

# ЕНЕРГЕТИЧНА ЕФЕКТИВНІСТЬ ТА ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

## ENERGY EFFICIENCY AND ENERGY SAVING

УДК 621.311.003.13

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324186

В.Ф. Находов<sup>1</sup>, д.т.н, доцент, ORCID 0000-0001-7643-5965  
О.В. Бориченко<sup>1</sup>, канд.техн.наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945  
М.М. Лунін<sup>1</sup>, аспірант, ORCID 0009-0006-6983-0805  
<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ДОСВІД СТВОРЕННЯ ТА ФУНКЦІОНУВАННЯ СИСТЕМ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ НА МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТАХ

*Актуальність створення національної системи енергомоніторингу в Україні обумовлена потребою раціонального використання паливно - енергетичних ресурсів на тлі сучасних викликів, зокрема енергетичної кризи, спричиненої військовою агресією Російської Федерації. Запровадження такої системи дозволить забезпечити постійний контроль та аналіз енергоспоживання на всіх рівнях: від державних установ до підприємств, установ та організацій. Використання сучасних цифрових технологій для моніторингу використання паливно - енергетичних ресурсів сприятиме оперативному виявленню неефективного використання ресурсів, зниженню витрат і покращенню екологічних показників. У контексті інтеграції України до Європейського Союзу та досягнення цілей сталого розвитку, національна система енергомоніторингу може стати важливим інструментом для виконання міжнародних зобов'язань у сфері енергоефективності та сталого розвитку. Тому створення такої системи є критично важливим для забезпечення енергетичної незалежності та стійкості країни.*

*Об'єкт дослідження: системи енергоменеджменту та енергомоніторингу, організаційні та технічні елементи систем.*

*Предмет дослідження: процеси та механізми функціонування системи енергомоніторингу, її вплив на підвищення енергоефективності, забезпечення енергетичної безпеки та можливості формування національної системи енергомоніторингу.*

*Методи дослідження: аналітичні методи, метод анкетування.*

*Практичне значення результатів полягає у розробці національної системи моніторингу ефективності використання паливно-енергетичних ресурсів, впровадження якої дасть установам та органам місцевого самоврядування необхідну інформацію для аналізу використання ресурсів та подальшої оптимізації енергоспоживання.*

**Ключові слова:** енергоефективність, моніторинг, паливно-енергетичні ресурси, енергоменеджмент.

#### Вступ

У сучасному світі моніторинг використання паливно-енергетичних ресурсів є невід'ємною складовою загальної системи менеджменту місцевого самоврядування. Контроль ефективності використання таких ресурсів багато в чому визначає стійкість та темпи розвитку країни. В умовах повномасштабного вторгнення Росії на територію України перед територіальними громадами ще сильніше постала проблема вирішення важливих питань, пов'язаних зі споживанням паливно-енергетичних ресурсів, обліком та контролем витрат енергоносіїв, запровадженням заходів із підвищення рівня енергетичної ефективності та використанням потенціалу енергозбереження в умовах обмеженості ресурсів [1]. Ця проблема не є новою, проте заходи з підвищення ефективності використання ПЕР на рівні окремих міст та регіонів все ще не набули в Україні масового характеру. У першу чергу це пов'язано з тим, що вартість енергетичних ресурсів ще декілька років тому була набагато нижчою від ринкової, що не створювало достатньої мотивації для ощадливого споживання енергії або інвестицій в енергозберігаюче обладнання, технології або проекти енергозбереження. [2] Також, мала місце недостатня обізнаність громад у сфері енергоефективності, енергозбереження та енергоменеджменту. Тим часом, впровадження системи енергоменеджменту та енергомоніторингу у громаді несе в собі наступні переваги:

-Підвищення ефективності використання ПЕР. Зниження енергетичної складової комунальних послуг. Зниження фінансового навантаження на міський бюджет, пов'язаного з оплатою енергоносіїв.

Запровадивши систему енергоменеджменту та енергомоніторингу, можна без великих фінансових витрат досягти економії енергії від 3 до 5% за 1-2 роки. Такий поступ для українських громад у сучасних умовах є досить суттєвим та вкрай необхідним. [3]

-Підвищення енергетичної безпеки та незалежності муніципальної енергетики.

-Зниження екологічного навантаження на оточуюче середовище шляхом зменшення викидів вуглекислого газу внаслідок скорочення використання енергоресурсів.

Впровадивши систему енергоменеджменту, муніципалітет має отримати:

-Можливість оперативного контролю та аналізу ефективності використання ПЕР в будівлях

-Допомогу у створенні енергоефективних програм та проєктів, а також подальший моніторинг ефективності впровадження даних проєктів.

-Допомога у складанні енергетичних балансів.

**Метою дослідження** є розробка теоретичних та практичних підходів до створення національної системи енергомоніторингу, яка забезпечить ефективний контроль енергоспоживання на державному та місцевому рівнях.

Завдання дослідження: дослідити законодавчу базу України у сфері енергоефективності, енергоменеджменту та енергомоніторингу, виконати аналіз існуючих систем енергомоніторингу в Україні, на прикладі найбільшої системи енергомоніторингу дослідити залученість та активність громад у сфері енергомоніторингу, обґрунтувати можливість та доцільність створення національної системи енергетичного моніторингу.

### **Матеріал і результати досліджень.**

#### **Система енергетичного менеджменту: впровадження, функціонування та можливості**

Для початку роботи з розбудови, впровадження та функціонування системи енергетичного менеджменту, перш за все необхідне відповідне управлінське рішення про створення такої системи. Наразі законодавчо не визначено повноваження органів місцевого самоврядування щодо впровадження засад енергоменеджменту. Однак, не дивлячись на це, постановою Кабінету Міністрів України від 23.12.2021 р. № 1460 органам місцевого самоврядування рекомендовано впровадити системи енергетичного менеджменту з урахуванням Порядку впровадження систем енергетичного менеджменту, затвердженого цією постановою, та визначити керівників (заступників керівників) відповідних органів, відповідальними за впровадження та функціонування системи енергетичного менеджменту у таких органах [4]. Нерідко на початку посадовець виконавчої влади (міський голова, керівник управління) або політична фракція в міській раді ініціює ідею зсередини або отримує інформацію ззовні (ЗМІ, політичні канали, енергетичне агентство тощо) про можливості та переваги муніципального енергоменеджменту. Потім така особа (особи) розпочинає цей процес в своєму муніципалітеті. Для забезпечення коректного функціонування системи, необхідно створити спеціалізований орган – відділ енергоменеджменту. Начальник відділу енергоменеджменту громади інформує осіб про наявні можливості у сфері енергоефективності, висвітлює переваги та поточні досягнення муніципалітету у сфері енергозбереження. Працівники відділу виконують поставлені задачі. Прикладом таких задач може слугувати:

-Скорочення споживання енергії на 10% на всіх об'єктах енергоменеджменту протягом вказаного періоду часу

-Досягнення економії, вищої за витрати на відділ

-Зниження викидів CO<sub>2</sub> на 20% порівняно з певним роком у минулому

-Перехід на 50% використання відновлюваних джерел енергії до 2030 року

Начальник відділу перевіряє виконання поставлених цілей, та здійснює корегування задач згідно поточного виконання. Таким чином, роботу системи енергоменеджменту можна описати циклом Демінга (PDCA – Plan – Do – Check – Akt) - управління енергоспоживанням відповідно до стандарту ISO 50001

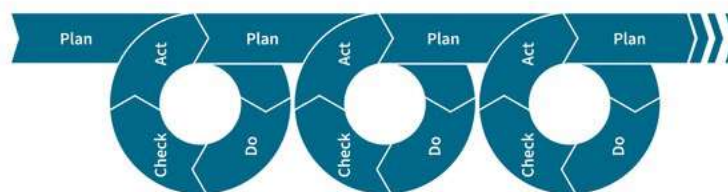


Рисунок 1 - Модель циклу Plan – Do – Check – Akt

При створенні системи енергоменеджменту на рівні установи або громади, вищенаведені пункти часто коригуються. Практичне впровадження системи енергоменеджменту в установах часто показує, що відповідальними за систему призначають спеціалістів невідповідного профілю. [5,6] Спеціаліст, який не має відповідної кваліфікації буде потребувати більше часу на ознайомлення з відповідними документами, а рівень кваліфікації у сфері енергетики та енергозбереженні не завжди буде сприяти впровадженню та коректному функціонуванню системи. Також досвід впровадження системи енергоменеджменту сигналізує про необізнаність керівництва громади про доцільність впровадження такої системи. Це свідчить про недостатнє розповсюдження інформації про системи енергоменеджменту, та можливі вигоди муніципалітетів від її впровадження.

#### **Огляд систем енергетичного моніторингу України: опис, функціонування та можливості**

Для проведення енергетичного моніторингу в будівлях міста або громади часто використовують спеціалізовані автоматизовані інформаційні системи (далі АІС). Такі системи здійснюють моніторинг та аналіз даних, оперативно попереджають про відхилення від норми та готують звіти. Деякі з них дозволяють автоматичний збір показів лічильників. Тому, оскільки питання управління енергоспоживанням в будівлях, які знаходяться на балансі/у власності громад пов'язане із витратами місцевого бюджету на їх утримання, інтерес до автоматизованих інформаційних систем зростає. На сьогодні український ринок відповідних послуг пропонує широкий спектр АІС від різних компаній - розробників:

- АІС «Енергоплан», <http://energyplan.com.ua>
- АІС «Енергосервіс: облік, контроль, економія», <https://energoservic.com/auth/login/>
- АІС «UMUNI, <https://umuni.com>
- АІС «EManagement24», <http://emanagement24.com>
- АІС «АСЕМ», <http://www.asem.com.ua>

Оскільки кожна компанія-розробник АІС має своє бачення та підходи до реалізації програмного продукту, необхідно систематизувати систему опису даних програм, що дасть можливість порівнювати між собою АІС та за необхідності провести порівняльний аналіз систем та обрати найбільш релевантну програму для користування громад.

Опираючись на ДСТУ ISO/IEC 9126-1:2013, уніфікована система опису АІС містить наступні показники:

-Підтримка користувачів – можливість розробника АІС надавати консультативну, інформаційну, технічну підтримку та/або проводити навчання для користувача, реагувати на запити щодо несправності чи для удосконалення АІС, інше

-Зручність використання – відповідність АІС базовим потребам користувача – логічна структура, сучасний зручний інтерфейс, можливість побудови ієрархічної структури обліку, налаштування доступу для користувача різного рівня, внесення даних через мобільний пристрій та їх періодичність, інше.

-Функціональність – здатність АІС виконувати функції, які відповідають заявленим і передбачуваним потребам користувача, на виконання певних завдань та цільових показників. Цей критерій містить ряд індикаторів, за якими можна оцінити функціонал програми, необхідний для оптимізації щоденної роботи енергоменеджера.

-Супроводжуваність – здатність АІС бути зміненим на вимогу користувача. Модифікації можуть охоплювати коригування, вдосконалення або пристосування програмного продукту до певних вимог.

-Надійність – здатність АІС виконувати функції щодо збереження та захисту всієї інформації, внесеної під час експлуатації користувачем. (збереження бази даних, створення резервних копій, захист від помилкових дій користувачів, наявність імпорту та експорту даних).

-Формування блоку енергоаудитора – можливість вносити, імпортувати, експортувати технічні характеристики стану будівлі, інженерних мереж та іншу необхідну інформацію для проведення енергоаудиту.

-Вартість – зазначена ціна експлуатації АІС, пакети послуг та їх цінова політика.

Всі розглянуті системи енергомоніторингу відповідають вищенаведеним показникам. Для даних програм виділено основні переваги та недоліки.

#### Переваги:

-Наявна можливість навчання щодо користування АІС та технічна підтримка в телефонному режимі. Швидке реагування на запити та пропозиції щодо удосконалення продукту.

-Наявна можливість автоматичного зчитування показів лічильників при наявності відповідного обладнання.

-Наявні групи користувачів у соцмережах.

-Наявний імпорт, експорт та резервування даних. Присутній захист від помилкового введення користувачів та система сповіщень про помилки. Доступне сповіщення при внесенні даних і повідомлень про внесення аномальних показників.

-Наявна можливість внесення технічних характеристик будівель та інженерних мереж.

Недоліки:

- Неможливість формування дашбордів користувачів.
- Відсутність розробленої системи бенчмаркінгу будівель та визначення класів енергоефективності.
- Проблеми з доступом у найбільш завантажені години.

В муніципалітетах та громадах виникає ситуація, коли система енергомоніторингу давно впроваджена та функціонує, а система енергоменеджменту ще відсутня. Проте, на основі інформації системи, керівництво проводить аналіз використання ПЕР та приймає відповідні управлінські рішення. Однією з умов ефективності та точності роботи системи енергомоніторингу являється робота користувачів із системою та зворотній зв'язок енергоменеджера громади. В такому разі, особливу увагу потрібно звернути на роботу енергоменеджера з громадою, його здатність організувати роботу енергоменеджерів установ. Для коректного порівняння споживання ПЕР громадою необхідно охопити системою енергомоніторингу якомога більше установ та організацій міста. Саме в такому разі система енергомоніторингу буде коректно працювати, та видавати релевантні дані, за допомогою яких енергоменеджер буде формувати необхідні звіти та висновки. У співпраці з однією з найбільших систем енергомоніторингу України АІС «UMUNI» було проаналізовано декілька громад, що працюють з системою понад 3 роки. На рисунках нижче представлено кількість зареєстрованих користувачів у АІС, а також внесення даних у систему – активність користувачів.

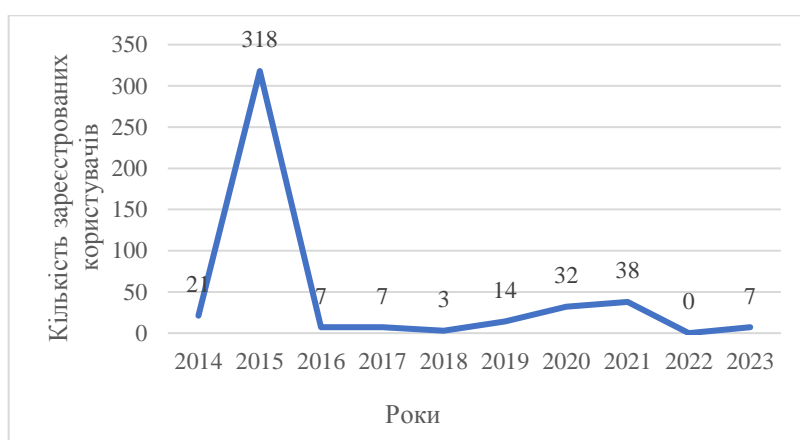


Рисунок 2 - Кількість зареєстрованих користувачів громади 1

На рисунку помітно, що основний процес реєстрації та заповнення бази даних користувачів відбувається на початку роботи програми. Подальше додавання користувачів у систему відбувається епізодично, та в значно менших об'ємах.

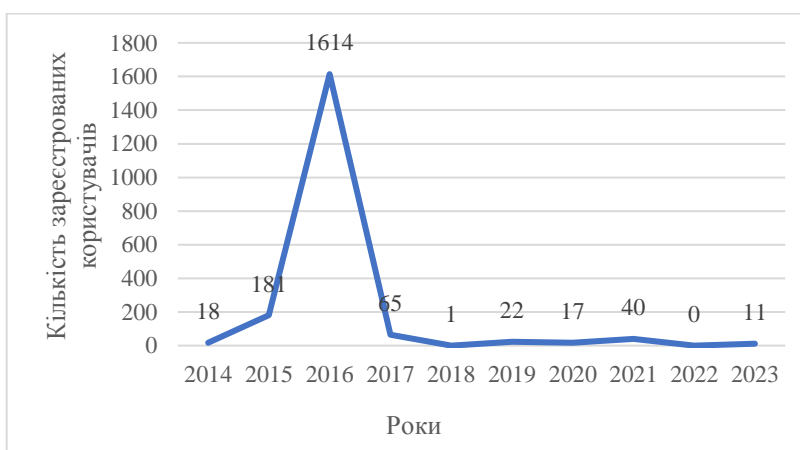


Рисунок 3 - Кількість зареєстрованих користувачів громади 2

Громада 2 обрала декілька десятків пробних, «тестових» об'єктів для роботи з АІС. Отримавши позитивні відгуки від енергоменеджерів, було прийнято рішення розширити кількість користувачів, та перевести бюджетні заклади та установи на одну систему енергетичного моніторингу.

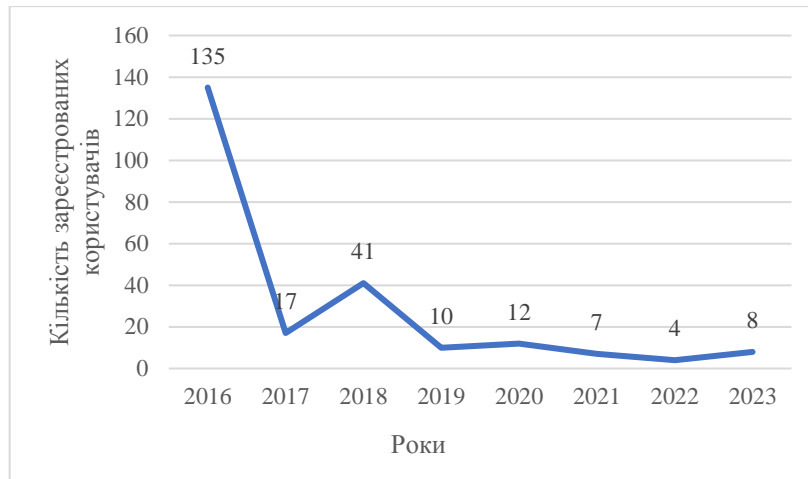


Рисунок 3 - Кількість зареєстрованих користувачів громади 3

Енергоменеджери громади 3 поступово додавали користувачів у систему.

Високий відсоток залучення користувачів був досягнутий не одразу, а в ході навчань, тренінгів, консультацій та роз'яснень щодо роботи програми та необхідності її впровадження. Під час першого року роботи з системою в ній було зареєстровано всього 57,7% користувачів. Також, можна помітити відсутність або зниження реєстрації нових користувачів у 2022 році. Бойові дії в цілому негативно вплинули на роботу з системами енергомоніторингу. На рисунках нижче наведено кількість зареєстрованих лічильників та активність користувачів системи. Під активністю розуміється внесення інформації по споживанню ПЕР будівлею/установою хоча б один раз на тиждень протягом року.

