуальних теплових пунктів	287

ГУДЗІЙ А. С., магістрант
Керівник - ст.викл. Штіфзон О. Й.

Інтелектуальне прогнозоване керування зарядом акумуляторної системи гібридної енергосистеми з урахуванням генерації сонячної електростанції та зонних тарифів	290

МАРТИНЮК О. І., магістрант
Керівник - ст.викл. Поліщук І. А.

Підвищення відмовостійкості систем управління в теплоенергетиці за допомогою резервування	292

СОЛОМКО Д. Г., бакалаврант
Керівник - ст.викл. Штіфзон О. Й.

Особливості автоматизації режимів експлуатації когенераційної установки в умовах змінного навантаження підприємства	294

ЧИЖЕНКО Б. О., бакалаврант
Керівник - асист. Захарченко А. С.

Застосування пакету EnergyPLAN для розроблення сценаріїв розвитку енергосистем територіальних громад	296

НИКИФОРОВИЧ О. Є., мол. вчений
Керівник - проф., д.т.н. Волощук В. А.

СЕКЦІЯ № 9 АСПЕКТИ РОЗВИТКУ ІНЖЕНЕРІЇ ПРОГРАМНОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ	299

Application programming interface of the file data management subsystem of the SmartEnergy software complex	300

AVANESOV T. K., MS's programme
Academic leader - assoc.prof., cand.eng.sc. Varava I. A.

TensorFlow, Neural Networks, XGBoost, SVM as machine learning algorithms in robotics	303

RUDNIKOVA N. S., postgraduate
Academic leader - prof., doc.eng.sc. Barabash O. V.

Information Technologies for Environmental Monitoring of Energy Facilities: Security and Resilience Challenges of Energy Systems	306

SEIKAUSKAITE A. A., MS's programme
Academic leader - sen. lect., cand.eng.sc. Bandurka O. I.

Актуальність та проблеми використання операційних систем реального часу для підтримки стабільності енергомереж Smart Grid	308
<i>АХМЕДОВ М. Ш., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Федорова Н. В.</i>	
Моделювання систем просторової радіопеленгації на базі БПЛА	312
<i>ВОЙТКО Ю. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл. Бандурка О. І.</i>	
Система збору та збереження даних для роботи безпілотних засобів	314
<i>ДОМНЕНКО З. О., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шпурик В. В.</i>	
Застосування генеративних рекурентних нейронних мереж і мікросервісної архітектури для адаптивного керування енергоспоживанням	316
<i>ДЯЧУК А. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Верлань А. А.</i>	
Методи та програмне забезпечення побудови, верифікації, валідації класичних і нечітких онтологій у семантичному моделюванні мультиагентних систем	319
<i>ЄРМОСІН О. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Коваль О. В.</i>	
Методи і програмне забезпечення синтезу та прогнозування сценаріїв у процесі семантичного моделювання варіантності розвитку подій із використанням ШІ	322
<i>ЄРМОСІНА О. О., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Коваль О. В.</i>	
Контейнерні технології як інструмент розширення функціональних можливостей корпоративних хмарних платформ	325
<i>КРАВЧУК І. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.</i>	
Цифровий двійник егр-системи як аналітичний контур забезпечення стійкості енергетичних підприємств	328
<i>ПЕРЕБИЙНІС М. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.</i>	
Еволюція розвитку систем інформаційного супроводу абітурієнтів: від детермінованих чат-ботів до інтелектуальних асистентів на базі RAG-архітектури	331
<i>ПОЛІЩУК В. В., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.ф.-м.н. Свинчук О. В.</i>	
Розробка та впровадження системи менеджменту подій кафедри	333
<i>РЯБЕЦЬ К. О., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист., д.ф.-м.н. Пироговська Т. В.</i>	
Розробка спеціального програмного математичного забезпечення автоматизованої детекції та класифікації сейсмічних подій у реальному часі	336
<i>СЄЧИН І. Я., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Гаврилко Є. В.</i>	
Інтеграція інтелектуальних методів обробки документації в інформаційні системи підприємств енергетичної галузі	340
<i>ФОМІЧЕВ Є. Ю., магістрант</i>	
<i>Керівник - асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.</i>	