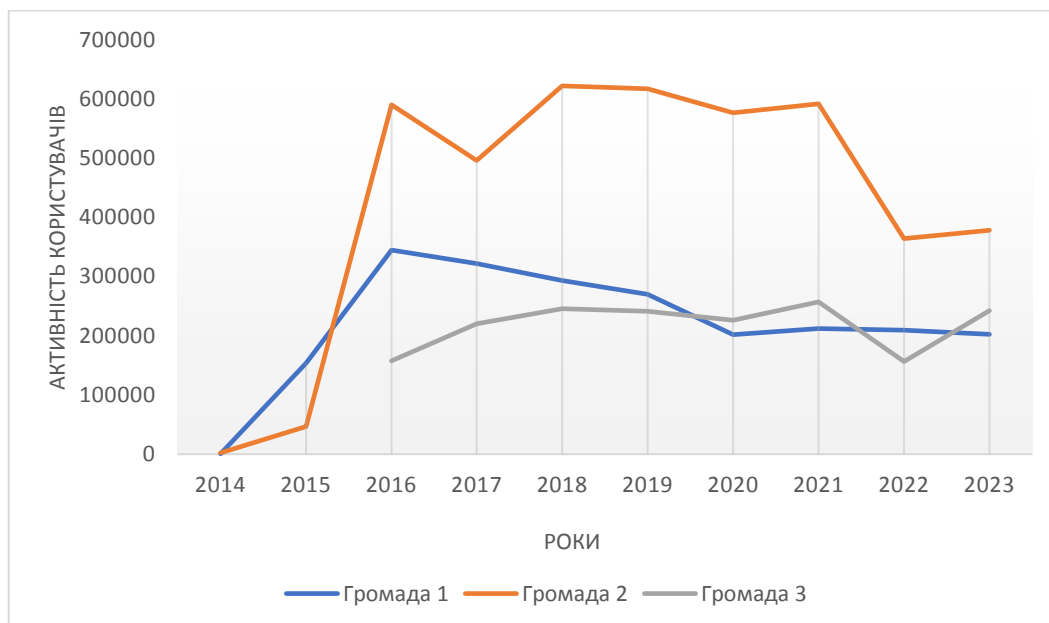


Рисунок 4 - Активність користувачів громад

Зниження активності користувачів у 2020 та 2022 роках пов'язане з початком пандемії коронавірусу та широкомасштабним вторгненням РФ на початку 2022 року. Різне скорочення активності користувачів громади 2 у 2022 році перш за все пов'язано з веденням бойових дій на території громади, що призвело до руйнування будівель. В той же час можна побачити відсутність значних змін у активності громади 1, що пов'язане з віддаленістю громади від лінії фронту та появу значного числа переселенців з тимчасово окупованих територій. Активність користувачів громади 3 виросла у 2023 році, що пов'язане з прибуттям та розміщенням на території громади значної кількості переселенців.

Система енергетичного моніторингу дає змогу керівництву громади оцінити використання паливно-енергетичних ресурсів та прийняти відповідні управлінські та технічні рішення щодо скорочення споживання ПЕР. Однак, організація, збір і аналіз даних за рідкими виключеннями не виходить на рівень

вище громад [8]. Створення системи моніторингу паливно – енергетичних ресурсів вищого порядку – національної системи енергомоніторингу являється важливим кроком для підвищення енергетичної безпеки країни. Завдяки ефективному використанню системи енергомоніторингу, поширеної на країну, можна досягти скорочення споживання ПЕР, що в свою чергу знизить викиди парникових газів, що відповідає концепції сталого розвитку. Законом України «Про енергетичну ефективність»(ст.13) вказано на створення такої системи. Вона має забезпечувати:

- інформацію про рівень енергетичної ефективності в країні
- моніторинг виконання Національного плану
- моніторинг стану впровадження систем енергетичного менеджменту
- моніторинг виконання державних цільових програм у сфері забезпечення енергетичної ефективності та оцінка їх ефективності
- моніторинг наявності місцевих енергетичних планів
- проведення порівняння енергетичної ефективності об'єктів (бенчмаркінгу).[9]

Держателем національної системи, згідно Закону є центральний орган виконавчої влади, що реалізує державну політику у сфері забезпечення енергетичної ефективності, який вживає організаційних заходів, пов'язаних із забезпеченням функціонування Системи - Державне агентство з енергоефективності та енергозбереження України. Система має стати джерелом достовірної інформації про споживання ресурсів закладами та установами по всій країні. Однак, створення та реалізація такої системи несе в собі низку невирішених питань та рішень. Національна система моніторингу енергоефективності не може ефективно існувати не тільки без розбудови локальних систем енергетичного моніторингу, а й без синхронізації і створення національної системи, яка б дала можливість використовувати ці дані всім громадам, всім суб'єктам для прийняття предметних управлінських рішень. Водночас, механізми синхронізації майбутньої системи із локальними системами енергомоніторингу ще не розроблені. Майбутня національна система має накопичувати дані із локальних систем, автоматично змінюючи надані дані (переважно різного формату) відповідно до потреб користувачів системи. Також, створення такої системи може нести в собі ризики «перехоплення» користувачів із локальних, приватних, систем, таким чином знижуючи прибуток компаній. Тому, принципи створення системи та її механіки можна викласти наступними тезами:

- співпраця з приватним бізнесом - локальними системами енергомоніторингу
- побудова системи енергомоніторингу «вищого порядку» - збору, обробці та аналізу даних, переданих з локальних систем. Національна система має та оброблювати інформацію, а локальні системи - збирати цю інформацію для подальшої передачі
- структурованість системи має розпочинатися з рівня області – нижчі рівні мають забезпечувати локальні системи.

### **Висновки.**

Моніторинг споживання ПЕР – перша сходинка системи енергоменеджменту, без якої подальше функціонування системи неможливе. Впровадження системи енергомоніторингу на рівні муніципалітету дасть безперечні переваги його керівництву. Енергетичний моніторинг дозволяє одержати докладну картину споживання енергії та порівняти ефективність існуючого споживання зі споживанням енергії на інших об'єктах. Таким чином, роботу з підвищення активності у сфері моніторингу енергоспоживання на рівні громад слід продовжувати і підсилювати. Однак, для ширшого охоплення будівель і установ, а також поширення процесу енергомоніторингу, енергозбереження та енергоменеджменту на рівень областей, а згодом і країни необхідно створити національну систему моніторингу енергоефективності використання ПЕР. Майбутня система має відповідати як європейській практиці впровадження моніторингу енергоефективності, так і новітнім цифровим технологіям. У результаті система має стати джерелом достовірної інформації про рівень енергоефективності, на основі якої органи влади і суб'єкти господарювання прийматимуть практичні рішення щодо оптимізації енергоспоживання. [10]

### **Список використаної літератури**

1. Алгоритм дій органів місцевого самоврядування по впровадженню системи енергетичного менеджменту [Електронний ресурс] // Проєкт USAID «Підвищення ефективності роботи і підзвітності органів місцевого самоврядування» («ГОВЕРЛА») [hoverla.org.ua](https://decentralization.gov.ua/). – 2022. – Режим доступу до ресурсу: <https://decentralization.gov.ua/>

2. Енергоефективність в муніципальному секторі. Навчальний посібник для посадових осіб місцевого самоврядування /А.Максимов, І.Вахович, Т.Гутніченко, П.Бабічева, Н.Вакулєнко, Н.Ігольнікова, Т.Цифра, О.Молодід, О.Молодід, О.Белєнкова, Ю.Ячменьова, Ю.Дорошук, А.Скрипник, А.Ваколюк, В.Бойко, М.Сегедій, Д.Вахович/ Асоціація міст України – К., ТОВ «ПІДПРИЄМСТВО «ВІ ЕН ЕЙ»,2015. –184 с.

3. Посібник з муніципального енергетичного менеджменту / Є.М.Іншеков, Є.Є.Нікітін, М.В.Тарновський, А.В.Чернявський. – К.: Поліграф плюс, 2014. –238 с. ISBN 978-966-8977-46-6.
4. Про впровадження систем енергетичного менеджменту : Постанова Каб. Міністрів України від 23.12.2021 р. № 1460 : станом на 28 квіт. 2023 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-p#Text>.
5. Енергоменеджмент – ДП «Укрвакцина» МОЗ України». ДП «Укрвакцина» МОЗ України». URL: <https://www.ukrvas.com.ua/нормативні-документи/інформація-що-підлягає-оприлюдненню/енергоменеджмент/> (дата звернення: 10.11.2024). Енергоменеджмент – ДП «Укрвакцина» МОЗ України». ДП «Укрвакцина» МОЗ України». URL: <https://www.ukrvas.com.ua/нормативні-документи/інформація-що-підлягає-оприлюдненню/енергоменеджмент/>
6. Енергоменеджмент | Міністерство економіки України. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=6f956bec-9b48-4f18-a64f-d8ac0831a358&tag=Energomenedzhment>.
7. Тренінг «Впровадження системи енергомоніторингу «Umuni» в бюджетних установах | Ніжинська міська рада. Ніжинська міська рада. URL: <https://nizhynrada.gov.ua/news/novini/trening-vprovadzhennya-sistemi-energomonitoringu-umuni-v-byudzhetnih-ustanovah>.
8. Автоматизована система «Київщина енергоефективна». Департамент житлово-комунального господарства та енергоефективності Київської ОДА. URL: <http://ogku.kiev.ua/автоматизована-система-київщина-ен>.
9. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX : станом на 18 верес. 2024 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
10. Урядовий портал Єдиний веб-портал органів виконавчої влади України. Національна система моніторингу енергоефективності має стати надійним джерелом інформації для прийняття рішень щодо оптимізації енергоспоживання. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/natsionalna-systema-monitorynhu-enerhoefektyvnosti-maie-staty-nadiinym-dzherelom-informatsii-dlia-pryiniattia-rishen-shchodo-optymizatsii-enerhospozhyvannia>.

**V. Nakhodov**<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-7643-5965

**O. Borichenko**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

**M. Lunin**<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0006-6983-0805

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”**

## **EXPERIENCE IN CREATING AND OPERATING ENERGY MONITORING SYSTEMS AT MUNICIPAL FACILITIES**

*The urgency of creating a national energy monitoring system in Ukraine is driven by the need for rational use of fuel and energy resources against the backdrop of current challenges, including the energy crisis caused by the military aggression of the Russian Federation. The introduction of such a system will ensure continuous monitoring and analysis of energy consumption at all levels: from government agencies to enterprises, institutions and organisations. The use of modern digital technologies to monitor the use of fuel and energy resources will help to promptly identify inefficient use of resources, reduce costs and improve environmental performance. In the context of Ukraine's integration into the European Union and achievement of sustainable development goals, a national energy monitoring system can become an important tool for fulfilling international commitments in the field of energy efficiency and sustainable development. Therefore, the creation of such a system is critical for ensuring the country's energy independence and sustainability.*

*Object of research: energy management and energy monitoring systems, organisational and technical elements of the systems.*

*Subject of the study: processes and mechanisms of the energy monitoring system, its impact on energy efficiency, energy security and the possibility of forming a national energy monitoring system.*

*Research methods: analytical methods, questionnaire method.*

*The practical significance of the results lies in the development of a national system for monitoring the efficiency of fuel and energy resources, the implementation of which will provide institutions and local governments with the necessary information to analyse resource use and further optimise energy consumption.*

**Keywords:** *energy efficiency, monitoring, fuel and energy resources, energy management.*

**References**

1. Algorithm of actions of local governments to implement an energy management system [Electronic resource] // USAID Project ‘Improving the Performance and Accountability of Local Governments’ (GOVERLA) [hoverla.org.ua](https://decentralization.gov.ua/). - 2022: <https://decentralization.gov.ua/>.
2. Energy Efficiency in the Municipal Sector. Training manual for local government officials / A.Maksymov, I.Vakhovych, T.Gutnichenko, P.Babicheva, N.Vakulenko, N.Iholnikova, T.Tsyfra, O.Molodid, O.Molodid, O.Belenkova, Y.Yachmenyova, Y.Doroshuk, A.Skrypnyk, A.Vakolyuk, V.Boyko, M.Sehedi, D.Vakhovych / Association of Ukrainian Cities - K, LLC ‘Enterprise “V&A”’, 2015. -184 p.
3. Manual on Municipal Energy Management / E.M.Inezhekov, E.E.Nikitin, M.V.Tarnovskyi, A.V.Chernyavskiy - K.: Polygraph Plus, 2014. 238 p. ISBN 978-966-8977-46-6.
4. On the implementation of energy management systems: Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine of 23 December 2021. of Ministers of Ukraine of 23.12.2021 No. 1460: as of 28 April. 2023 p. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-п#Text>.
5. Energy management - State Enterprise Ukrvaktsyna of the Ministry of Health of Ukraine. SE ‘Ukrvaktsyna’ of the Ministry of Health of Ukraine’. URL: <https://www.ukrvac.com.ua/нормативні-документи/інформація-що-підлягає-оприлюдненню/енергоменеджмент/> (accessed 10.11.2024). Energy management - SE ‘Ukrvaktsyna’ of the Ministry of Health of Ukraine’. SE ‘Ukrvaktsyna’ of the Ministry of Health of Ukraine". URL: <https://www.ukrvac.com.ua/нормативні-документи/інформація-що-підлягає-оприлюдненню/енергоменеджмент/>.
6. Energy management | Ministry of Economy of Ukraine. URL: <https://www.me.gov.ua/Documents/List?lang=uk-UA&id=6f956bec-9b48-4f18-a64f-d8ac0831a358&tag=Energomenedzhment>.
7. Training ‘Implementation of the Umuni energy monitoring system in budgetary institutions’ | Nizhyn City Council. Nizhyn City Council. URL: <https://nizhynrada.gov.ua/news/novini/trening-vprovadzhennya-sistemi-energomonitoringu-umuni-v-byudzhetnih-ustanovah>.
8. Automated system ‘Kyiv region is energy efficient’. Department of Housing and Communal Services and Energy Efficiency of the Kyiv Regional State Administration. URL: <http://ogku.kiev.ua/автоматизована-система-київщина-ен>.
9. On Energy Efficiency: Law of Ukraine of 21.10.2021 No. 1818-IX: as of 18 September. 2024 URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1818-20#Text>.
10. Government Portal The single web portal of the executive authorities of Ukraine. The National Energy Efficiency Monitoring System should become a reliable source of information for making decisions on optimising energy consumption. URL: <https://www.kmu.gov.ua/news/natsionalna-systema-monitorynhu-enerhoefektyvnosti-maie-staty-nadiinym-dzherelom-informatsii-dlia-pryiniattia-rishen-shchodo-optymizatsii-enerhospozhyvannia>.

Надійшла: 11.11.2024  
Received: 11.11.2024



## МОДЕЛЮВАННЯ ПОКАЗНИКІВ ЕНЕРГОСПОЖИВАННЯ БАГАТОКВАРТИРНОЇ БУДІВЛІ З ВИКОРИСТАННЯМ СПЕЦІАЛІЗОВАНИХ ПРОГРАМНИХ ПРОДУКТІВ

*Підвищення енергоефективності будівельного фонду є стратегічним завданням для України, а для залучення фінансування на комплексні проекти термомодернізації потрібно проводити енергетичний аудит та складати енергетичний сертифікат для житлових та багатоквартирних будівель. Енергоаудитори в Україні зазвичай розробляють власні моделі для проведення розрахунків, проте існують програмні продукти, що дозволяють виконувати моделювання енергоспоживання будівель з урахуванням особливостей експлуатації, характеристик огорожень та інженерних систем. Вивчення їх можливостей і порівняльний аналіз є актуальною задачею.*

*Метою роботи є огляд можливостей програмних продуктів для розрахунків питомого енергоспоживання на різні потреби і класу енергоефективності, а також розробки енергетичного сертифікату з виконанням порівняльного аналізу на прикладі житлового багатоквартирного будинку. Методи дослідження: аналітичні методи, метод порівняльного і структурного аналізу, техніко-економічні розрахунки з використанням програмного забезпечення E-Аудит, Auditor OZC, MS Excel та ін.*

**Ключові слова:** багатоквартирні будинки, моделювання енергоспоживання, енергоефективність, термомодернізація.

### Вступ

Питання підвищення енергоефективності будівельного фонду в Україні є особливо важливим через застарілий стан інженерних комунікацій в будівлях і значне енергоспоживання, Теплотехнічні характеристики огорожень в будівельному фонді нижче за встановлені будівельні норми [1], а інженерні мережі мають низький клас енергоефективності [2]. Енергетичну сертифікацію за національною методикою розрахунку [3] було впроваджено із введенням в дію Закону України «Про енергоефективність будівель» [4]. При визначенні класу енергоефективності будівлі за діючими вимогами враховують відхилення розрахункових значень енергоспоживання за методикою [3] від граничних показників [5]. Будівля є складною енергосистемою, для аналізу показників енергоспоживання доцільним є застосування енергетичного моделювання [6] для вибору технічних рішень під час реалізації комплексних проектів термомодернізації. Застосування енергоаудиторами програмних продуктів сприяє автоматизації проведення розрахунків енергоспоживання до та після впровадження заходів з енергозбереження, розробці енергетичного сертифікату та прискоренню процесів впровадження комплексних проектів термомодернізації.

**Метою** даного дослідження є проведення енергетичного аудиту багатоквартирної будівлі та розробка рекомендацій для впровадження заходів з енергозбереження з використанням спеціалізованих програмних продуктів. Дослідження проводилося в рамках виконання магістерської дисертації [7-10].

Відповідно до мети роботи були поставлені такі завдання:

- вивчити можливості програмних продуктів для моделювання енергетичних характеристик;
- провести енергетичне обстеження будівлі;
- розробити математичну модель для розрахунку питомого енергоспоживання та класу енергоефективності за національною методикою розрахунку;
- обчислити енергоспоживання з використанням спеціалізованих програмних продуктів з розробкою енергосертифікату;
- обґрунтувати заходи з підвищення енергоефективності для будівлі із визначенням енергетичного та економічного ефекту.

### Матеріал і результати досліджень

#### Огляд програмних продуктів для моделювання енергетичних характеристик будівель

Розглянемо можливості різного програмного забезпечення для моделювання енергетичних характеристик будівель.

1) Retscreen – це безкоштовна програма, розроблена урядом Канади, що використовується для оцінки енергетичної ефективності будівель, а також аналізу проектів енергопостачання на базі

традиційних і відновлюваних джерел енергії. Основою програми є Microsoft Excel з вбудованими макросами, які дозволяють після введення вхідних даних отримувати фінансову оцінку проектів. Програма не дозволяє створювати 3D моделі. Характеристики огорожень можна задавати як пошарово, так і за допомогою приведенного опору теплопередачі. Основні можливості програми: аналіз енергоспоживання будівель з використанням кліматичних даних NASA, розрахунок різних варіантів термомодернізації будівель із фінансовим аналізом. Недоліком використання даного програмного продукту є відсутність можливості проведення обчислень за національною методикою розрахунку [3] і створення енергетичного сертифікату відповідно до вимог законодавства [4, 5].

2) DesignBuilder - потужний інструмент для енергетичного моделювання будівель, заснований на платформі EnergyPlus. Програма дозволяє моделювати сценарії енергоспоживання будівлі, враховуючи режим експлуатації будівель, кліматичні параметри, характеристики огорожень, повітрообмін, періодичність опалення та охолодження, а також характеристики інженерних систем (наприклад, наявність рекуперації). Серед функцій програми: створення 3D моделі будівлі з зонуванням приміщень; моделювання інженерних систем будівлі; можливість деталізованого погодинного розрахунку, урахування впливу нетрадиційних і відновлювальних джерел на енергоспоживання в будівлі; можливість створювати звіти з розподілом енергоспоживання за ресурсами (наприклад, газ, електроенергія і централізоване тепlopостачання). Існують певні відмінності щодо розрахунків в даному програмному продукті, які потрібно враховувати (зокрема, площа для визначення питомих показників обирається за зовнішніми обмірами, а в Україні – за внутрішніми). Дана програма також не дозволяє визначати енергоспоживання за національною методикою [4], також немає можливості створити енергосертифікат будівлі.

3) Auditor OZC - програма, створена для розрахунків теплової потужності системи опалення за ДСТУ EN 12831-1 [11] та питомого енергоспоживання. Програма надає можливість створення 3D моделі будівлі з моделюванням енергетичних характеристик з урахуванням різних зон. Можлива інтеграція з іншими програмами через експорт даних (наприклад, розрахунок тепловтрат приміщень є вихідною інформацією для проєктування системи опалення будівель та вибору опалювальних приладів для окремих приміщень з бази обладнання). Характеристики шарів огорожень можна обирати з наявної довідкової бази, що відповідає також [12], або задавати вручну; є можливість врахування теплопровідних включень огорожувальних конструкцій.

4) E-Audit – програмний продукт [13], що є сучасним інструментом для проведення енергетичного аудиту будівель і розроблена спеціально для автоматизації процесу розрахунку показників енергетичної ефективності, враховуючи діючі нормативи та стандарти [3, 14, 15]. E-Audit дозволяє оцінити енергетичні потреби для опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання для базового сценарію та з урахуванням заходів з енергозбереження. Програма дозволяє вводити детальні характеристики будівлі, включаючи матеріали огорожувальних конструкцій, геометричні параметри, а також інформацію про кліматичні умови та режими експлуатації. На основі цих даних програма проводить розрахунок тепловтрат, визначає обсяги енергетичних потреб, енергоспоживання, первинної енергії та викидів CO<sub>2</sub> і формує звіт з детальним описом результатів [13]. E-Audit також має можливість генерувати енергетичні сертифікати, що значно спрощує процес сертифікації будівель [14,15]. Отримані результати можуть бути використані як для оцінки поточної енергоефективності будівлі, так і для планування заходів з її покращення. Використання програми дозволяє мінімізувати можливі людські помилки, які можуть виникати при ручних розрахунках, забезпечуючи високу точність отриманих даних. Програмний продукт розроблено Асоціацією енергоаудиторів і є безкоштовним, але для роботи потрібно ввести діючий сертифікат кваліфікованого енергетичного аудитора. Для будівлі можна створювати декілька сценаріїв роботи (по замовчуванню - базовий сценарій та після впровадження заходів). Таким чином, програмний продукт «E-Аудит» дозволяє виконувати розрахунки відповідно до діючої методики [3] і є перспективним інструментом для проведення енергетичних аудитів і створення енергосертифікатів, тому його і обрано для проведення моделювання в рамках даного дослідження.

#### **Послідовність проведення досліджень**

Дослідження виконувалося в декілька етапів: енергообстеження, в тому числі за допомогою приладового забезпечення, аналіз даних і аналітичні розрахунки, моделювання. Проведено розрахунки за розробленою моделлю в середовищі EXEL за національною методикою розрахунку енергоспоживання будівель. Розроблено пакет енергозберігаючих заходів. Створено модель в програмному продукті «E-Аудит» до та після впровадження заходів. Також для даної будівлі було проведено розрахунки оболонки в Auditor OZC та виконано розрахунки теплової потужності та енергопотреби на опалення (існуючий стан та після термомодернізації). Здійснено виконано порівняльний аналіз результатів моделювання.

#### **Енергетичне обстеження об'єкту досліджень**

Об'єктом дослідження є 9-ти поверховий житловий будинок, розташований в м. Буча, Київської області. Введений в експлуатацію у 2009 році, будинок відповідав тодішнім вимогам до житлових об'єктів, однак сучасні норми висувають додаткові вимоги щодо енергетичної ефективності, які наразі не виконуються. В будівлі до початку військової агресії рф проживало близько 1000 мешканців, на даний момент – близько

600 осіб. Об'єкт побудовано з П-подібною компоновкою в плані (див. рис.1) за індивідуальним проектом, з 5-ма парадними, даховою газовою котельнею і неопалювальним підвалом та «теплим» горищем. Початок та кінець опалювального сезону кожного року змінний, адже це питання вирішують мешканці на загальних зборах ОСББ. На балансі будівлі є власна ГПП та трансформаторна підстанція [7,8]. Зовнішні стіни будівлі із силікатної цегли, що утеплена плитами Rockwool товщиною 5 см. Вікна двокамерні, застелення балконів – однокамерне. На цокольній частині розташовані приямки із одинарним вікном. Характеристики будівлі наведено в табл. 1, характеристики системи опалення – в табл.2.



Рисунок 1 – Зовнішній вигляд основного фасаду будівлі (а) та план забудови (б) [7,8].

Таблиця 1 – Основні характеристики будівлі

Найменування	Показник
Загальна площа	22 687,2 м <sup>2</sup>
Опалювана площа	21 050,3 м <sup>2</sup>
Опалювальний об'єм	63 673,2 м <sup>3</sup>
Коефіцієнт скління фасаду	0,201
Показник компактності будівлі	0,24 м <sup>-1</sup>

Таблиця 2 – Характеристика трубопроводів системи опалення

Параметр	Значення
Тип системи опалення	Двотрубна, з супутнім рухом теплоносія
Температурний графік	90/70°C
Подавальні трубопроводи	Сталеві, утеплені, прокладені по горищу
Зворотні трубопроводи	Сталеві, утеплені, прокладені по підвалу
Трубопроводи в квартирах	Поліпропіленові, не утеплені
Наявність балансувальних кранів	Відсутнє

Енергетичне обстеження будівлі показало, що вона має типові проблеми для подібних об'єктів. За останній період повстало питання живлення будівлі (зокрема обладнання дахової котельні) в години масових відключень від електромережі. Обмежений доступ до ресурсів ускладнили життєдіяльність мешканців, це негативно вплинуло на загальний рівень комфорту і безпеки. Будівля має значний потенціал для впровадження заходів з енергозбереження. Мешканці будівлі, в якій створено ОСББ, є активними і позитивно налаштовані на те, щоб брати участь у різних програмах підтримки впровадження енергоефективних заходів. Поліпшення енергоефективності, ізоляції та впровадження автоматизованих систем контролю споживання енергії можуть суттєво знизити витрати на енергоресурси, покращити умови проживання та підвищити стійкість будівлі в умовах несприятливих зовнішніх факторів.

#### Розрахунки енергетичних характеристик будівлі до та після термомодернізації

Для визначення питомих показників енергоспоживання за методикою було сформовано розрахункову модель у програмному середовищі MS Excel. Для оцінки енергетичної ефективності будівлі і розробки енергетичних сертифікатів згідно до [4] використовується ДСТУ 9190:2022 [3] та методика [14]. Методика обчислень враховує: зовнішні кліматичні умови і умови внутрішнього мікроклімату, конструктивні особливості огорожень, умови експлуатації і охолодне аналіз тепловтрат через огорожувальні конструкції, вентиляцію, інфільтрацію повітря, теплові надходження від зовнішніх і внутрішніх джерел, додаткові витрати на попередній підігрів та охолодження; враховує характеристики інженерних системах та ефективність роботи генеруючого обладнання. Основні показники енергетичних

втрат будівлі визначаються на основі теплопередачі непрозорих (стіни, дах, підлога) та прозорих (вікна, балконні двері) огорожень.

Геометричні характеристики, розміри і параметри інженерних мереж, характеристики обладнання уточнювалися під час енергетичного обстеження, кліматичні параметри для здійснення розрахунків обиралися зі стандарту [2]. Узагальнені коефіцієнти теплопередачі трансмісією  $H_D$ ,  $H_U$  визначалися за вищенаведеною методикою, характеристики матеріалів обрано із [12].

Приведені опори теплопередачі існуючих огорожень, обчислені за методикою [12] не відповідають нормативним вимогам [1] і становлять:

- зовнішні стіни  $R_{\Sigma \text{прі}}=2,256$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт (склад стіни: цегла силікатна  $\lambda=0,87$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), мінеральна вата  $\lambda=0,055$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), гіпсокартон  $\lambda=0,21$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ )),

- горищне перекриття  $R_{\Sigma \text{прі}}=1,071$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт (склад конструкції: стяжка  $\lambda=0,93$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), залізобетон  $\lambda=2,04$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), керамзит ( $\lambda=0,19$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ )));

- перекриття над підвалом  $R_{\Sigma \text{прі}}=0,717$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт (залізобетон  $\lambda=2,04$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), керамзит  $\lambda=0,19$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), стяжка  $\lambda=0,93$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), плитка  $\lambda=0,51$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ));

- перекриття над проїздами  $R_{\Sigma \text{прі}}=2,883$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт (пінопласт  $\lambda=0,04$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), залізобетон  $\lambda=2,04$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), стяжка  $\lambda=0,93$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ ), плитка  $\lambda=0,51$  Вт/( $\text{м} \cdot \text{К}$ )).

Приведений опір теплопередачі вікон обчислено з урахуванням заскленої частини та частки обрамлення. Для основного типу вікон ця величина становить близько  $R_{\Sigma \text{прі}}=0,5$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт;

Опір теплопередачі вхідних дверей в парадні  $R_{\Sigma \text{прі}}=0,33$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт (тип дверей - метал утеплений, утеплювач тонкий); технічних дверей  $R_{\Sigma \text{прі}}=0,4$  ( $\text{м}^2 \cdot \text{К}$ )/Вт.

Режим експлуатації будівлі: графік опалення – 168 год/тиждень, графік охолодження – 112 год/тиждень; розрахункова внутрішня температура на опалення і охолодження складає відповідно 20оС та 26 оС. Кратність повітрообміну за рахунок інфільтрації для природної вентиляції  $n_{\text{інф}}=0,56$  год<sup>-1</sup> за [2] при висоті приміщень 2,7 м. Для кожного місяця обчислювалися значення енергопотреби для опалення та охолодження. В табл. 3 наведено значення питомого енергоспоживання та викидів CO<sub>2</sub> [8].

Питома енергопотреба на опалення та охолодження – 63,59 кВт·год/м<sup>2</sup>. Питоме енергоспоживання на потреби опалення та охолодження становить 98,08 кВт·год/м<sup>2</sup>, встановлені мінімальні вимоги при цьому – 85 кВт·год/м<sup>2</sup> [5]. Клас енергоефективності: Д [5,14].

Таблиця 3 – Розрахунки питомого енергоспоживання (за математичною моделлю) [8]

№	Найменування показника	Одиниця вимірювання	Значення показника
1	Питома енергопотреба на опалення, охолодження, гаряче водопостачання	кВт·год/м <sup>2</sup>	99,97
2	Питоме енергоспоживання опалення	кВт·год/м <sup>2</sup>	96,72
3	Питоме енергоспоживання охолодження	кВт·год/м <sup>2</sup>	1,36
4	Питоме енергоспоживання ГВП	кВт·год/м <sup>2</sup>	36,38
5	Питоме енергоспоживання освітлення	кВт·год/м <sup>2</sup>	9,75
7	Питоме споживання первинної енергії	кВт·год/м <sup>2</sup>	225,12
8	Питомі викиди парникових газів	кг/м <sup>2</sup>	41,2

Діаграма значень річного енергоспоживання існуючої будівлі наведена на рис. 2.

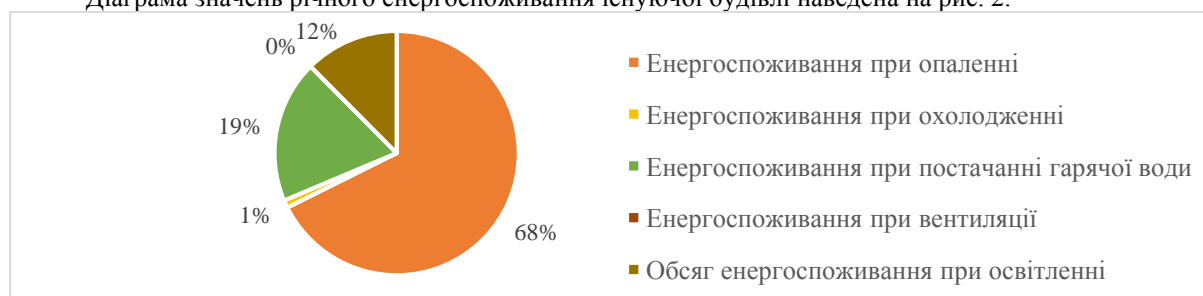


Рисунок 2 – Діаграма річного енергоспоживання існуючої будівлі

Пропозиції для підвищення енергоефективності будівлі:

1) Модернізація вхідних дверей та встановлення тамбурів

Заходи включають:

- заміну старих дверей під'їздів (5 одиниць по 2,7 м<sup>2</sup> кожна) на утеплені металеві двері з внутрішнім шаром ізоляції, наприклад, мінеральною ватою товщиною не менше 50 мм;
- встановлення 4 тамбурів з енергоефективними дверима;
- заміну внутрішніх дверей тамбурів.

Усі двері будуть оснащені доводчиками для покращення герметичності.

Мінімальний опір теплопередачі нових дверей має складати  $0,7 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  відповідно до [1].

2) Модернізація системи освітлення у місцях загального користування

У межах цього заходу планується заміна 288 існуючих світильників потужністю 8 Вт на кожному поверсі на енергоефективні світлодіодні світильники потужністю 12 Вт, обладнані датчиками руху з радіусом дії понад 8 метрів. Це забезпечить оптимальне освітлення і зменшить тривалість роботи освітлювальних приладів, що позитивно позначиться на споживанні електроенергії.

3) Утеплення фасадів і цоколя будівлі

Для досягнення цього стандарту пропонується утеплити фасади ( $4944 \text{ м}^2$ ) мінеральною ватою товщиною 120 мм з коефіцієнтом теплопровідності до  $0,041 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  і густиною  $120\text{--}160 \text{ кг}/\text{м}^3$ . Крім фасадів, планується також утеплити цоколь ( $329 \text{ м}^2$ ), що дозволить зменшити тепловтрати, підвищити міцність конструкції й продовжити її експлуатаційний термін. Для цоколю рекомендується використовувати плити з піноскла товщиною 100 мм із коефіцієнтом теплопровідності до  $0,052 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  та густиною  $120\text{--}150 \text{ кг}/\text{м}^3$ . При утепленні фасадів і заміні вікон необхідно передбачити також оформлення зовнішніх відкосів і оздоблення стін.

4) Заміна вікон у місцях загального користування

Передбачається заміна 85 існуючих вікон (загальна площа  $179,9 \text{ м}^2$ ) у місцях загального користування енергоефективними металопластиковими вікнами. Рекомендації до нових вікон: використання профілю з 5 або 6 камерами; двокамерні склопакети з м'яким енергозберігаючим покриттям; наповнення камер газами, такими як криптон (Kr) або аргон (Ar). Опір теплопередачі має бути не нижче  $0,9 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , відповідно до вимог [1].

5) Утеплення перекриття над неопалюваним підвалом

Передбачається утеплення  $2131 \text{ м}^2$  стелі підвального приміщення мінватою густиною  $140 \text{ кг}/\text{м}^3$  і товщиною 160 мм. Коефіцієнт теплопровідності матеріалу  $0,037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  в умовах експлуатації Б. Опір теплопередачі має бути не менше  $5 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$ , відповідно до вимог [1]. Для забезпечення відповідності нормам необхідно використовувати плити, які відповідають ДСТУ Б В.2.7-167:2008 і мають відповідні сертифікати та санітарні висновки.

6) Утеплення горищного перекриття

Передбачено утеплення  $2210 \text{ м}^2$  горищного перекриття мінеральною ватою товщиною 180 мм з густиною не менше  $45 \text{ кг}/\text{м}^3$  та теплопровідністю до  $0,037 \text{ Вт}/(\text{м} \cdot \text{К})$  для досягнення нормативного опору теплопередачі не менше  $6 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$  відповідно до [1]. Мінераловатні плити слід укладати на очищену поверхню перекриття. Для захисту утеплювача від вологи потрібно встановити шар пароізоляції з внутрішнього боку та гідроізоляційний шар із зовнішнього боку для захисту від атмосферних опадів. Перед початком робіт необхідно провести технічне обстеження стану гідроізоляції покрівлі над горищем/

7) Гідравлічне балансування системи опалення

Планується встановлення автоматичних балансувальних клапанів, які регулюють перепад тиску в системі. Зокрема, передбачено використання клапанів Danfoss ASV-P на зворотному трубопроводі разом із запірним клапаном ASV-M на подаючому трубопроводі. Ці клапани стабілізують перепад тиску в системах зі змінною витратою теплоносія, що допоможе досягти рівномірного розподілу тепла. Передбачається встановлення автоматичних регуляторів перепаду тиску на 76 стояків системи опалення.

8) Встановлення терморегуляторів на радіатори та розподільвачів теплової енергії

Для ефективного впровадження заходу потрібно попередньо виконати гідравлічне балансування системи опалення для рівномірного розподілу теплоносія. Передбачено встановлення 679 розподільвачів тепла, термостатичних клапанів і радіаторних терморегуляторів у будівлі. Термостатичні клапани та регулятори на радіаторах дозволяють підтримувати оптимальний температурний режим і уникати перегріву приміщень.

9) Встановлення сонячних панелей на дах будівлі

В рамках реалізації заходу пропонується встановити сонячну електростанцію (СЕС), сумарною потужністю 20 кВт. Основне обладнання:

- фотоелектричні панелі для генерації електроенергії (30 од. по 630 Вт);
- гібридні інвертори для перетворення електроенергії (2 од. по 10 кВт);
- акумуляторні батареї для накопичення електроенергії (сумарна ємність 20 кВт·год);
- двосторонній лічильник для обліку спожитої та відданої до мережі електроенергії;
- система захисту СЕС.

Даний захід допоможе частково або повністю (в залежності від погодних умов) покривати електроспоживання на потреби освітлення місць загального користування, циркуляційних насосів систем опалення та холодного водопостачання. В періоди відключень електроживлення даний захід дозволить отримувати енергію для роботи автономної котельні (в холодний період року).

В таблиці 4 наведено техніко-економічні показники запропонованих заходів.

Таблиця 4 – Заходи з підвищення енергоефективності

№	Найменування заходу	Інвестиції, грн	Економія енергії: кВт·год/рік	Чиста економія, грн/рік
1	Модернізація входних дверей та встановлення тамбурів	359000	5592	5660
2	Модернізація системи освітлення у місцях загального користування	318200	17660	76290
3	Утеплення фасаду та цоколя будівлі	17563000	128671	130232
4	Заміна вікон у місцях загального користування	1663200	30271	30638
5	Утеплення перекриття над неопалювальним підвалом	6393000	100986	102210
6	Утеплення горищного перекриття	6434000	152318	154166
7	Гідравлічне балансування системи опалення	1280000	21049	21304
8	Встановлення терморегуляторів на радіатори та розподільвачів теплової енергії	4414000	127917	129470
9	Встановлення сонячних панелей на дах будівлі	1102300	21117	91225

Для розрахунку кількості згенерованої енергії від СЕС на плоскому даху будівлі використано онлайн калькулятор [16]. Точну вартість заходів можна буде визначити після підготовки проектно-кошторисної документації та проходження експертизи.

**Моделювання енергоспоживання будівлі в програмному продукті E-Аудит**

Програма E-Audit дозволяє виконати розрахунки показників енергетичної ефективності будівлі з урахуванням діючої методики [3].

Послідовність виконання розрахунків наведено на рис.3 [10].



Рисунок 3 – Послідовність роботи в програмному продукті E-Аудит

Відхилення показників, отриманих шляхом розрахунків в MS Excel та за допомогою E-audit становить по окремим складовим енергоспоживання в межах до 3-10% (див. таблицю 5).

Таблиця 5 – Аналіз відхилень у результатах розрахунків (існуюча будівля) [10]

№	Показник	Розрахунок		Відхилення, %
		Excel	E-Audit	
1	Питоме енергоспоживання опалення кВт·год/м <sup>2</sup>	96,72	95,17	2,8
2	Питоме енергоспоживання гарячого водопостачання	36,38	32,7	10,1
3	Обсяг енергоспоживання при освітленні, кВт×год/м <sup>2</sup>	9,75	10,7	9,9
4	Питомі викиди парникових газів, кг/м <sup>2</sup>	41,2	35	5

В таблиці 6 наведено результати моделювання показників енергоспоживання будівлі до та після впровадження рекомендованих заходів у програмному продукті E-Аудит [8].