Символіка Ландау в аналізі алгоритмів	343
<i>ЧЕРНОУСОВ Д. І., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шпурик В. В.</i>	
Методологія збору метрик охоплення медіа-контенту з нормалізацією до часу публікації	347
<i>ВОЙТКО А. С., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кузьмич В. О.</i>	
Методи штучного інтелекту в задачах топологічної оптимізації теплообміну	350
<i>ДАЩИК А. С., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Залевська О. В.</i>	
Символіка Ландау в аналізі алгоритмів	353
<i>КРОПИВА В. Ю., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - проф., к.ф.-м.н. Харкевич Ю. І.</i>	
Формальна математична постановка задачі мутаційного аналізу моделей машинного навчання	356
<i>ЛЕБЕДЄВ А. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Федорова Н. В.</i>	
Якісно-адаптивна фузія RGB та LIDAR для робастного розпізнавання міміки й керування 3d-аватаром у реальному часі	360
<i>ЛЯШКО І. І., аспірант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Залевська О. В.</i>	
Проблематика формування датасетів для задач ідентифікації авторства інтернет-текстів	364
<i>ПЕРЕДЕРА В. Р., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Недашківський О. Л.</i>	
Offline-first LMS: синхронізація та безпечне офлайн-тестування	367
<i>ФАЙДЮК Т. Р., магістрант</i>	
<i>Керівник - ст.викл., д.ф.-м.н. Бандурка О. І.</i>	
Fake information detection challenges in the world of AI	369
<i>HNATYSHYN M. S., postgraduate</i>	
<i>Academic leader - prof., doc.eng.sc. Nedashkivskiy O. L.</i>	
Графова пам'ять для підвищення ефективності LLM-агентів комп'ютерної автоматизації	372
<i>ВОРБУЛЬ Д. М., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Мусієнко А. П.</i>	
Введення нового структурного показника функціональної стійкості та його комбінаторна оцінка	375
<i>МАКАРЧУК А. В., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Барабаш О. В.</i>	
Методологія наукового супроводу газодинамічних параметрів нбк часе на основі фізико-математичного моделювання	377
<i>САВКО В. Я., аспірант; СТАРОВІТ І. С., д-р філос.; ГУРОВ Д. І., д-р філос.</i>	
<i>Керівник - проф. д.т.н. Гаврилко Є. В.; проф. д.т.н. Круковський П. Г.</i>	
Архітектурні особливості використання sap btp kyma та cloud foundry у корпоративних хмарних рішеннях	380
<i>ЛОЄВ Р. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист., к.т.н. Єрошкін Ю. М.</i>	
Використання науки про дані для вивчення питань управління проектами з розробки програмного забезпечення	383
<i>ОЛЕНЄВА К. М., мол. вчений</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Шпурик В. В.</i>	

СЕКЦІЯ № 10 ІНФОРМАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ	386
Automation of crypto asset trading based on analysis of funding rates for exchange-traded derivatives	387
<i>BARBAR V. V., MS's programme</i>	
<i>Academic leader - prof., doc.eng.sc. Shushura O. M.</i>	
Комп'ютерне моделювання процесів черги у вебзастосунках з високим навантаженням	390
<i>КОЗУРАК Т. С., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.ф.-м.н. Донець А. Г.</i>	
Метод агрегації мультимодальних даних для виявлення аномалій у комп'ютерних системах	393
<i>МИЩЕНКО А. А., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Шушура О. М.</i>	
Розробка веб-додатку моніторингу та візуалізації дозиметричних даних	396
<i>САПОЖНИКОВ О. Ю., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Сидоренко Ю. В.</i>	
Методи інтелектуального моніторингу та оптимізації роботи мережі 3D- принтерів	398
<i>ХАВКІН А. Д., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л. І.</i>	
Веб-застосунок з трирівневою архітектурою для комплектації теплообмінного обладнання	401
<i>ЧЕРКАС О. С., магістрант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кузьменко І. М.</i>	
Conflict resolution of production model rules based on group decision-making	403
<i>BARANICHENKO O. M., postgraduate</i>	
<i>Academic leader - assoc.prof., cand.eng.sc. Shapovalova S. I.</i>	
Hybrid approach for automatic summation of long scientific documents	406
<i>NOVYTSKYI K. V., MS's programme</i>	
<i>Academic leader - prof., doc.eng.sc. Shushura O. M.</i>	
Improving short-term load forecasting accuracy for the unified power system of Ukraine: an analysis of prospective directions	409
<i>TITOV V. M., postgraduate</i>	
<i>Academic leader - assoc.prof., cand.eng.sc. Shapovalova S. I.</i>	
Оптимізація суперпараметрів нейронних мереж у задачах прогнозування динаміки трендів та цін фондового ринку	411
<i>ЗАКОВОРОТНИЙ О. І., аспірант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Аушева Н. М.</i>	
Методи апроксимації репульсивних сил в силовому макетуванні графів	414
<i>ЛОГВИНЕНКО В. Є., магістрант</i>	
<i>Керівник - проф., д.т.н. Аушева Н. М.</i>	
Financial management system with forecasting capabilities	417
<i>HOLUB T. D., BS's programme</i>	
<i>Academic leader - assoc.prof., cand.econ.sc. Segeda I. V.</i>	
Reverse proxy load-balancing system	419
<i>MALYARCHUK B. V., BS's programme</i>	
<i>Academic leader - assoc.prof., cand.eng.sc. Demchyshyn A. A.</i>	

Application of the transformer architecture for atmospheric precipitation intensity forecasting	422
<i>NAHAIVSKA D. O., BS's programme</i>	
<i>Academic leader - assist. Holovakin M. A.</i>	
Integration of a Generative AI Model into a Semantic Vector-Based Music Recommendation System	424
<i>VANIN A. V., BS's programme</i>	
<i>Academic leader - assist. Holovakin M. A.</i>	
Розробка веб-застосунку для планування задач з елементами ігрофікації та віртуальним аватаром	426
<i>БІЛОУС О. В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.е.н. Сегеда І. В.</i>	
Розробка інтерактивного кооперативного 2D extraction-шутера	429
<i>БУЛАК В. В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Кардашов О. В.</i>	
Вебзастосунок для вивчення іноземних мов	432
<i>ДІБРОВА Є. В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л. І.</i>	
Вебзастосунок для проведення онлайн-конференцій	434
<i>ЗЕЛІНСЬКА В. В., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л. І.</i>	
Корпоративна веб-система управління робочими змінами та персоналом	436
<i>КАРПЕНКО Д. І., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.ф.-м.н. Донець А. Г.</i>	
Розробка веб-орієнтованої ERP-системи управління меблевим виробництвом з інтеграцією даних САПР	438
<i>КОХАНЕВИЧ Д. Г., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - асист. Кардашов О. В.</i>	
Мережевий експортер метрик вузла у форматі OpenMetrics і його інтеграція в систему моніторингу	440
<i>МАЛЮК І. О., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Кублій Л. І.</i>	
Мобільний застосунок для координації волонтерських процесів	443
<i>САХАЦЬКА І. М., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.ф.-м.н. Тарнавський Ю. А.</i>	
Застосування методів комп'ютерного моделювання для оцінювання безпеки інформаційних систем відповідно до стандарту OWASP ASVS	446
<i>ХНЮКАЛО В. С., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - доц., к.т.н. Полягушко Л. Г.</i>	
Information technology of supervisory control based on a digital twin for safe extraction of LFCM at the shelter object	449
<i>PROSKURIN O. S., postgraduate</i>	
<i>Academic leader - sn.res.fellow, cand.eng.sc. Saveliev M. V.</i>	
Соціально-економічні виклики реінтеграції тимчасово-окупованих територій України (приклад організації управління охороною здоров'я в АР Крим)	452
<i>НАКОРЕНКО Д. А., бакалаврант; РУДЕНКО Н. А., бакалаврант</i>	
<i>Керівник - проф., д.м.н. Деєва Ю. В., проф.; д.е.н. Хлобистов Є. В.</i>	