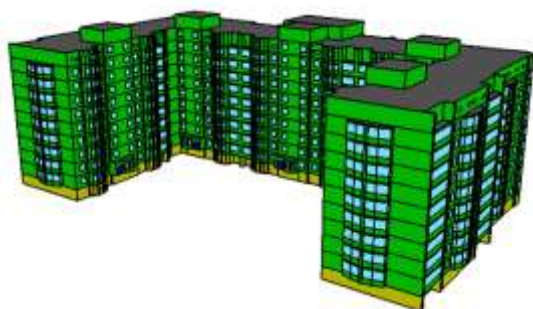
Таблиця 6 – Аналіз показників енергоспоживання будівлі до та після заходів (E-Аудит)

Вид енергоспоживання	Обсяг енергоспоживання за рік			
	до впровадження заходів		після впровадження заходів	
	тис. кВт · год	кВт · год/м <sup>2</sup>	тис. кВт · год	кВт · год/м <sup>2</sup>
на опалення	2003	95,17	1027	48,78
на охолодження	30	1,43	61	2,89

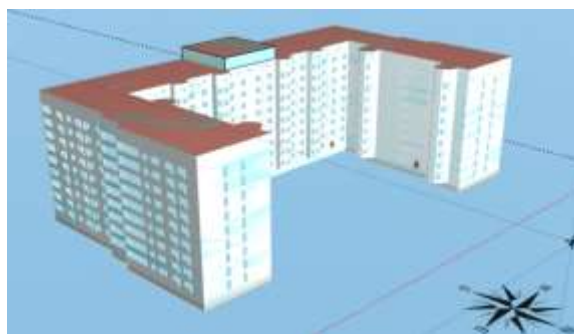
Після впровадження заходів з енергозбереження будівля значно зменшила своє енергоспоживання, особливо в частині опалення. Хоча споживання енергії на охолодження зросло, загальний показник енергоспоживання значно знизився, що свідчить про суттєве підвищення енергоефективності будівлі. Таким чином, з використанням інженерних методик розрахунку та моделювання виконано аналіз показників енергоефективності будівлі до та після впровадження комплексу заходів.

#### Порівняння результатів моделювання енергоспоживання за допомогою спеціалізованих програм

Для даної будівлі було проведено не тільки енергетичне обстеження з використанням інструментальних вимірів окремих параметрів, але й виконувалося також моделювання у спеціалізованих програмних продуктах DesignBuilder, Audytor OZC [17–18]. За допомогою програмного забезпечення побудовано 3D моделі і виконано прикладні дослідження енергетичних характеристик з розробкою пропозицій для термомодернізації існуючої житлової будівлі. Нижче на рис. 4 показано зовнішній вигляд побудованих моделей. Динамічне моделювання енергоспоживання проводиться із урахуванням теплофізичних властивостей внутрішніх і зовнішніх огорожень, умов експлуатації, інженерних мереж, внутрішніх теплових надходжень, надходжень теплоти від сонячної інсоляції, повітрообміну, інерційних властивостей, погодних умов, характеристик інженерних мереж та ефективності роботи джерела енергії.



а – розроблена 3D модель в DesignBuilder



б – розроблена 3D модель в Audytor OZC

Рисунок 4 – Моделювання енергетичних характеристик в спеціалізованих програмних продуктах

У графічному інтерфейсі DesignBuilder створюється геометрія будівлі із виконанням зонування приміщень, а програмний продукт EnergyPlus використовувався в дослідженнях енергетичних характеристик будівлі. Під час виконання моделювання створюється три моделі будівлі:

- actual – відображає реальні конструктивні і теплотехнічні характеристики огорожень, інженерних мереж, температурні умови та повітрообмін;
- baseline – умови комфортності, повітрообміну доведені до нормативних показників;
- proposed – теплотехнічні характеристики відповідають сучасним вимогам.

Під час моделювання у розділі «HVAC system» обирається тип системи опалення, вентиляції та гарячого водопостачання з прийнятими параметрами теплоносія. В результаті енергетичного моделювання програмний продукт дозволяє визначити: витрати палива, теплові навантаження; графіки температури, швидкості і тиску повітря, надходження від сонця; умови мікроклімату.

Порівняльний аналіз результатів моделювання в програмному продукті E-audit та за допомогою EnergyPlus для даної будівлі показав, що споживання теплової енергії на потреби опалення відрізняється незначно (відповідно 2003 тис. кВт-год та 2084 тис.кВт-год), тобто відхилення результатів становить до 5%. Результати порівняння по електричній енергії показало, що відхилення становить до 10%.

Програмний продукт Audytor OZC рахує не тільки енергоспоживання за різними складовими із визначенням класу енергоефективності за діючою методикою розрахунку, але надає можливість також визначити також теплову потужність системи за діючим стандартом ДСТУ EN 12831-1 [11], результати розрахунку від проектних даних відрізняються в межах 10%. Отримані дані: проектне теплове навантаження будівлі - 1,152 МВт, визначене за допомогою програмного продукту теплове навантаження існуючої будівлі – 1,043 МВт. В результаті моделювання визначено, що у разі впровадження заходів із підвищення теплового захисту огорожень теплове навантаження становитиме 0,723 МВт. Результати порівняння енергоспоживання на потреби опалення в E-audit та Audytor OZC для даної будівлі відрізняються приблизно на 7%.

Таким чином, існують різні підходи аналізу енергоспоживання, зокрема із застосуванням розрахункових інженерних методик та спеціалізованих програмних продуктів. Порівняльний аналіз на прикладі існуючої багатоквартирної будівлі показав, що відхилення в результатах може бути в межах, допустимих для інженерних розрахунків. Натомість використання безкоштовного програмного забезпечення E-audit, яке надає енергоаудиторам Асоціація енергоаудиторів України, дозволяє автоматизувати розрахунки і значно спростити фахівцям задачу пошуку технічних рішень щодо підвищення енергетичної ефективності будівель, виконання техніко-економічних розрахунків і створення енергетичних сертифікатів.

**Висновки:** вивчено можливості спеціалізованих програмних продуктів, що використовуються для моделювання енергетичних характеристик. Виконано деталізоване енергетичне обстеження житлової будівлі та моделювання енергоспоживання за допомогою розробленої моделі в Excel та спеціалізованого програмного продукту E-audit з виконанням порівняльного аналізу. У програмі E-audit було проведено два сценарії обчислень для визначення енергоефективності будівлі: один до проведення енергоефективних заходів, а інший — після їх впровадження. Розрахунки у програмі E-audit показали зменшення споживання енергії після впровадження заходів з підвищення теплотехнічних характеристик огорожень і модернізації інженерних мереж. Це зниження енергоспоживання дозволяє отримати конкретні економічні вигоди для власників будівель, оскільки знижуються витрати на опалення і енергоресурси.

#### **Список використаної літератури**

1. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
2. ДБН В.2.5-67:2013 Опалення, вентиляція, кондиціонування.
3. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
4. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України № 2118-VIII, ред. від 15.11.2024. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
5. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 27.10.2020. №260. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
6. Дешко В.І., Білоус І.Ю. Математичні моделі будівель для оцінки енергоспоживання. Будівельні конструкції: Міжвідомчий науково-технічний збірник наукових праць. 2014. № 80. С. 68 – 72.
7. Шовкалюк М.М., Рабенко С.О. Енергетичне обстеження житлової багатоквартирної будівлі з розробкою енергетичного сертифікату // Збірник наук. праць VII науково-технічної конференції магістрантів імені професора В.М. Винославського, [20 – 22 листопада 2024 р.], с. 41-44.
8. Рабенко С.О., Шовкалюк М.М., Моделювання показників енергоспоживання багатоквартирної будівлі з використанням спеціалізованих програмних продуктів // Збірник наук. праць X Міжнародної конференції «Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку – PEMS'24», [Київ, 26-27 листопада 2024 р.], с.170-172.
9. Шовкалюк М.М., Рабенко С.О. Розробка концепції використання цифрових технологій для підвищення енергоефективності будівельного фонду // Збірник наук. праць II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції «Progressive opportunities and solutions of advanced society», [м. Дніпро, 7 – 8 листопада 2024 р.], с. 285-286.



10. Рабенко Є.О. Моделювання енергоспоживання житлової багатоквартирної будівлі з урахуванням особливостей різних програмних комплексів / Магістерська дисертація за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2024 – 147с.
11. ДСТУ EN 12831-1:2017 Енергоефективність будівель. Метод розрахунку проектного теплового навантаження. Частина 1. Теплове навантаження, Модуль М3-3 (EN 12831-1:2017, IDT).
12. ДСТУ 9191:2022 Методи вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. К., ДП «УкрНДНЦ», 2022, 63 с.
13. Програма для енергетичної сертифікації E-Audit. Режим доступу: <https://e-audit.escoua.com/user/sign-in?next=/home/>
14. 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.
15. Про затвердження Порядку проведення сертифікації енергетичної ефективності та форми енергетичного сертифіката: Наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 р. № 172. Офіційний вісник України. 2018, № 55. С. 334.
16. Онлайн калькулятор вироблення електричної енергії СЕС Photovoltaic geographical information system. Режим доступу: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/).
17. Шовкалюк М. М., Пахунова К. Ю., Шевченко О. М. Аналіз енергетичних характеристик житлової багатоквартирної будівлі із урахуванням соціально-експлуатаційних факторів. Технології та інжиніринг, № 6 (11), 2022 с. 52-62.
18. Шовкалюк Ю.В., Шовкалюк М.М. Поглиблений енергоаудит житлового багатоквартирного будинку з урахуванням впливу соціальних та експлуатаційних факторів / Молодий вчений №2 (78), 2020. с. 200-206.

**M. Shovkaliuk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

**Y. Rabenko**<sup>1</sup>, Master student, ORCID 0009-0005-9483-9628

**O. Yatsenko**<sup>1</sup>, Ph.D., ORCID 0000-0002-8001-5987

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## **MODELING OF ENERGY CONSUMPTION INDICATORS OF AN APARTMENT BUILDING USING SPECIALIZED SOFTWARE PRODUCTS**

*Increasing the energy efficiency of the building stock is a strategic task for Ukraine, and to attract funding for comprehensive thermal modernization projects, it is necessary to conduct an energy audit and draw up an energy certificate for residential and multi-apartment buildings. Energy auditors in Ukraine usually develop their own models for calculations, but there are software products that allow modeling the energy consumption of buildings taking into account the features of operation, characteristics of enclosures and engineering systems. Studying their capabilities and comparative analysis is a relevant task. The use of software products by energy auditors helps automate energy consumption calculations before and after the implementation of energy saving measures, develop an energy certificate, and accelerate the implementation of complex thermal modernization projects.*

*The purpose of the work is to review the capabilities of software products for calculating specific energy consumption for various needs and energy efficiency classes, as well as developing an energy certificate with a comparative analysis using the example of a residential multi-apartment building. Research methods: analytical methods, comparative and structural analysis method, feasibility studies using E-Audit, Audytor OZC, MS Excel, etc. In accordance with the purpose of the work, the following tasks were set:*

- to study the capabilities of software products for modeling energy characteristics;
- to conduct an energy survey of the building;
- to develop a mathematical model for calculating specific energy consumption and energy efficiency class according to the national calculation methodology;
- to calculate energy consumption using specialized software products with the development of an energy certificate;
- to justify measures to increase energy efficiency for the building with the determination of energy and economic effects.

**Keywords:** apartment buildings, energy consumption modeling, energy efficiency, thermal modernization.

**References**

1. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
2. DBN V.2.5-67:2013 Heating, ventilation, air conditioning.
3. DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
4. On the Energy Efficiency of Buildings: Law of Ukraine No.2118-VIII. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
5. On approval of the Minimum requirements for the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 10/27/2020. No. 260. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20>.
6. Deshko V.I., Bilous I.Yu. Mathematical models of buildings for assessing energy consumption. Building structures: Interdepartmental scientific and technical collection of scientific works. 2014. No. 80. P. 68 – 72.
7. Shovkaliuk M.M., Rabenko E.O. Energy inspection of a residential multi-apartment building with the development of an energy certificate // Collection of scientific works of the VII scientific and technical conference of master's students named after Professor V.M. Vynoslavsky, [November 20 – 22, 2024], p. 41-44.
8. Rabenko E.O., Shovkaliuk M.M., Modeling of energy consumption indicators of an apartment building using specialized software products // Collection of scientific papers of the 10th International Conference “Energy Management: State and Development Prospects – PEMS’24”, [Kyiv, November 26-27, 2024], pp. 170-172.
9. Shovkaliuk M.M., Rabenko E.O. Development of a concept for using digital technologies to increase the energy efficiency of the building stock // Collection of scientific papers of the 2nd International Scientific and Practical Internet Conference “Progressive opportunities and solutions of advanced society”, [Dnipro, November 7-8, 2024], pp. 285-286.
10. Rabenko E.O. Modeling energy consumption of a residential apartment building taking into account the features of various software complexes / Master's thesis in speciality 141 Electrical power engineering, electrical engineering and electromechanics – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024 – 147p.
11. DSTU EN 12831-1:2017 Energy efficiency of buildings. Method for calculating the design heat load. Part 1. Heat load, Module M3-3 (EN 12831-1:2017, IDT).
12. DSTU 9191:2022 Methods for selecting thermal insulation material for building insulation. Kyiv, 2022, 63 p.
13. Program for energy certification E-Audit. Access mode: <https://e-audit.escoua.com/user/sign-in?next=/home/>
14. On approval of the Methodology for determining the energy efficiency of buildings: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 No. 169. Official Gazette of Ukraine. 2018, No. 55. P. 301.
15. On approval of the Procedure for conducting energy efficiency certification and the form of an energy certificate: Order of the Ministry of Regional Development, Construction and Housing and Communal Services of Ukraine dated 11.07.2018 No. 172. Official Gazette of Ukraine. 2018, No. 55. P. 334.
16. Online calculator for generating electricity from a photovoltaic power plant Photovoltaic geographical information system. Access mode: [https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg\\_tools/en/](https://re.jrc.ec.europa.eu/pvg_tools/en/).
17. Shovkaliuk M. M., Pakhunova K. Yu., Shevchenko O. M. Analysis of energy characteristics of a residential apartment building taking into account social and operational factors. Technologies and Engineering, No. 6 (11), 2022 p. 52-62.
18. Shovkaliuk Yu. V., Shovkaliuk M. M. In-depth energy audit of a residential apartment building taking into account the influence of social and operational factors / Young Scientist No. 2 (78), 2020. p. 200-206.

Надійшла: 28.01.2025  
Received: 28.01.2025

## GAR-АНАЛІЗ ПРОЦЕСІВ СТРАТЕГІЧНОГО ПЛАНУВАННЯ ЕНЕРГОМОНІТОРИНГУ НА МУНІЦИПАЛЬНИХ ОБ'ЄКТАХ

*Надійне управління енерговикористанням в системах енергетичного менеджменту має базуватися на точних, повних, достовірних та актуальних даних про енергоспоживання та викиди парникових газів, які надаються системами енергомоніторингу. Помилки під час впровадження та застосування систем енергомоніторингу призведуть до неефективного управління енерговикористанням і не дозволять досягти заявлених цілей. У статті наведено результати гар-аналізу регуляторного забезпечення, що впливають на ефективність впровадження і довготермінового застосування систем енергомоніторингу в муніципалітетах та запропоновано заходи для подолання розривів. Результати гар-аналізу ілюструють ключові прогалини між чинними регуляторними нормами і цілями впровадження систем енергомоніторингу. Стаття містить рекомендації щодо вдосконалення нормативно-правової бази з метою підтримки енергоефективності та сталого розвитку громад. Завдяки системному підходу стаття може бути корисною для науковців і фахівців, заінтересованих у розвитку сталих енергетичних практик на місцевому рівні, та слугує основою для подальших досліджень у цій сфері.*

**Ключові слова:** енергоефективність, енергетичний менеджмент, енергомоніторинг, СЕнМ, система енергомоніторингу, гар-аналіз.

**Актуальність** досліджень регуляторного базису для створення та продуктивного застосування систем енергомоніторингу в рамках впровадження систем енергетичного менеджменту (СЕнМ) в муніципалітетах зумовлена зростаючими викликами у сфері екологічно безпечного природокористування. У сучасному світі, де запобігання змінам клімату та енергетична безпека стають вкрай нагальними питаннями, завдання ефективного моніторингу та управління енерговикористанням на місцевому рівні набувають надзвичайного значення [1]. Муніципалітети відіграють ключову роль у реалізації національних стратегій з енергоефективності і сталого розвитку, адже саме на місцях втілюються практичні рішення, які можуть суттєво вплинути на загальну енергетичну політику держави.

Гар-аналіз дозволяє виявити прогалини в існуючих регуляторних механізмах, що обмежують продуктивність енергомоніторингу, і запропонувати рішення для подолання розривів. Окрім того, впровадження систем енергомоніторингу сприяє не лише зменшенню витрат на енергію, а й підвищенню конкурентоспроможності муніципалітетів, покращенню якості життя громадян та захисту довкілля. В умовах обмежених ресурсів та неухильного зростання вимог до підвищення рівня енергетичної ефективності актуальність таких досліджень стає дедалі важливішою, оскільки вони можуть стати основою для стратегічних рішень і політик, які забезпечать сталий розвиток громад [2].

**Головною метою** досліджень є гар-аналіз процесів формування і розвитку регуляторного базису для стратегічного планування, впровадження та довготермінового застосування систем енергомоніторингу в муніципалітетах з метою виявлення прогалин та розробки рекомендацій для покращення результативності таких систем, що має збільшити продуктивність СЕнМ і сприятиме підвищенню рівня енергетичної ефективності та сталому розвитку громад.

**Результати дослідження та їх обговорення.** Гар-аналізу в сфері енергетичного менеджменту присвячено чимало досліджень. Наприклад, в [3, 4] досліджуються розриви між заявленими в сертифікатах енергетичної ефективності показниками і дійсними рівнями енергоспоживання будівель. В [5] запропоновано інноваційну модель на основі машинного навчання з метою попередження розривів між заявленими і дійсними значеннями енергетичних показників. Проте, розпочинати варто з вивчення саме регуляторного базису, як основи для результативного впровадження і довготермінового продуктивного застосування СЕнМ і систем енергомоніторингу зокрема, оскільки помилки на стадіях стратегічного планування і реалізації призведуть до неефективного управління енерговикористанням і не дозволять досягти заявлених цілей. У контексті регуляторного базису для впровадження та застосування систем енергомоніторингу в муніципалітетах гар-аналіз відіграє ключову роль у виявленні та оцінці прогалин і стратегічних розривів між заявленими цілями і чинними регуляторними нормами та вимогами, що суттєво обмежує результативність впровадження таких систем та їхнього продуктивного застосування в подальшому. Результати гар-аналізу, які вказують на найвагомійші розриви між чинним регуляторним середовищем та оптимальними вимогами для ефективного впровадження систем енергомоніторингу в муніципалітетах, зведено у табл. Результати гар-аналізу містять, зокрема, оцінку положень чинних

законодавчих і регуляторних актів, а також рекомендації щодо поліпшення нормативно-правової бази задля підвищення рівня енергоефективності та сталого розвитку громад.

З точки зору енергомоніторингу муніципальні об'єкти можна поділити на адміністративні будівлі (громадські та урядові будівлі, будівлі органів державної влади і місцевого самоврядування, будівлі органів прокуратури та правопорядку, суди, центри надання адміністративних та інших послуг тощо), заклади освіти (заклади дошкільної освіти, школи і ліцеї, заклади професійно-технічної освіти і коледжі, вищі навчальні заклади), медичні установи (амбулаторії, лікарні, медичні центри тощо), культурні та спортивні об'єкти (театри, концертні зали, спортклуби, стадіони тощо), промислові об'єкти (електричні станції, теплоелектроцентралі, заводи, фабрики та інші виробничі потужності, які знаходяться в муніципальній власності), житловий сектор (житлові будинки та житлові комплекси, готелі, апартаменти тощо) і комунальні установи (громадський транспорт, вуличне освітлення, теплові мережі, водоканали тощо). Усі ці об'єкти потребують постійного енергомоніторингу з метою виявлення і своєчасного усунення нераціональних витрат енергії та забезпечення ефективного енерговикористання.

Разом з тим, впровадження і продуктивне застосування СЕНМ, зокрема, реалізація енергомоніторингу на муніципальних об'єктах унормовано законодавчими і регуляторними рамками. Серед іншого це відсутність належного нормативно-правового забезпечення, наприклад, відсутність в штатному розкладі муніципалітету посади енергоменеджера або низький рівень фінансування, зарегульовані процедури закупівель тощо. Якщо в короткостроковій перспективі ці прогалини можна частково подолати прийняттям оперативних рішень, наприклад, поклавши обов'язки енергоменеджера на іншого фахівця муніципалітету, то в довготерміновій перспективі такі розриви на законодавчому та регуляторному рівні ускладнюють процеси стратегічного планування і не дозволяють досягти цільових результатів.

З метою виявлення і подолання розривів між чинними нормативно-правовими рамками і заявленими стратегічними цілями застосовують гар-аналіз. В практичному аспекті результати гар-аналізу дозволяє муніципалітетам чітко зрозуміти, які дії потрібно вжити для покращення продуктивності енергомоніторингу, спираючись на ідентифіковані різниці між поточним станом і оптимальними вимогами. Це також слугує основою для розробки стратегій і дійових планів для досягнення заявлених цілей у сфері енергоефективності і сталого розвитку громад.

Таблиця. Результати гар-аналізу впровадження систем енергомоніторингу в муніципалітетах

Поточний стан	Очікуваний стан	Прогалини	Подолання
Відсутність у штатному розкладі муніципалітету посади енергоменеджера*	Введення у штатний розклад муніципалітету посади енергоменеджера	Недостатня обізнаність працівників щодо особливостей функціонування СЕНМ в установах бюджетної сфери, розподіл завдань серед інших обов'язків та недостатній контроль з боку керівництва над управлінням енергоресурсами	Введення у штатний розклад муніципалітету посади енергоменеджера з відповідними повноваженнями, комплексне навчання співробітників, систематичний енергомоніторинг та звітність про використання енергоресурсів
Плинність персоналу, на якого покладено обов'язки енергоменеджера	Стабільність та досвідчений персонал на посаді енергоменеджера	Недостатня стабільність у зайнятості особи, на яку покладено обов'язки енергоменеджера, може призвести до втрати навичок та знань у цій сфері, а також до порушення неперервності управління енерговикористанням	Проведення досліджень щодо необхідної кількості та рівня підготовки фахівців з енергетичного менеджменту та підготовка пропозицій щодо внесення змін до обсягів державного замовлення та контрактної форми здобуття освіти. Розробка програм стимулювання, навчання та розвитку персоналу, поліпшення умов праці та створення перспектив для кар'єрного зростання фахівців з енергетичного менеджменту

Поточний стан	Очікуваний стан	Прогалини	Подолання
Низька заробітна платня осіб, на яких покладено обов'язки енергоменеджера, та відсутність мотивації	Підвищення заробітної плати для енергоменеджерів та посилення мотивації	Низькі заробітні плати можуть призвести до недостатньої мотивації працівників, зменшення їхнього інтересу до роботи та недосягнення поставлених цілей	Проведення аналізу ринкових стандартів та заробітної платні для енергоменеджерів, впровадження програм стимулювання та посилення мотивації працівників, обговорення можливостей підвищення заробітної плати та посилення мотивування фахівців з енергетичного менеджменту з керівництвом органу місцевого самоврядування
Відсутність відповідної кваліфікації у енергоменеджера громади	Наявність кваліфікованого та компетентного енергоменеджера у громаді	Недостатність необхідних знань та навичок у кандидатів на посаду енергоменеджера може призвести до неефективного управління енергоресурсами та втрати можливостей щодо реалізації енергоефективних заходів та підвищення рівня енергетичної ефективності	Забезпечення проведення навчання та підвищення кваліфікації працівників через курси підвищення кваліфікації, тренінги, семінари, міжнародні проєкти та інші форми професійного розвитку. Розгляд можливості найму фахового персоналу з необхідною кваліфікацією. Забезпечення розроблення і впровадження сучасних програм, методик підготовки, перепідготовки, підвищення кваліфікації фахівців
У посадовій інструкції фахівця, на якого покладено обов'язки енергоменеджера громади, не визначено чітких функцій щодо координування роботи із запровадження та функціонування СЕнМ	Визначення чітких функцій та обов'язків для енергоменеджера громади, які охоплюють координування роботи із запровадження та функціонування СЕнМ, збирання і узагальнення інформації про стан використання енергоресурсів об'єктами бюджетної сфери	Відсутність чітких функцій може призвести до незрозуміння ролі енергоменеджера, дублювання обов'язків та неефективного використання його потенціалу	Визначення конкретних функцій та обов'язків енергоменеджера. Розробка документів як то посадові інструкції та робочі програми для чіткого визначення ролі та відповідальності енергоменеджера
Недостатній обсяг робочого часу на виконання обов'язків енергоменеджера	Визначення на науковій основі достатнього робочого часу для виконання всіх обов'язків, пов'язаних з енергетичним менеджментом (зокрема, через проведення хронометражу робочого часу)	Недостатній обсяг робочого часу може обмежувати можливість ефективного виконання обов'язків енергоменеджера, зокрема, аналіз даних, розробку та впровадження стратегій енергоефективності та координацію проєктів	Оптимізація робочих процесів та призначення пріоритетних завдань для максимізації ефективності використання робочого часу

Поточний стан	Очікуваний стан	Прогалини	Подолання
Небажання осіб, відповідальних за збір інформації про споживання енергоресурсів бюджетної установи (енергоменеджер установи) чомно виконувати свої обов'язки	Достовірне та своєчасне надання інформації про споживання енергоресурсів для продуктивного енергоменеджменту	Небажання виконувати обов'язки може призвести до недостовірності або неповноти даних, ускладнення аналізу споживання енергії ввірених об'єктів для визначення енерговитрат та управління енергетичними ресурсами, а також може спричинити затримки у реагуванні на проблеми, що виникають	Прийняття розпоряджень в установах з покладання обов'язків, внесення функціональних обов'язків з енергомоніторингу у посадовій інструкції осіб, відповідальних за формування інформації про споживання енергоресурсів бюджетної установи (енергомоніторинг) Запровадження мотивації енергоменеджерів бюджетних установ за достовірне та своєчасне внесення інформації про споживання енергоресурсів до системи енергомоніторингу
Відсутність заінтересованості персоналу, що відповідають за енергомоніторинг	Активна заінтересованість та залучення персоналу до процесу енергомоніторингу у та енергоефективних заходів	Відсутність заінтересованості може призвести до недостатньої уваги до енергоефективних заходів, недооцінки важливості енергомоніторингу та втрати можливостей для зменшення споживання енергії та витрат	Проведення навчання та інформаційних компаній щодо важливості енергомоніторингу та його впливу на роботу будівель. Запровадження програми обміну досвідом за участю відповідальних за впровадження систем енергетичного менеджменту. Встановлення системи мотивації та стимулювання для персоналу, яка сприяє активній участі у програмах енергоефективності
Відсутність програмного продукту для реалізації енергомоніторингу	Наявність функціонального та ефективного програмного продукту для реалізації енергомоніторингу	Відсутність програмного продукту ускладнює здійснення енергомоніторингу, аналіз даних про споживання енергії та прийняття управлінських рішень щодо підвищення рівня енергетичної ефективності	Пошук наявних програмних продуктів на ринку, розробка власного програмного продукту або замовлення його у спеціалізованих компаній
Наявність помилок у програмному забезпеченні системи енергомоніторингу	Вдосконалення програмного забезпечення для ефективного та надійного енергомоніторингу	Полягає в недоліках чи недосконалостях програмного забезпечення системи енергомоніторингу, що ускладнюють її ефективне функціонування та можуть призвести до неповноцінного аналізу даних, неадекватних рішень та втрати можливостей для оптимізації енерговикористання	Покращення функціональності та надійності програмного забезпечення, що дозволить більш ефективно використовувати дані енергомоніторингу для прийняття управлінських рішень та підвищення рівня енергетичної ефективності

Поточний стан	Очікуваний стан	Прогалини	Подолання
Втрата даних після звільнення енергоменеджера	Збереження та доступ до важливих даних енергомоніторинг у після звільнення фахівця	Втрата даних може призвести до втрати історичних даних, ускладнити аналіз та моніторинг енергоспоживання, а також призвести до втрати цінної інформації для прийняття стратегічних рішень	Розробка та впровадження системи резервного копіювання даних, розробка документації та передача знань новому персоналу, а також регулярне навчання та підвищення кваліфікації персоналу щодо збереження та управління даними
Керівництво не бачить результатів роботи енергоменеджера	Забезпечення звітності та візуалізації результатів роботи енергоменеджера для керівництва	Відсутність зрозумілої та доступної звітності може призвести до недооцінки значення роботи енергоменеджера та недоречного прийняття рішень	Розробка звітів з ключовими показниками ефективності, проведення регулярних презентацій результатів перед керівництвом, залучення керівництва до процесу встановлення цілей та методів успішності
Зміна керівника громади і відсутність бажання продовжувати діяльність з енергоменеджменту	Забезпечення сталості та спадковості у діяльності з енергоменеджменту незалежно від змін у керівництві громади	Відмова нового керівництва від попередніх ініціатив у сфері енергоменеджменту та/або змінення пріоритетів може призвести до зупинки або відміни важливих проєктів, втрати прогресу та інвестицій у підвищення рівня енергетичної ефективності	Розробка та впровадження довгострокових планів дій у сфері енергоменеджменту, які будуть надійно захищати інтереси громади незалежно від політичних змін. Проведення ефективного комунікаційного процесу з керівництвом громади для пояснення переваг енергоефективних заходів та розуміння їх важливості для громади. Укладання договорів або меморандумів з новим керівництвом для забезпечення неперервності реалізації проєктів з підвищення рівня енергетичної ефективності
Надходження звітної інформації до органу влади, який реалізує державну політику у сфері енергетики з низьким рівнем достовірності	Підвищення рівня достовірності та якості звітної інформації, що надходить до органу влади який реалізує державну політику у сфері енергетики	Інформація з низьким рівнем достовірності може викривлювати реальну картину енергоспоживання країни, ускладнювати аналіз та прийняття ефективних рішень з підвищення рівня енергетичної ефективності	Вдосконалення процесів перевірки та підтвердження достовірності звітної інформації. Надання додаткової підтримки та навчання для організацій, які надають звітну інформацію, з метою поліпшення їхніх здібностей та процесів збору даних

\* Відповідно до Постанови Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2021 року № 1460 “Про впровадження систем енергетичного менеджменту” кількість штатних одиниць у структурному підрозділі з енергетичного менеджменту органу державної влади визначається за принципом: одна штатна одиниця на кожні 50 будівель, які перебувають у володінні та/або користуванні відповідного органу. Якщо для ефективного функціонування СЕНМ достатньо однієї штатної одиниці, її обов’язки може бути покладено на енергоменеджера або працівника наявних підрозділів. У випадку, коли потрібно більше однієї штатної одиниці, створюється окремий підрозділ з енергетичного менеджменту [5]. Органам місцевого самоврядування рекомендовано дотримуватись затверджених Постановою [5] норм під час впровадження СЕНМ в межах їхніх повноважень.

Стратегічною метою сталого розвитку громади є підвищення рівня і безпеки життя громадян через зменшення залежності від викопного палива і скорочення шкідливих викидів шляхом широкого впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) та енергоефективних технологій. Це охоплює формування стратегії з розвитку інфраструктури для використання сонячної, вітрової та біоенергії, що

дозволяє зменшити вуглецевий слід та забезпечити енергетичну незалежність громади на далекоглядну перспективу. Окрім того, важливо змінити культуру енергоспоживання в громаді, що дозволить ефективно користуватися доступними енергоресурсами та знижувати витрати енергії на всіх ланках — від муніципальних установ до побутових споживачів.

Тактичні заходи для досягнення стратегічної мети передбачають імплементацію конкретних технічних рішень для зниження рівня енергоспоживання і викидів CO<sub>2</sub>. Одними з таких кроків є, наприклад, термомодернізація муніципальних будівель, заміна застарілих систем опалення на енергоефективні котли та модернізація вуличного освітлення на LED-технології. Важливим є запуск пілотних проєктів з використання ВДЕ на муніципальних об'єктах різного типу, що дозволяє перевірити і порівняти їхню результативність, скоригувати проєктні рішення і створити надійну основу для масштабування.

Для досягнення стратегічної мети важливо також забезпечити усталеність та гарантування неперервності ініціатив у сфері енергетичного менеджменту незалежно від змін у політичному керівництві громади, що передбачає розробку довгострокових планів дій, укладання меморандумів та імплементацію стратегій з розвитку громади. Тактичні заходи у цьому напрямі передбачають регулярне інформування громадян і муніципалітети про результати роботи енергоменеджера, зокрема, про обсяги, тенденції та структуру енерговикористання громади, реалізовані енергоефективні заходи і їхні наслідки тощо, а також запровадження чіткої системи звітності, що дозволить громаді і керівництву муніципалітету більш ефективно оцінювати результати і приймати обґрунтовані рішення на основі даних енергомоніторингу.

То ж невід'ємною умовою забезпечення сталого розвитку громад є, зокрема, впровадження в муніципалітетах високопродуктивних систем моніторингу споживання енергетичних ресурсів та викидів парникових газів, що дозволить оперативно відстежувати процеси енерговикористання і коригувати керувальні впливи в режимі, близькому до реального часу. Важливо також запровадити інструменти автоматизації процесів управління енерговикористанням, що забезпечить цілісність, повноту, достовірність та актуальність даних про енерговикористання і усунути суб'єктивний фактор під час їхнього аналізу і оцінки. Окрім того, важливо підвищити обізнаність мешканців громади щодо необхідності підвищення рівня енергоефективності та скорочення шкідливих викидів через проведення освітніх заходів та інформаційних кампаній. Це дозволить не лише знизити витрати енергії, а й забезпечити підтримку громадян для переходу до сталого енергетичного майбутнього.

**Висновки і перспективи.** Гар-аналіз регуляторного забезпечення процесів стратегічного планування, впровадження та застосування систем енергомоніторингу в муніципалітетах виявив розриви між стратегічними цілями та можливостями їхнього досягнення в рамках чинної нормативно-правової бази. Адже надходження до центрального органу влади звітної інформації з незадовільним рівнем достовірності несе ризик викривлення результатів аналізу енерговикористання територіальних спільнот і ускладнює прийняття рішень, спрямованих на підвищення рівня енергетичної ефективності задля забезпечення сталого розвитку громад. Для подолання розривів критично важливо, спираючись на надійний регуляторний базис, вдосконалити процеси верифікації та валідації звітної інформації, а також надати додаткову підтримку і навчання фахівцям муніципалітетів, які здійснюють енергомоніторинг і формують звітні дані про енерговикористання. Лише в такий спосіб можна забезпечити точність, повноту, достовірність та актуальність інформації для реалізації ефективних стратегій у сфері енергетичного менеджменту.

#### **Список використаної літератури**

1. United Nations Environment Programme (UNEP). Emissions Gap Report 2021. 2021. URL: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021> (дата звернення 29.09.2024).
2. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2021. Paris: IEA, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021> (дата звернення 28.09.2024).
3. Violeta Motuzienė and Vilune Lapinskiene and Genrika Rynkun and Genrika Rynkun (2021) Energy Performance Gap Analysis in Energy Efficient Residential Buildings in Lithuania DOI:10.2478/rtuct-2021-0045 (дата звернення 23.11.2024).
4. Young Seo Yoo and Hansol Shin and Deuk Woo Kim and Cheol Soo Park (2024) Performance gap analysis for Korean building energy efficiency certification. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778824004109> (дата звернення 23.11.2024).
5. Derya Yılmaz and Ali Murat Tanyer and İrem Dikmen Toker (2023) A data-driven energy performance gap prediction model using machine learning. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123001740> (дата звернення 24.11.2024).
6. Постанова Кабінету Міністрів України від 23 грудня 2021 року № 1460 “Про впровадження систем енергетичного менеджменту”. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#n56> (дата звернення 02.10.2024).



O. Kotsar<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-7958-2335

A. Karpenko<sup>1</sup>, Ph. D. student, ORCID 0009-0004-5787-4750

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## GAP-ANALYSIS OF ENERGY MONITORING PROCESSES STRATEGIC PLANNING AT THE MUNICIPAL FACILITIES

*The reliable energy management in energy management systems should be based on accurate, complete, authentic and actual data on energy consumption and greenhouse gas emissions provided by energy monitoring systems. Errors during the implementation and use of energy monitoring systems will lead to ineffective energy management and will not allow achieving the stated goals. The article presents the results of a gap-analysis of regulatory support that affects the effectiveness of the implementation and long-term application of energy monitoring systems in the municipalities and proposes measures to bridge the gaps. The gap-analysis results illustrate the key gaps between current regulatory standards and the goals of implementing energy monitoring systems. The article contains recommendations for improving the regulatory framework to support energy efficiency and sustainable development of communities. Thanks to its systemic approach, the article can be useful for scientists and professionals interested in the development of sustainable energy practices at the local level, and serves as a basis for further research in this area.*

**Keywords:** energy efficiency, energy management, energy monitoring, EnMS, energy monitoring system, gap analysis.

### References:

1. United Nations Environment Program (UNEP). Emissions Gap Report 2021. 2021. URL: <https://www.unep.org/resources/emissions-gap-report-2021> (accessed at 29.09.2024).
2. International Energy Agency (IEA). Energy Efficiency 2021. Paris: IEA, 2021. URL: <https://www.iea.org/reports/energy-efficiency-2021> (accessed at 28.09.2024).
3. Violeta Motuzienė and Vilune Lapinskiene and Genrika Rynkun and Genrika Rynkun (2021) Energy Performance Gap Analysis in Energy Efficient Residential Buildings in Lithuania DOI:10.2478/rtuct-2021-0045 (accessed at 23.11.2024).
4. Young Seo Yoo and Hansol Shin and Deuk Woo Kim and Cheol Soo Park (2024) Performance gap analysis for Korean building energy efficiency certification. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0378778824004109> (accessed at 23.11.2024).
5. Derya Yılmaz and Ali Murat Tanyer and İrem Dikmen Toker (2023) A data-driven energy performance gap prediction model using machine learning. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1364032123001740> (accessed at 24.11.2024).
6. Decree of the Cabinet of Ministers of Ukraine dated December 23, 2021 No. 1460 "On the implementation of energy management systems". URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1460-2021-%D0%BF#n56> (accessed at 02.10.2024).