ПОКАЖЧИК АВТОРІВ ДОКЛАДІВ

- Avanesov T. K. 300
Bandurka O. I. 306
Barabash O. V. 303
Baranichenko O. M. 403
Barbar V. V. 387
Bürger C. 117
Demchyshyn A. A. 419
Gergiieva V. O. 36
Hnatyshyn M. S. 369
Holovakin M. A. 422, 424
Holub T. D. 417
Luschnig O. 117
Malyarchuk B. V. 419
Nahaivska D. O. 422
Nedashkivskiy O. L. 369
Nosovskyi A. V. 28
Novytskyi K. V. 406
Proskurin O. S. 449
Rudnikova N. S. 303
Saveliev M. V. 449
Segeda I. V. 417
Seikauskaite A. A. 306
Shapovalova S. I. 403, 409
Shushura O. M. 387, 406
Sushchenko K. O. 28
Titov V. M. 409
Vanin A. V. 424
Varava I. A. 300
Vlasenko O. V. 117
Алтин В. І. 167
Аршанський Д. І. 281
Аушева Н. М. 411, 414
Ахмедов М. ІІІ. 308
Бабіч Т. М. 171
Баланда О. Д. 76, 79
Балицька Т. О. 284
Бандурка О. І. 312, 367
Барабаш О. В. 375
Баранюк О. В. 100, 105, 120
Баричук З. В. 68
Батюк С. Г. 208, 269
Беднарська І. С. 123
Бежик О. М. 139
Безродний М. К. 142, 148
Бердниченко Р. М. 208
Білоус І. Ю. 189, 205
Білоус О. В. 426
Боженко М. Ф. 164
Борисенко А. В. 126
Боціон С. О. 251
Бугай Д. І. 211, 213
Булак В. В. 429
Бунке О. С. 220, 272
Бунь В. П. 251, 260, 264, 266, 275, 278
Буяк Н. А. 171, 186
Веремчук О. Ю. 216
Верлань А. А. 316
Веселов Є. В. 4
Власенко О. В. 76, 79, 102
Вовк В. В. 142
Войтко А. С. 347
Войтко Ю. В. 312
Волошин В. С. 58
Волощук В. А. 211, 213, 216, 248, 296
Ворвуль Д. М. 372
Воробйов М. В. 55
Ворошилов О. Д. 253
Гаврилко Є. В. 336, 377
Гажа М. В. 218
Гапонец Є. Р. 62
Голівець О. О. 135
Гонтар Ю. М. 4
Гречанінов В. Ф. 45
Грудзинський Ю. Є. 253
Гудзій А. С. 287
Гуров Д. І. 377
Дащик А. С. 350
Дешко В. І. 177, 199
Дєєва Ю. В. 452
Джежулей В. О. 88
Дибач О. М. 4
Діброва Є. В. 432
Долинкевич В. М. 9
Домненко З. О. 314
Донець А. Г. 390, 436
Драпей С. С. 38
Дриневський В. Р. 255
Дубровська В. В. 192
Дячук А. О. 316
Єрмосін О. О. 319
Єрмосіна О. О. 322
Єрошкін Ю. М. 325, 328, 340, 380
Заболотний О. А. 161
Заковоротний О. І. 411
Залевська О. В. 350, 360
Захарченко А. С. 231, 240, 245, 262, 294
Здольник М. О. 242
Зелінська В. В. 434
Зінченко Д. Д. 234
Ільченко Д. С. 194

Іщенко І. В. 220
 Кардашов О. В. 429, 438
 Карпенко Д. І. 436
 Катунін Є. В. 41
 Кісіль В. В. 223
 Клевцов С. В. 24, 26
 Климюк А. С. 245
 Кньовець Д. М. 100
 Коваль О. В. 319, 322
 Коваль С. О. 52
 Ковальчук І. О. 102
 Козурак Т. С. 390
 Коновалюк О. Л. 132
 Коньшин В. І. 17, 32
 Корчма В. О. 174
 Коханевич Д. Г. 438
 Кравець В. Ю. 65, 68
 Кравчук І. В. 325
 Крамаренко С. О. 205
 Красан Д. М. 258
 Кривохижа М. А. 105
 Кропива В. Ю. 353
 Круковський П. Г. 377
 Кублій Л. І. 398, 432, 434, 440
 Кузьменко І. М. 401
 Кузьмініх В. О. 347
 Куран Ю. Р. 177
 Кучинська К. А. 237
 Лазарєв Є. С. 196
 Лебедєв А. В. 356
 Левицький О. О. 199
 Ленков Д. Є. 180, 183
 Логвиненко В. Є. 414
 Лоев Р. О. 380
 Любицький С. В. 255
 Ляхор Д. О. 17
 Ляшенко А. М. 145
 Ляшко І. І. 360
 Мавроді В. В. 226
 Макарчук А. В. 375
 Малевицька А. О. 260
 Малюк І. О. 440
 Маріяш Ю. І. 218, 226, 234
 Мартинюк О. І. 290
 Мартишина Є. Д. 12
 Марюхін М. О. 229
 Матусевич Х. Б. 148
 Мельник О. Г. 262
 Менжинський О. Ю. 151
 Меренгер П. П. 126
 Мержиєвський А. О. 264
 Михайленко К. Є. 107
 Мілейко Б. Д. 164
 Міщенко А. А. 393
 Москаленко Ю. В. 186
 Мусієнко А. П. 372
 Муха Н. С. 266
 Мягкий Р. А. 110
 Накоренко Д. А. 452
 Недашківський О. Л. 364
 Недбайло О. М. 85
 Никифорович О. Є. 213, 296
 Новаківський Є. В. 58, 60, 62
 Новіков П. В. 223, 229, 237
 Новосад Ю. І. 55
 Овдієнко Ю. М. 21
 Олєнєва К. М. 383
 Олименко І. О. 82
 Олійник Д. А. 245
 Омецинський С. О. 231
 Орехова М. О. 82
 Остапенко І. А. 38
 Перебийніс М. В. 328
 Передера В. Р. 364
 Петрук А. І. 60
 Печериця І. О. 24
 Пешко В. А. 82, 91, 107, 132, 135
 Пироговська Т. В. 333
 Пихтар М. П. 41
 Політикін М. В. 202
 Поліщук В. В. 331
 Поліщук І. А. 290
 Половинкін К. О. 49
 Полягушко Л. Г. 446
 Правовєров А. О. 154
 Притула Н. О. 139, 145, 148
 Приходько Н. С. 113
 Рачинський А. Ю. 113, 129
 Риндюк Д. В. 94, 115, 123
 Романова К. О. 154
 Руденко Н. А. 452
 Рябець К. О. 333
 Савко В. Я. 377
 Салій Л. М. 41
 Самсоненко А. В. 38
 Сапожников О. Ю. 396
 Сахацька І. М. 443
 Свинчук О. В. 331
 Сегеда І. В. 426
 Сельоткін В. О. 248
 Сепік А. В. 91
 Сергієнко М. В. 269
 Середа В. В. 158
 Сєчин І. Я. 336