Надійшла: 30.11.2024

Received: 30.11.2024

## ОГЛЯД ПРОГРАМ ПІДТРИМКИ КОМПЛЕКСНИХ ПРОЄКТІВ З ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ В ЖИТЛОВИХ БУДІВЛЯХ ТА АНАЛІЗ РЕЗУЛЬТАТІВ ЇХ ВПРОВАДЖЕННЯ

*В сучасних умовах питання енергоефективності житлового сектору набуває все більшої актуальності, адже багатоквартирні житлові будинки споживають значну кількість енергії, а вартість енергоносіїв постійно зростає. Відновлення країни після закінчення військових дій повинно відбуватися із дотриманням вимог щодо енергоефективності. Держава Україна та міжнародні фінансові організації підтримують заходи з енергоефективності в житлово-комунальному господарстві (ЖКГ) шляхом впровадження різних інвестиційних програм. Метою дослідження є оцінка показників проєктів впровадження комплексних технічних рішень з енергоефективності в житловому секторі; аналіз умов участі в таких проєктах і результатів впровадження різних програм підтримки. В ході дослідження було проведено огляд успішно реалізованих в Україні та діючих на сьогодні програм підтримки житлового сектору, інструменти державного регулювання процесів підвищення енергоефективності, а також детально проаналізовано техніко-економічні показники проєктів програми «Енергодім» від Фонду енергоефективності. Методи дослідження, що застосовувалися: аналітичні методи, системний аналіз, синтез, систематизація, метод порівняльного і структурного аналізу.*

**Ключові слова:** багатоквартирні будинки, енергоспоживання, енергоефективність, комплексна термомодернізація, програми підтримки.

### Вступ

Енергетична незалежність держави є умовою сталого економічного розвитку. Житлово-комунальне господарство є суттєвим споживачем енергоресурсів, тому Україна поступово впроваджує низку заходів для підвищення енергетичної ефективності в цій галузі. Зважаючи на міжнародні зобов'язання України, відбувається удосконалення законодавчої [1, 2] та нормативної бази [3, 4] в сфері підвищення енергоефективності будівельного фонду і її гармонізація з нормативною базою ЄС [5]. При розробці проєктів на нові будівлі та на реконструкцію існуючих будівель обов'язковим є розробка розділу «Енергоефективність» у складі проєктної документації [6]. Введено енергетичну сертифікацію житлових і громадських будівель та незалежний моніторинг цих сертифікатів [1, 4, 7]. Для фахівців з енергетичного аудиту будівель впроваджено професійний стандарт [8], почали діяльність Кваліфікаційні центри. В Україні розроблено вимоги до будівель [9], які визначають низку показників та параметрів, за якими буде перевірятись відповідність будівлі стандарту NZEB (скорочення від англ. "nearly zero-energy building").

За рахунок державних та інвестиційних та грантових програм поступово впроваджуються заходи з підвищення показників енергоефективності в житлових будівлях, що дозволяє суттєво знизити витрати на енергозабезпечення, покращити умови мікроклімату та зменшити негативний вплив на довкілля. Україна має позитивний досвід реалізації таких програм, тому варто проаналізувати техніко-економічні показники таких комплексних проєктів термомодернізації. Крім того, відновлення країни після закінчення військових дій повинно відбуватися із дотриманням вимог щодо енергоефективності, такі проєкти будуть реалізовуватися за рахунок залучених коштів, тому найближчим часом актуальність цієї тематики буде тільки зростати. Дослідження здійснювалися в рамках роботи над магістерською дисертацією [10-12].

Основною *метою дослідження* є оцінка показників проєктів впровадження комплексних технічних рішень з енергоефективності в житловому секторі; аналіз умов участі в таких проєктах і результатів впровадження різних програм підтримки. Завдання дослідження:

- проаналізувати наявні інструменти для державного управління енергоефективністю в Україні;
- провести аналіз різних програм підтримки впровадження комплексних проєктів підвищення енергоефективності в житловому будівельному фонді та отримані результати;
- розробити структуру та архітектуру веб-платформи, яка дозволить об'єднанням співвласників багатоквартирних будинків (ОСББ) самостійно оцінити потенціал енергозбереження.

### Матеріал і результати досліджень

#### Досвід підтримки енергоефективних проєктів в житловому секторі

Європейський досвід підтримки енергоефективних проєктів у житловому секторі є різноманітним.

Він базується на комплексних підходах, які включають законодавче регулювання, фінансову підтримку, податкові стимули, освітні програми та технічну допомогу. Європейські країни демонструють приклади успішних ініціатив, які можуть слугувати орієнтиром для України.

Ключові підходи, які використовують в Європі [10]:

- комплексний підхід: поєднання фінансової підтримки, технічної допомоги, інформаційних кампаній та регуляторних вимог;
- залучення всіх зацікавлених сторін: урядів, місцевих органів влади, приватного сектору, громадських організацій та громадян;
- фінансова підтримка: державні програми співфінансування, низьковідсоткові кредити, гранти для власників житла на проведення енергоефективних заходів;
- енергосервісні контракти: компанії беруть на себе фінансування та виконання енергоефективних заходів, а оплата здійснюється за рахунок економії на енергоносіях;
- енергетичні аудити, що здійснюються кваліфікованими фахівцями, які внесені до загальнодержавних баз даних з розробкою рекомендацій щодо впровадження заходів з енергозбереження;
- консультації власникам житла щодо вибору технологій та оформлення документації;
- інформаційні кампанії про переваги енергоефективності, доступні фінансові інструменти та приклади успішних проєктів.
- регуляторні вимоги: стандартів енергоефективності для нових та існуючих будівель.

В травні 2024 року вступила в силу нова Директива щодо енергоефективності будівель (EU/2024/1275) - Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) [5]. Згідно з новими правилами, до 2030 року всі нові будівлі повинні бути з нульовим рівнем викидів, а до 2050 року будівельний фонд ЄС повинен бути перетворений у будівельний фонд з нульовим рівнем викидів. Кожна держава-член ЄС прийме власну національну траєкторію скорочення середнього споживання первинної енергії житловими будинками. Країни ЄС активно залучають державні і міжнародні фонди для підтримки енергоефективних проєктів.

Серед інструментів державного регулювання процесів підвищення енергоефективності в сфері ЖКГ в Україні можна виокремити: правові, адміністративні, економічні (див. рис.1).



Рисунок 1 – Інструменти державного регулювання в сфері ЖКГ [11]

Серед розглянутих інструментів інтерес представляють реально отримані результати вже втілених проєктів в житловому секторі, тому в подальшому більш прискіпливу увагу приділемо даному питанню.

В Україні за участю міжнародних донорів за попередні роки вже було реалізовано [13] значну кількість проєктів підвищення енергоефективності житлових будівель, зокрема за програмами, що фінансувалися USAID, NEFKO, GIZ, SECO, ЄБРР, Світовим банком, банком KfW та ін. Україна має позитивний досвід фінансування енергоефективних заходів для житлових будівель за програмами «Теплі кредити» та програми IQ energy (табл.1). Завдяки цьому було отримано кредит довіри і створено попит на

енергоефективні проєкти серед населення, адже більше 50% ОСББ скористались програмою 2 і більше разів. В багатьох містах впроваджено грантові програми (наприклад, «Програма 70 на 30» для фінансування заходів з підвищення енергоефективності та капремонт житлових будівель в місті Києві), в територіальних громадах затверджені програми підтримки для багатоквартирних, зокрема перебачено часткове покриття відсотків чи тіла кредиту по енергоефективним проєктам [11].

Таблиця 1 – Порівняльний аналіз реалізованих програм підтримки заходів з підвищення енергоефективності в житловому фонді України [11]

Назва показника	Теплі кредити	Програма IQ energy
Джерело фінансування	Державна програма, міжнародні і приватні інвестиції	Міжнародні і приватні інвестиції
Період	2014-2020	2016-2020
Цільова група	Фізичні особи (власники будинків, квартир), ОСББ, ЖБК	Власників індивідуальних будівель та ОСББ
Умови для участі	Впровадження енергоефективних заходів, обладнання, матеріалів, нетрадиційних джерел енергії	Енергоефективне обладнання та матеріали з переліку, вказаного на сайті програми
Загальна сума	1,1 млрд. грн	75 млн. євро.
Умови	30-70% тіла кредиту на обладнання	15-20% частини тіла кредиту
Обмеження	14000 грн/особу	верхня межа 3000 є/ особу

Низка програм підтримки проєктів підвищення енергоефективності в будівельному фонді реалізовувалася у тісній співпраці з Мінрегіонбудом. Наприклад, програми від міжнародних інвестиційних організацій, програма розвитку ООН (ПРООН), та спільний проєкт ЄС та Німецького товариства міжнародного співробітництва GIZ "Енергоефективність у громадах". Програма USAID "Енергетична безпека" була спрямована на підтримку енергетичної незалежності та енергоефективності України шляхом технічної допомоги у розробці проєктів та впровадженні нових технологій в житловому секторі. Програма також передбачала навчання для керівників та ініціативних груп ОСББ щодо участі у подібних проєктах.

Таким чином, в Україні вже було реалізовано низка державних та міжнародних програм, які надавали грантову підтримку, кредити або співфінансування для впровадження енергоефективних заходів у житлових будівлях, що створило довіру у населення до такого роду інструментів для підвищення рівня енергоефективності в житловому секторі і дало можливість започаткувати впровадження комплексних проєктів термомодернізації.

#### **Аналіз програм підтримки житлового сектору від Фонду енергоефективності**

Фонд енергоефективності [13] - державна установа, утворена з метою стимулювання впровадження заходів з енергозбереження в житловому секторі. Фонд виконує важливу роль у фінансуванні проєктів модернізації багатоквартирних будинків, і на сьогодні реалізує три програми: «ЕнергоДім» (комплексна термомодернізація), «ГрінДім» (впровадження теплових насосів та сонячних електростанцій для житлових будівель) та «ВідновиДім» (відновлення житлових будівель, пошкоджених внаслідок військової агресії, з урахуванням вимог до енергоефективності) [10, 13].

Програму «Енергодім» впроваджено з 2019 року, що є результатом трансформації програми «Теплі кредити» в більш масштабну. Програма призначена для реалізації проєктів термомодернізації житлових будівель за двома пакетами (пакет А «Легкий» та пакет Б «Комплексний», кожен з яких містить обов'язкові та додаткові заходи для реалізації). Наявність двох пакетів дозволяє обирати заходи під фінансові можливості та потреби мешканців ОСББ. Програма дозволяє провести глибоку модернізацію будівель, включаючи комплексне утеплення та оновлення інженерних мереж. Пакет «Б» (Комплексний) включає всі заходи пакету «А», якщо вони не були впроваджені раніше, а також теплоізоляцію будівельних конструкцій – стін, даху горища, підвалу. Для участі в програмах Фонду обов'язковою умовою є проведення енергетичного обстеження та розробка енергосертифікату для існуючої будівлі, де буде також відображена інформація про рекомендовані заходи для будівлі.

Станом на січень 2025 року до Фонду подано вже більше 1100 заявок за програмою «Енергодім»; кількість повністю завершених проєктів – 224. Заявлена річна економія енергії для вказаних проєктів – 330625 кВт-год/рік, скорочення викидів при цьому – 90,5 тис. тон CO<sub>2</sub>. Середній рівень заявленої економії енергії: пакет «А» -17%, пакет «Б» - 37 %. Середня вартість проєктів, що подаються за пакетом «А» - близько 2млн., за пакетом «Б» - 13млн.грн. Виплачено грантів на суму близько 1700 млн.грн. [14].

Програма "Енергодім" сприяє суттєвому скороченню витрат на енергоресурси для мешканців багатоквартирних будинків, знижує навантаження на мережі та скорочує викиди CO<sub>2</sub>. Сучасні

енергоефективні технології забезпечують більш комфортні умови проживання. Розвиток ринку енергоефективних технологій створює нові робочі місця та сприяє економічному зростанню.

Крім програми «Енергодім», Фондом енергоефективності реалізується програми «Віднови дім» та «Гріндім», їх порівняльний аналіз показаний на рис.2. Всього Фондом енергоефективності на кінець 2024 року виплачено грантів на суму 2,83 млрд грн (з них 1,114 млрд.грн. – за програмою «Віднови дім»). Загальна вартість поданих проєктів – на 9,4 млрд. грн., сума грантів за проєктами – 6,3 млрд.грн. Всього реалізованих проєктів – 1332, серед учасників – більше ніж 197 тис. сімей [15].



Рисунок 2 – Програми для населення, що реалізуються Фондом енергоефективності [10, 11]

Мета програми «ГрінДім» полягає у збільшенні використання енергії, виробленої з відновлюваних джерел, шляхом надання грантів для часткової компенсації вартості обладнання та матеріалів для ЖБК та ОСББ. Передбачено часткового відшкодування витрат в розмірі 70% на обладнання та матеріали [14]:

- теплові насоси, що використовують ґрунт, воду або повітря як джерело теплової енергії для забезпечення опалення та гарячого водопостачання;
- сонячні електростанції.

Також компенсуються витрати на сертифікацію енергоефективності будівель для подання заявки на отримання гранту і повторну сертифікацію після впровадження проєкту (обмеження – 15 тис.грн.).

Сонячна електростанція повинна включати сонячні панелі, гібридний інвертор та акумулятори. Умови встановлення теплового насоса (ТН) для опалення: тепла ізоляція будинку (суцільна ізоляція фасадів, модернізований ГТП, система автоматизації, теплоізолювані мережі, гідравлічне балансування). В таблиці 2 наведені загальні вимоги до обладнання за програмою «ГрінДім» [14].

Таблиця 2– Загальні вимоги до обладнання за програмою «ГрінДім» [14]

Загальні вимоги до теплових насосів	Загальні вимоги до СЕС
Номінальне значення теплопродуктивності	Мінімальна номінальна потужність
Номінальна теплова потужність	Гібридність
Коефіцієнт перетворення виробленої теплової енергії до витраченої електричної	Захист від перегріву/перевантаження
Клас енергоефективності	Вимоги до частоти змінного струму
	ККД
	Мінімальна номінальна ємність
	Літій-похідні матеріали
	Захист від короткого замикання, перезаряду, перегріву

Програма «Віднови дім» надає фінансування для проведення будівельних робіт із відновлення житлових будівель ОСББ, які були пошкоджені внаслідок військової агресії РФ проти України. Заходи, які фінансуються, з урахуванням діючих вимог по енергоефективності:

- заміна/ремонт пошкоджених віконних і балконних блоків;
- ремонт пошкоджень фасадів будівель;
- ремонт пошкоджень конструкції даху/покриття будівель;
- влаштування засобів безперешкодного доступу для маломобільних груп населення;
- ремонтно-відновлювальні роботи внутрішнього опорядження в місцях загального користування;
- ремонт пошкодженого обладнання дахових котельень та інженерних систем будівлі.

Для участі в програмі має бути проведено технічне обстеження кваліфікованим фахівцем, а будівля має бути внесеною в Реєстр пошкодженого майна. В межах пілотної частини програми зі стимулювання використання альтернативних джерел енергії «ГрінДІМ» очікується прийняти заявки від 500 учасників, більшість з яких – приватні будинки.

### Огляд техніко-економічних характеристик будівель до та після реалізації програм комплексної термомодернізації від Фонду енергоефективності

В рамках даного дослідження було проаналізовано масив інформації щодо поданих заявок до Фонду енергоефективності за програмами термомодернізації «Енергодім» за період до 2 кварталу 2024 р. На рис.3 нижче показано роки побудови будівель, які подали заявки до Фонду енергоефективності (ФЕЕ) з метою фінансування проєктів підвищення енергоефективності. Як бачимо, основна маса будівель – це серійні будівлі, теплотехнічні показники яких значно нижче діючих вимог [3]: опір теплопередачі стін більше 70% будівель близько 0,8–1 [м<sup>2</sup>·К]/Вт. Близько 40% будинків мають опір теплопередачі вікон/балконів в місцях загального користування до 0,4 м<sup>2</sup>·К/Вт; тобто там встановлено старі серійні дерев'яні вікна, що фізично та морально застарілі, через які спостерігаються підвищені тепловтрати за рахунок інфільтрації та теплопередачі. Вікна потребують заміни на сучасні енергоефективні, що відповідають вимогам [3].

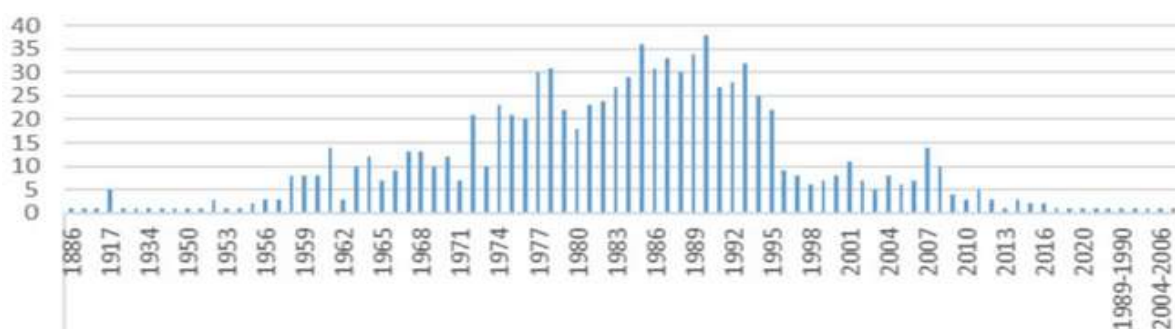
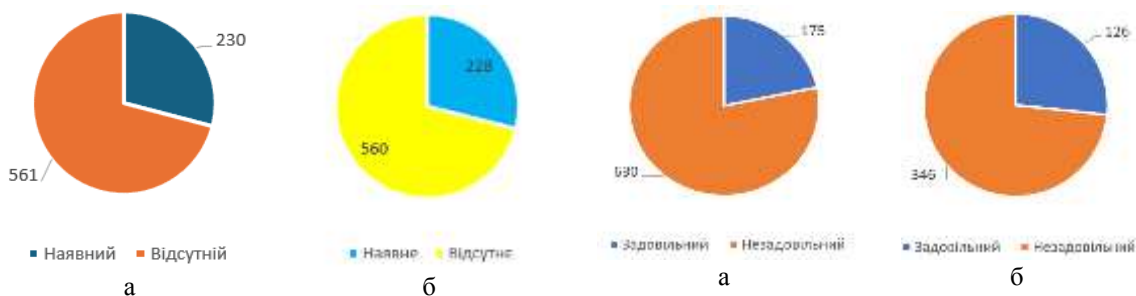


Рисунок 3 – Розподіл будівель за роками побудови

Далі розглянемо геометричні та експлуатаційні параметри житлових будівель. Значна частина будівель, що подали заявки, мають опаловальну площу 4000-6000 м<sup>2</sup>. Розподіл по кількості квартир та нежитлових приміщень: до 100 квартир – 60%, від 100 до 300 квартир – 38%, від 300 квартир – 2%

Нижче на рис. 4, 5 проаналізовано стан інженерних мереж будівель, що беруть участь у програмі. Як бачимо, в більшості будівель відсутній індивідуальний тепловий пункт (ІТП), погодозалежне регулювання, а також облік гарячої води, тому актуальним питанням є саме модернізація інженерних мереж. Більше 80% будівель мають централізовану систему опалення, автономні газові котли (або газові колонки) в квартирах встановлено у близько 17,5% будинках, що беруть участь в програмі Фонду енергоефективності, а близько 2,5 % будинків мають автономні котельні.