Сидоренко Ю. В. 396
Сірий О.А. 88, 97
Січковський М. А. 231
Сліжевський К. Д. 85
Соломаха А. С. 151, 161, 167
Соломко Д. Г. 292
Сорокова Н. М. 49
Спірін Г. Є. 32
Старовіт І. С. 377
Стельмах М. О. 272, 275
Степанець О. В. 242, 258, 281, 284
Степанченко А. А. 115
Суходуб І. О. 180, 194, 196, 205
Сцельник Д. Р. 72
Тарнавський Ю. А. 443
Теличко І. В. 158
Тимченко А. Р. 278
Ткаченко М. В. 94
Топал А. О. 19
Точинський Я. Р. 189
Туранський С. К. 240
Файдюк Т. Р. 367
Федорова Н. В. 308, 356
Філатов В. І. 9,12
Фомічев Є. Ю. 340
Хавкін А. Д. 398
Хайрнасов С. М. 15, 19, 52, 72
Харкевич Ю. І. 353
Хлобистов Є. В. 452
Хнюкало В. С. 446
Черкас О. С. 401
Черноусенко О. Ю. 85, 110, 120, 129
Черноусов Д. І. 343
Чиженко Б. О. 294
Чикало В. Б. 65
Чмихало Б. О. 245
Шахбазов І. О. 97
Шахов Є. О. 26
Шваб М. І. 240
Шевченко О. М. 174, 183
Шепель Г. С. 68
Шпурик В. В. 314, 343, 383
Штефан В. М. 45
Штіфзон О. Й. 287, 292
Шутенко А. В. 192
Шушура О. М. 393
Щокін В. Д. 15
Юров М. С. 21
Яценко О. І. 202

Наукове видання

**СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ
НАУКОВОГО ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ
ЕНЕРГЕТИКИ:
БЕЗПЕКА, СТІЙКІСТЬ,
ІТ ТА ЕКОЛОГІЧНИЙ МОНІТОРИНГ**

XXIII Міжнародна науково-практична конференція
молодих вчених та студентів

До 40-річчя Чорнобильської катастрофи

17–22 квітня 2026 року, м. Київ

*В авторській редакції
Оригінал-макет замовника*

Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»
Свідоцтво про державну реєстрацію: серія ДК № 5354 від 25.05.2017 р.
просп. Берестейський, 37, м. Київ, 03056

Формат 60×84¹/₈. Гарнітура Times.
1 файл (10,7 Мб). Обл.-вид. арк. 37,48. Поз. 26-3-3-003.

Видавництво «Політехніка» КПІ ім. Ігоря Сікорського
вул. Політехнічна, 14, корп. 15
м. Київ, 03056, Україна
тел. (044) 204-81-78