а – наявність індивідуального теплопункту;  
б – наявність погодозалежного регулювання

Рисунок 4 – Стан інженерних мереж будівель

а – стан теплової ізоляції трубопроводів опалення;  
б – стан теплової ізоляції трубопроводів гарячого водопостачання (ГВП)

Рисунок 5 – Стан теплової ізоляції трубопроводів

Аналіз систем освітлення житлових будівель показав, що переважну кількість (66%) ламп в місцях загального користування (МЗК) становлять світлодіодні лампи, але лампи розжарювання також використовуються (17%), тому такий захід як модернізація системи освітлення є актуальним.

Серед заходів, які передбачаються в проєктах: утеплення стін, перекриттів, заміна вікон, встановлення вузлів обліку, модернізація ІТП, балансування системи опалення, теплоізоляція труб в неопалювальних

приміщеннях та ін. Нижче на рис.6 наведений перелік заходів, що були впровадженні в будинках за програмою та рівень досягнутої економії за пакетами "А" та "Б".

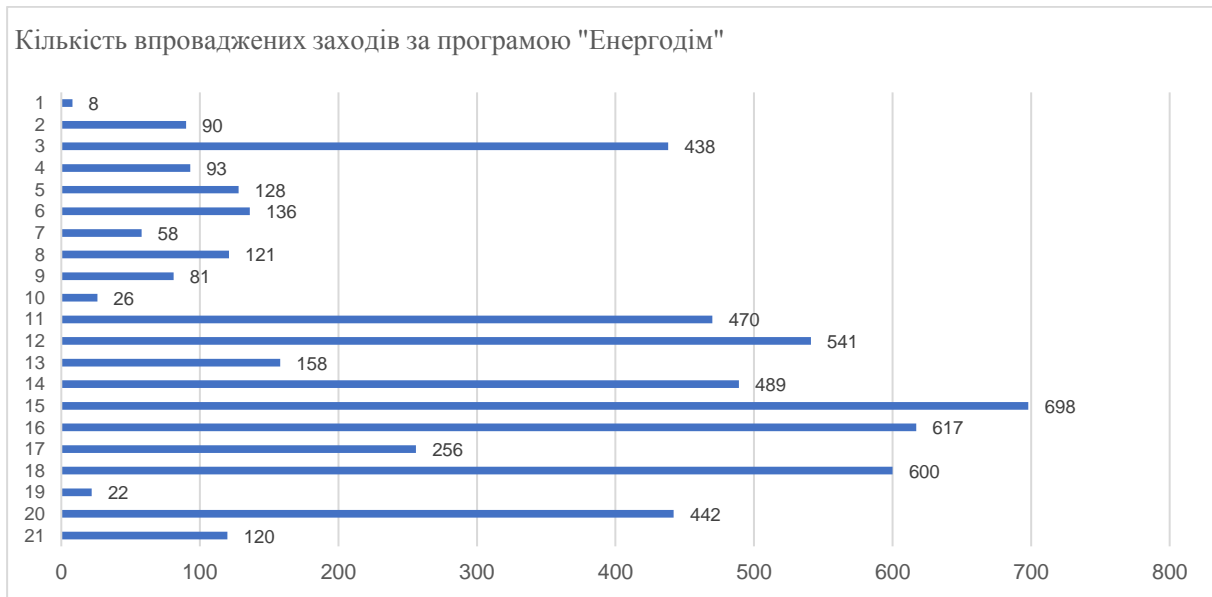


Рисунок 6 – Заходи с енергоефективності, впроваджені за програмою «Енергодім»

Позначення по шкалі ординат – тип заходу:

- 1 - модернізація системи внутрішнього тепlopостачання;
- 2 - комплекс робіт із модернізації та облаштування системи вентиляції з встановленням рекуператорів;
- 3 - заміна або ремонт блоків віконних та блоків балконних дверних у квартирах, утеплення і скління наявних балконів і лоджій;
- 4 - заміна або/та теплоізоляція трубопроводів системи опалення або/та приладів водяної системи опалення у квартирах;
- 5 - комплекс робіт із теплоізоляції та улаштування зовнішніх стін нижче рівня ґрунту;
- 6 - комплекс робіт із модернізації та облаштування системи освітлення у МЗК;
- 7 - заміна або/та теплоізоляція трубопроводів або приладів системи опалення у МЗК;
- 8 - встановлення автоматичних регуляторів температури повітря у приміщеннях на опалювальних приладах водяної системи опалення у квартирах або/та у МЗК будівлі;
- 9 - встановлення вузлів розподільного обліку теплової енергії на потреби опалення або/та приладів-розподільовачів теплової енергії у квартирах;
- 10 - модернізація системи гарячого водopостачання;
- 11 - заміна або ремонт блоків віконних та блоків балконних дверних у МЗК будівлі;
- 12 - заміна або ремонт зовнішніх дверей або/та облаштування тамбурів зовнішнього входу;
- 13 - комплекс робіт із теплоізоляції та улаштування плит перекриття підвалу;
- 14 - комплекс робіт із теплоізоляції та улаштування опалювальних та неопалювальних горич (технічних поверхів) та дахів;
- 15 - комплекс робіт із теплоізоляції та улаштування зовнішніх стін;
- 16 - гідравлічне балансування системи опалення шляхом встановлення автоматичних (балансувальних) клапанів;
- 17 - теплоізоляція або/та заміна трубопроводів системи гарячого водopостачання в неопалювальних приміщеннях;
- 18 - теплоізоляція або/та заміна трубопроводів системи внутрішнього тепlopостачання в неопалювальних приміщеннях;
- 19 - заміна або модернізація загальнобудинкового котла та допоміжного обладнання (наприклад, насосів, систем автоматичного регулювання тощо);
- 20 - встановлення або модернізація ІТП;
- 21 - встановлення вузла комерційного обліку теплової енергії.

Було визначено питому вартість виконаних заходів з енергозбереження за двома пакетами:

- за пакетом А «Легкий» - 38 грн/м<sup>2</sup> опалювальної площі, рівень досягнутої економії – 17%;

- за пакетом Б «Комплексний» - 93 грн/м<sup>2</sup> опалювальної площі, рівень досягнутої економії – 34%.

Наступним кроком дослідження був аналіз фактичного та розрахункового енергоспоживання будівлі до та після впровадження заходів. Аналіз показав, що в середньому фактичне споживання на потреби опалення та охолодження будівлі становить близько 78 кВт-год/м<sup>2</sup> опалювальної площі.

Розрахункові значення енергоспоживання на потреби опалення, охолодження, вентиляції та ГВП, обчислені за національною методикою ДСТУ 9190:2022, [16] наведено на рис.7, 8.

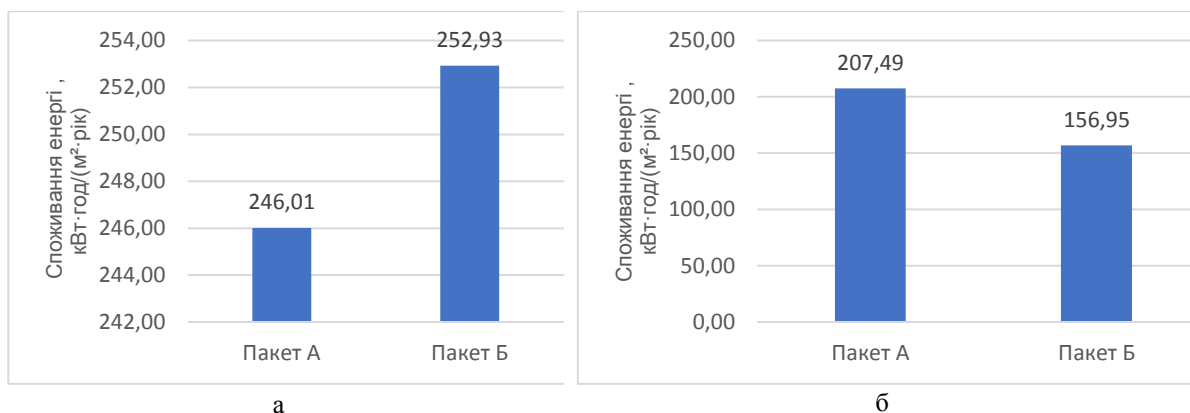


Рисунок 7 - Розрахункове питоме річне споживання енергії будівель:  
а - до впровадження заходів; б – після впровадження заходів.

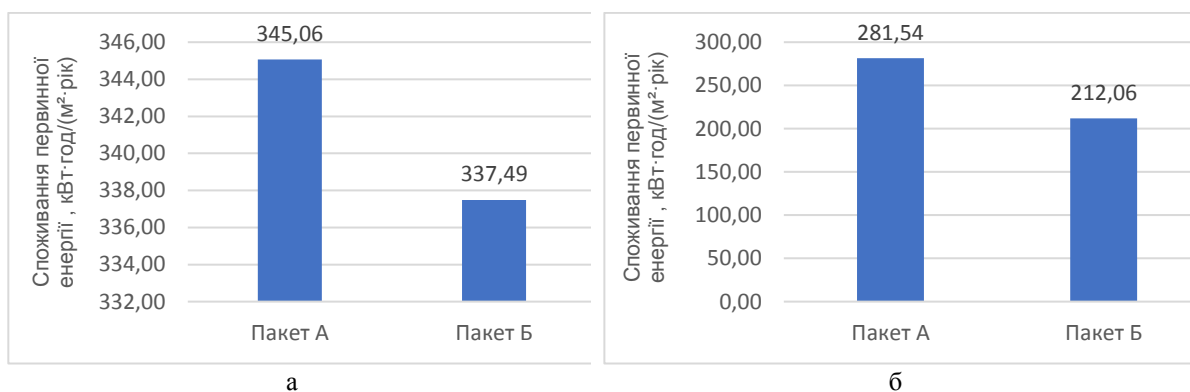


Рисунок 8 - Розрахункове питоме річне споживання первинної енергії будівель:  
а - до впровадження заходів; б – після впровадження заходів.

Також було проаналізовано питомий обсяг викидів парникових газів до та після реалізації впроваджених заходів (рис.9).

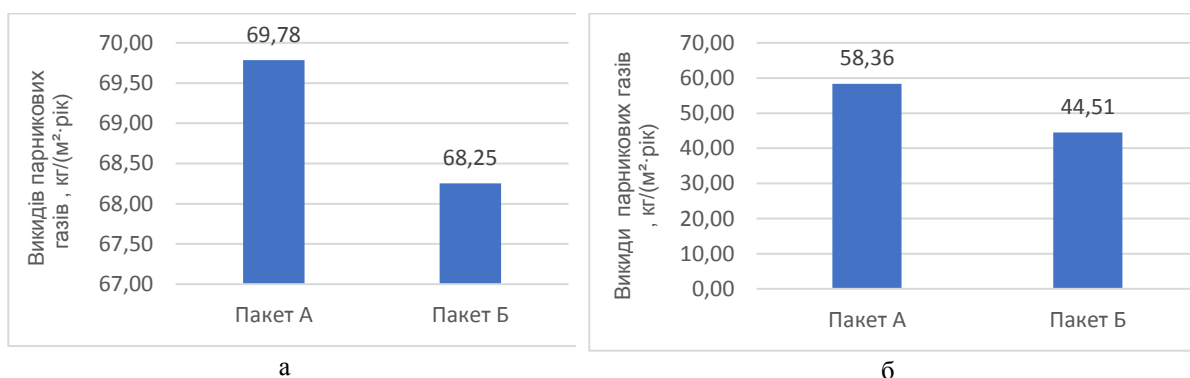


Рисунок 9 – Розрахунковий питомий річний обсяг викидів парникових газів для будівель:  
а - до впровадження заходів; б – після впровадження заходів.

#### **Розробка концепції створення інтернет-платформи для сприяння впровадження комплексних проєктів підвищення енергоефективності**

На наступному кроці дослідження було розглянуто ще один із інструментів для підвищення енергоефективності в житловому фонді, а саме запропонована інтернет-платформи, яка дозволить ОСББ самостійно оцінити потенціал енергозбереження та сприятиме масштабній термомодернізації відповідно



державної стратегії розвитку. При цьому партнерами можуть виступати ЕСКО та консалтингові компанії, компанії-управителі, енергоаудитори, постачальники та ін. [12]. Цей інструмент дозволить власникам зменшити витрати на експлуатацію будівлі та покращити умови мікроклімату в приміщеннях, а також після реалізації рекомендованих заходів довести теплотехнічні характеристики огорожень до діючих норм [3]. Крім того, платформа дозволить також автоматизувати процеси документування та звітності.

Опис основних функціональних можливостей інтернет-платформи [10, 12]:

1. Модуль інтелектуального енергоаудиту:

- збір даних про будівлю: площа, кількість поверхів, тип утеплення, вікна, опалювальна система; збір даних з відкритих джерел (кадастрових реєстрів, супутникових знімків, відгуків);
- прогнозування енергоспоживання з урахуванням погодних умов, цін на енергоносії та ін.;
- визначення слабких місць і персоналізовані рекомендації: надання рекомендацій з урахуванням особливостей конкретного будинку та бюджету ОСББ.

2. База знань:

- експертна система: надання відповідей на запитання користувачів щодо енергоефективності, законодавства, фінансування проектів та оновлення інформації;
- визначення трендів: ідентифікація нових технологій та матеріалів в галузі енергоефективності, питома вартість заходів «під ключ» (за даними з офіційних сайтів, інформації від Асоціації енергоаудиторів, системи Prozorro, даними з енергетичних сертифікатів житлових будівель, що проєктуються або реконструюються, даними ФЕЕ, інформації від постачальників обладнання та ін.)

3. Маркетплейс виконавців з рейтингом на основі відгуків клієнтів та партнерів, досвіду роботи, сертифікації; підбір оптимальних методів для реалізації конкретного проекту на основі профілю будівлі та вимог ОСББ, створення комерційних пропозицій

4. Фінансовий аналіз з прогнозуванням:

- прогнозування економії: моделювання різних сценаріїв розвитку подій з оцінкою потенційної економії від впровадження пакету заходів; розрахунок окупності;
- виконання техніко-економічних розрахунків за трьома пакетами заходів: мінімальний, оптимальний, максимальний з урахуванням горизонту планування, ставки дисконтування, питомих інвестицій, динаміки цін на енергоносії та ін. Приклад аналізу наведено у табл. 3, 4.

Таблиця 3 – Приклад рекомендованих заходів з енергозбереження в ОСББ житлового багатоквартирного будинку (з даховою котельнею) [10]

№	Назва заходу	Пакети заходів		
		Мінімальний	Оптимальний	Максимальний
1	Встановлення частотного перетворювача на насоси	Мінімальний	Оптимальний	Максимальний
2	Утеплення та герметизація входу в підвал			
3	Налагодження погодного регулювання системи опалення			
4	Встановлення тамбурних дверей у вхідних групах			
5	Модернізація освітлення з встановленням датчиків руху на сходах			
6	Модернізація вентиляції з впровадженням рекуператорів			
7	Заміна частини котельних потужностей дахової котельні			
8	Чистка теплообмінника гарячого водопостачання			
9	Заміна вікон місць загального користування			
10	Заміна вікон квартир на енергоефективні			
11	Утеплення перекриття технічного поверху			
12	Утеплення зовнішніх стін			
13	Поквартирний облік теплової енергії (прилади-розподільвачі)			
14	Балансування системи опалення			

Таблиця 4 – Приклад проведеної фінансово-економічної оцінки

№	Назва пакету заходів	Питома інвестиція, \$/м <sup>2</sup>	Економія енергії, кВт⋅год/рік	Термін окупності, років	NPV	NPVQ
1	Мінімальний	11	1130730	18	5,8	5,13
2	Оптимальний	25	588200	6,7	1,9	2,73
3	Максимальний	100	286600	3	1,69	1,13

У таблиці 5 показано перелік додаткових ресурсів, що пропонується розмістити на інтернет-платформі [10].

Таблиця 5 – Перелік ресурсів для розміщення на платформі [10]

Напрямок	Зміст
Форум для спілкування фахівців	Форум для спілкування за різними темами, що стосуються енергоефективності (із модерацією), напрями: - голови ОСББ, управителі, - будівельники/монтажники, - енергоменеджери територіальних громад, управлінських компаній, - енергоаудитори, - бухгалтери та ін.
Документи	Бланки, приклади оформлених документів для подання на отримання фінансування заходів з підвищення енергоефективності.
Залучення коштів	Вимоги інвесторів для участі у проєктах, в тому числі ЕСКО. Рекомендації по заповненню документів, шаблони документів. Приклади реалізованих проєктів. Огляд проблемних питань стосовно реалізації комплексних проєктів.
Енергетичні аудити та енергетична сертифікація	Приклади описів проєкту. Приклади проведених енергоаудитів. Бланки опитувальних листів та ін. Рекомендаційні звіти. Типові договори, вимоги до енергоаудиторів. Чек-листи для самоперевірки аудиторів. База енергосертифікатів для житлових будівель. Ваза по вартості окремих енергозберігаючих заходів.
Розробка проєктної документації	Перелік та обсяг вихідних даних для проєктування. Альбоми типових рішень, стандартних вузлів. Перелік погоджень, узгоджень та проходження експертизи. Технічні умови. Авторський нагляд. Вимоги до проєктування. Кошторисна документація.
Впровадження та верифікація проєктів	Технічний нагляд. Акти виконаних робіт, акти прихованих робіт. Чек-листи для самоперевірки проєктувальників. Перелік найбільш розповсюджених помилок. Контроль виконання робіт підрядними організаціями.
Участь у тендерних закупівлях	Приклади заповнених документів. Приклади технічних вимог для проведення тендерів. Рекомендації для проходження процедур.
Новини	Карта-схема реалізованих проєктів. Публікації у ЗМІ.
Бібліотека	Законодавча та нормативна база у сфері енергоефективності житлових будівель. Посібники, підручники, інформаційні брошури.

Аналіз основних сегментів ринку:

*основні клієнти, цільова аудиторія:* ОСББ, що зацікавлені у зниженні витрат та підвищенні комфорту;  
*додаткові сегменти:*

–компанії, що надають послуги з управління багатоквартирними будинками (управителі), що зацікавлені у використанні платформи для оптимізації енергоспоживання в будинках;

–муніципальні органи влади: міські ради та інші органи місцевого самоврядування, що зацікавлені у просуванні енергоефективності та можуть заохочувати ОСББ до використання платформи;

–енергосервісні компанії, які можуть використовувати платформу для пошуку нових клієнтів та автоматизації частини своїх процесів;

–банки та фінансові установи: можуть бути зацікавлені у співпраці для фінансування енергоефективних проєктів в ОСББ;

–виробники енергоефективного обладнання: платформа може стати для них маркетинговим інструментом для просування своїх продуктів [10].

#### **Висновок**

В ході дослідження було проаналізовано різні інструменти державного управління для підвищення енергоефективності в ЖКГ, в тому числі вивчено європейський досвід. Було проведено огляд успішно реалізованих в Україні та діючих на сьогодні програм підтримки житлового сектору. Проаналізовано техніко-економічні показники, отримані під час впровадження програми «Енергодім» від Фонду енергоефективності. Розроблено структуру веб-платформи, яка дозволить ОСББ самостійно оцінити потенціал енергозбереження свого будинку та полегшить процедури участі в комплексних проєктах підвищення енергоефективності, що в результаті сприятиме реалізації довгострокової стратегії термомодернізації будівель в Україні.

**Список використаної літератури**

1. Про енергетичну ефективність будівель: Закон України № 2118-VIII, ред. від 15.11.2024. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
2. Про Фонд енергоефективності: Закон України № 2095-VIII, ред. від 30.06.2024. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2095-19#Text>
3. ДБН В.2.6-31:2021 Теплова ізоляція та енергоефективність будівель.
4. ДСТУ 9190:2022 Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.
5. EU/2024/1275. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) URL: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202401275&pk\\_keyword=Energy&pk\\_content=Directive](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive)
6. ДСТУ Б А.2.2-8:2010 Розділ Енергоефективність у складі проектної документації об'єктів.
7. Про затвердження Порядку проведення сертифікації осіб, які мають намір провадити діяльність із сертифікації енергетичної ефективності, енергетичного аудиту будівель та обстеження технічних установок/ Постанова КМУ №40 від 16.01.2024 р. Режим доступу: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-2024-%D0%BF#Text>
8. Професійний стандарт «Енергетичний аудитор будівель». Наказ Міністерства розвитку громад, територій та інфраструктури України № 859 від 22.09.2023 р. Режим доступу: [https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij\\_auditor\\_budivel.pdf](https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij_auditor_budivel.pdf)
9. В. Литвин. Огляд будівельних технологій для забезпечення відповідності стандартам NZEB. Аналітичний звіт. – К.: Опора, 2024, 16 с. Режим доступу: [https://rehouse.org.ua/sites/default/files/5\\_oglyad\\_budivelnykh\\_tekhnologii\\_litvin\\_ekf.pdf](https://rehouse.org.ua/sites/default/files/5_oglyad_budivelnykh_tekhnologii_litvin_ekf.pdf)
10. Ткач М.О. Оцінка техніко-економічних показників проєктів впровадження комплексних технічних рішень з енергоефективності в житловому секторі за рахунок програм підтримки / Магістерська дисертація за спец. 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – К.: КПІ ім.Ігоря Сікорського, 2024. – 110 с.
11. Оборонов Т.Ю., Шовкалюк М.М., Ткач М.О. Огляд програм підтримки комплексних технічних рішень з енергоефективності в житловому секторі // Збірник наук. праць X міжнар. наук.-техн. та навч.-метод. конф. "Енергетичний менеджмент: стан та перспективи розвитку –PEMS'2024". [Київ, 26-27 листопада 2024 р.] – с. 173-175.
12. Шовкалюк М.М., Ткач М.О. Розробка концепції створення інтернет-платформи для сприяння впровадження комплексних проєктів підвищення енергоефективності в житловому секторі // Збірник наук. праць VII Наук.-техн. конф. магістрантів ім. проф. В.М. Винославського” [20 – 22 листопада 2024 р.] – с. 37-40.
13. М.М. Шовкалюк. Співпраця України з міжнародними фінансовими організаціями у сфері підвищення енергоефективності ЖКГ // Збірник праць XIV Всеукр. наук.-практ.конф. «Міжнародне науково-технічне співробітництво: принципи, механізми, ефективність» - [Київ, КПІ, 15-16 березня 2018 р.], - с.34-37.
14. Офіційний сайт Фонду енергоефективності. Режим доступу: <https://eefund.org.ua/>
15. Фонд енергоефективності /Дайджест: підсумки 2024 року. Режим доступу: <https://surl.li/wizzox>
16. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання.

**T. Oboronov**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0001-8871-3256

**M. Shovkaliuk**<sup>2</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1898-3493

**M. Tkach**<sup>2</sup>, master student, ORCID 0009-0007-4294-9010

<sup>1</sup>Energy Efficiency Fund

<sup>2</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

**REVIEW OF SUPPORT PROGRAMS FOR COMPREHENSIVE PROJECTS TO IMPROVE ENERGY EFFICIENCY IN RESIDENTIAL BUILDINGS AND ANALYSIS OF THE RESULTS OF THEIR IMPLEMENTATION**

*In modern conditions, the issue of energy efficiency in the residential sector is becoming increasingly relevant, as apartment buildings consume a significant amount of energy, and the cost of energy carriers is constantly growing. More than 70% of the housing stock was built during the period of mass construction, so the thermal characteristics of the enclosures do not meet modern energy efficiency requirements, and engineering networks are worn out and require modernization. Taking measures to increase energy efficiency in the residential sector will contribute to the energy independence of our state and reduce the impact on the environment. The*

country's recovery after the end of military operations must take place in compliance with energy efficiency requirements. The State of Ukraine and international financial organizations support energy efficiency measures in the housing and communal services by implementing various investment programs and grants. The implementation of such projects allows you to reduce energy costs and improve the comfort of living in residential buildings. The purpose of the study is to assess the performance of projects implementing comprehensive technical solutions for energy efficiency in the residential sector; analyze the conditions for participation in such projects and the results of implementing various support programs. The study reviewed the housing sector support programs successfully implemented in Ukraine and currently in operation, the instruments of state regulation of energy efficiency improvement processes in housing and communal services, and also analyzed in detail the technical and economic indicators of energy efficiency improvement projects of the Energodim program from the Energy Efficiency Fund. Research methods used: analytical methods, system analysis, synthesis, systematization, comparative and structural analysis method.

**Keywords:** apartment buildings, energy consumption, , energy efficiency, comprehensive thermal modernization, support programs.

#### References

1. On the Energy Efficiency of Buildings: Law of Ukraine No.2118-VIII. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2118-19#Text>
2. On the Energy Efficiency Fund: Law of Ukraine No. 2095-VIII. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/2095-19#Text>
3. DBN V.2.6-31:2021 Thermal insulation and energy efficiency of buildings
4. DSTU 9190:2022 Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.
5. EU/2024/1275. Energy Performance of Buildings Directive (EPBD) Access mode: [https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L\\_202401275&pk\\_keyword=Energy&pk\\_content=Directive](https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=OJ:L_202401275&pk_keyword=Energy&pk_content=Directive)
6. DSTU B A.2.2-8:2010 Section Energy efficiency as part of the design documentation of objects.
7. On approval of the Procedure for certification of persons intending to carry out activities in energy efficiency certification, energy audit of buildings and inspection of technical installations / Resolution of the Cabinet of Ministers No. 40 of 01.16.2024. Access mode: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/40-2024-%D0%BF#Text>
8. Professional standard "Energy auditor of buildings". Order of the Ministry of Development of Communities, Territories and Infrastructure of Ukraine No. 859 of 09.22.2023. Access mode: [https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij\\_auditor\\_budivel.pdf](https://register.nqa.gov.ua/uploads/0/544-energeticnij_auditor_budivel.pdf)
9. V. Lytvyn. Review of construction technologies to ensure compliance with NZEB standards. Analytical report. – Kyiv: Opora, 2024, 16 p. Access mode: [https://rehouse.org.ua/sites/default/files/5\\_oglyad\\_budivelnikh\\_tekhnologii\\_litvin\\_ekf.pdf](https://rehouse.org.ua/sites/default/files/5_oglyad_budivelnikh_tekhnologii_litvin_ekf.pdf)
10. Tkach M.O. Assessment of technical and economic indicators of projects for the implementation of complex technical solutions for energy efficiency in the residential sector at the expense of support programs / Master's thesis in speciality 141 Electric power, electrical engineering and electromechanics – Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, 2024. – 110 p.
11. Oboronov T.Yu., Shovkaliuk M.M., Tkach M.O. Review of support programs for complex technical solutions for energy efficiency in the residential sector // Collection of scientific papers of the X International Scientific-Technical and Educational-Methodological Conference "Energy Management: State and Development Prospects - PEMS'2024". [Kyiv, November 26-27, 2024] – pp. 173-175.
12. Shovkaliuk M.M., Tkach M.O. Development of the concept of creating an Internet platform to facilitate the implementation of comprehensive energy efficiency improvement projects in the residential sector // Collection of scientific works of the VII Scientific and Technical Conference of Master's students named after Prof. V.M. Vynoslavsky" [November 20-22, 2024] – pp. 37-40.
13. M.M. Shovkaliuk. Cooperation of Ukraine with international financial organizations in the field of increasing the energy efficiency of housing and communal services // Collection of works of the XIV All-Ukrainian Scientific and Practical Conference "International Scientific and Technical Cooperation: Principles, Mechanisms, Efficiency" - [Kyiv, KPI, March 15-16, 2018], - pp. 34-37.
14. Official website of the Energy Efficiency Fund. Access mode: <https://eefund.org.ua/>
15. Energy Efficiency Fund /Digest: results of 2024. Access mode: <https://surl.li/wizzox>
16. DSTU 9190:2022. Energy efficiency of buildings. Method for calculating energy consumption during heating, cooling, ventilation, lighting and hot water supply.

Надійшла: 28.01.2025

Received: 28.01.2025

# ТЕХНОЛОГІЇ ТА ОБЛАДНАННЯ В ЕНЕРГЕТИЦІ.

## TECHNOLOGIES AND EQUIPMENT IN ENERGY

УДК 621.039.4

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324198

В.О. Данілов<sup>1</sup>, магістрант, ORCID 0009-0000-3070-535X

<sup>1</sup>Національний технічний університет України  
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### ОБГРУНТУВАННЯ БЕЗПЕКИ ПРИ ПРОМИВЦІ ПАЛИВНИХ КАСЕТ РЕАКТОРА ВВЕР-440 В БАЦІ ОЧИСТКИ FRAMATOME

Основною метою виконання досліджень є отримання точнішого значення залишкового енерговиділення касет після їх вилучення з активної зони та визначення, на основі результатів розрахунку, оптимального методу, що буде доцільно застосовувати для касет різних років експлуатації. Застосування просунутої методології [1], що запропонована Комісією з ядерного регулювання США (NRC), дозволило врахувати різні джерела тепловиділення, в той час як для розрахунку залишкового енерговиділення в стандартах COV НАЕК 197:2020 [2] використовувався пакет програм SCALE, що дозволяє врахувати специфіку конкретного палива. Запропонований NRC підхід, дозволяє знайти значення тепловиділення, що генерується кожним вкладником, а саме: тепловиділення, при розпаді актинідів, при захопленні нейтронів, при активації конструкційних елементів, при розпаді продуктів поділу. Їх сума визначає загальне значення тепловиділення касети. В результаті розрахунку було визначено, що для розрахунку тепловиділення касет п'ятого року експлуатації доцільніше використовувати метод COV НАЕК 197:2020, в той час як для касет від першого до четвертого років року експлуатації – підхід, що запропонований NRC.

**Ключові слова:** *Framatome, NRC, залишкове тепловиділення, АЕС Паки, поділ нейтронів, опромінення, паливне завантаження.*

**Вступ.** Важливим аспектом енергетичної стійкості та незалежності для багатьох країн Європи та світу є стабільне та безпечне функціонування атомних електростанцій. Впровадження нових технологій покликане підвищити енергоефективність та запобігти впливу радіації на навколишнє середовище та здоров'я людини.

Всі надзвичайні події, що відбувається при транспортуванні, зберіганні та використанні радіоактивних матеріалів визначаються відповідно до Міжнародної шкали ядерних подій (International Nuclear Events Scale, INES), що розроблена міжнародним Агентством з атомної енергетики (МАГАТЕ).

Надзвичайні події, що мають місце на ядерних об'єктах повинні бути ретельно вивчені, а їх наслідки – проаналізовані та усунені. Однією з таких, вартої уваги подій, є інцидент на атомній електростанції Пакш в Угорщині у 2003 році. Внаслідок розчинення продуктів корозії на дезактивованих поверхнях парогенератора, спостерігалось відкладення магнетитів, що призвело до: зменшення швидкості потоку теплоносія через активну зону, погіршення теплопровідності оболонки тепловиділяючого елементу (ТВЕЛ), збільшення температури теплоносія на виході з активної зони та зниження потужності реактора. Для швидкого виправлення ситуації, що склалася, на основі баку для відпрацьованих тепловиділяючих збірок (ВТВЗ) ТК-6, було розроблено ємність для очистки 7 касет, проте через стиснені терміни, процес довелося пришвидшувати і в результаті, компанією Framatome, було розроблено бак для очистки 30 касет. Проте, як виявилось пізніше, він мав суттєві конструкційні недоліки, основні з яких були такі:

– при розробці конструкції баку не була передбачена можливість природної циркуляції теплоносія, що унеможливило пасивне охолодження палива при відключенні основного обладнання;

– встановлення малої кількості виміральної техніки та пристроїв систем сигналізації, що не дозволяло повністю контролювати поточний стан промивки та оперативно отримувати інформацію, щодо зміни термодинамічного стану середовища;

– наявність лише однієї напрямної плити, що призводило до виникнення байпасних протічків в нижній частині баку;

– ігнорування отворів, що були призначені для покращення конвекційного теплообміну та перемішування теплоносія в активній зоні, що призвело до виникнення байпасного потоку та втрати теплоносія. У випадку, коли працював лише насос малої потужності, за рахунок малої витрати теплоносія, та значного тепловиділення касет (5 кВт/касету,) вода, що залишалася в баку закипала;

– наявність лише двох напрямних для кришки баку призвело до перекосу кришки при спробі її підйому;  
 – паливо перебувало в режимі експлуатації А невизначену кількість часу, що призвело до його перегріву та пошкодження;  
 – відсутні програми протиаварійних тренувань для персоналу, що брав участь в експлуатації баку.  
 Основним фактором, що призвів до руйнування тридцяти паливних касет, було їх високе залишкове енерговиділення. Таким чином виникає завдання обґрунтування визначення цього параметру для уникнення подібних помилок в майбутньому.

**Метою роботи** є визначення, оптимального підходу до визначення залишкового енерговиділення касет, що знаходяться на промивці в баці очистки Framatome.

**Викладення основного матеріалу**

Обраний метод розрахунку заснований на визначенні кількості тепла, що виділяється в результаті одного акту поділу.

**Продукти поділу**

Залежна від часу кількість теплоти, що виділяється при одному поділі визначається як сумарне значення за дев'ятьма групами:

$$f_i(t) = \sum_{j=1}^9 \alpha_{ij} e^{-\lambda_{ij}t}; \tag{1}$$

Де  $t$  – час після зупини реакторної установки, а коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  та  $\lambda_{ij}$  – константи, значення яких залежить від подільного ізотопу  $i$ . Результати виконаного розрахунку за формулою (1) наведені в таблиці 1.

$$f_{235}(t) = \sum_{j=1}^9 \alpha_{ij} e^{-\lambda_{ij}t} = 1,8523 * 10^{-7} * e^{-6,6332*10^{-7}} + 2,6592 * 10^{-8} * e^{-1,2281*10^{-7}} +$$

$$+ 2,2365 * 10^{-9} * e^{-2,7163*10^{-8}} + 8,9582 * 10^{-12} * e^{-3,2955*10^{-9}} + 8,5968 * 10^{-11} * e^{-7,4225*10^{-10}} +$$

$$+ 2,1072 * 10^{-14} * e^{-2,4681*10^{-10}} + 7,1219 * 10^{-16} * e^{-1,5596*10^{-13}} + 8,1126 * 10^{-17} * e^{-2,2573*10^{-14}} +$$

$$+ 9,4678 * 10^{-17} * e^{-2,0503*10^{-14}} = 2,581 * 10^{10} \text{ MeB/c}$$

Таблиця 1 – Кількість теплоти, що виділяється при поділі нукліда  $i$ , та їх сумарне значення

$f_{235}(t)$ , MeB/c	$f_{239}(t)$ , MeB/c	$f_{238}(t)$ , MeB/c	$f_{241}(t)$ , MeB/c
1,031E-34	4,824E-34	1,508E-33	7,649E-55
2,392E-13	1,141E-13	1,180E-13	2,085E-33
1,711E-10	2,717E-10	2,261E-10	7,152E-14
6,559E-12	3,927E-11	1,475E-11	3,728E-10
8,014E-11	5,359E-11	5,912E-11	2,162E-11
2,059E-14	3,754E-14	4,064E-14	4,944E-11
7,122E-16	1,803E-16	5,329E-16	4,724E-14
8,113E-17	1,834E-15	1,669E-18	9,851E-16
9,468E-17	1,988E-16	4,106E-16	1,308E-16
Σ, MeB/c			
2,581E-10	3,648E-10	3,001E-10	4,440E-10

Вираз  $f(t)$ , може бути проінтегрований. В якості прикладу, нижче, наведено рішення для  $U^{235}$ . Для інших ізотопів результати наведені в таблиці 2:

Таблиця 2 - Розрахунок  $F_i(t;T)$

$F_{235}(t,T)$ , MeB/c	$F_{239}(t,T)$ , MeB/c	$F_{238}(t,T)$ , MeB/c	$F_{241}(t,T)$ , MeB/c
1,555E-28	7,469E-28	2,381E-27	6,762E-49
1,948E-06	8,898E-07	9,159E-07	3,311E-27
6,139E-03	1,044E-02	8,551E-03	5,439E-07
7,148E-04	2,477E-03	1,143E-03	1,480E-02
1,030E-02	6,888E-03	7,597E-03	1,632E-03
2,734E-06	4,985E-06	5,397E-06	6,356E-03
9,617E-08	2,435E-08	7,196E-08	6,273E-06
1,095E-08	2,477E-07	2,254E-10	1,330E-07
1,278E-08	2,685E-08	5,544E-08	1,766E-08
Σ, MeB/c	Σ, MeB/c	Σ, MeB/c	Σ, MeB/c
1,716E-02	1,981E-02	1,730E-02	2,279E-02

$$\begin{aligned}
 F_i(t; T) &= \sum_{j=1}^9 \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij}t}) e^{-\lambda_{ij}t} = \\
 &= \frac{1,8523 * 10^{-7}}{6,6332 * 10^{-7}} (1 - e^{-6,6332 * 10^{-7} * 27129600}) * e^{-6,6332 * 10^{-7} * 243466560} = \\
 &= \frac{2,6592 * 10^{-8}}{1,2281 * 10^{-7}} (1 - e^{-1,2281 * 10^{-7} * 27129600}) * e^{-1,2281 * 10^{-7} * 243466560} = \\
 &= \frac{2,2356 * 10^{-9}}{2,7163 * 10^{-8}} (1 - e^{-2,7163 * 10^{-8} * 27129600}) * e^{-2,7163 * 10^{-8} * 243466560} = \\
 &= \frac{8,9582 * 10^{-12}}{3,2955 * 10^{-9}} (1 - e^{-3,2955 * 10^{-9} * 27129600}) * e^{-3,2955 * 10^{-9} * 243466560} = \\
 &= \frac{8,5968 * 10^{-11}}{7,4225 * 10^{-10}} (1 - e^{-7,4225 * 10^{-10} * 27129600}) * e^{-7,4225 * 10^{-10} * 243466560} = \\
 &= \frac{2,1072 * 10^{-14}}{2,4881 * 10^{-10}} (1 - e^{-2,4681 * 10^{-10} * 27129600}) * e^{-2,4681 * 10^{-10} * 243466560} = \\
 &= \frac{7,1219 * 10^{-16}}{1,5596 * 10^{-13}} (1 - e^{-1,5596 * 10^{-13} * 27129600}) * e^{-1,5596 * 10^{-13} * 243466560} = \\
 &= \frac{8,1126 * 10^{-17}}{2,2573 * 10^{-14}} (1 - e^{-2,2573 * 10^{-14} * 27129600}) * e^{-2,2573 * 10^{-14} * 243466560} = \\
 &= \frac{9,4678 * 10^{-17}}{2,0503 * 10^{-14}} (1 - e^{-2,0503 * 10^{-14} * 27129600}) * e^{-2,0503 * 10^{-14} * 243466560} = \\
 &= 2,037 * 10^{-71} = \left( \frac{\text{MeV}}{\text{поділ}} \right); \tag{3}
 \end{aligned}$$

Коефіцієнти  $\alpha_{ij}$  та  $\lambda_{ij}$  для дев'яти груп для кожного з подільних нуклідів наведені в таблиці 1 [1]. В таблиці 2 [1] наведено рекомендовані значення енергії, що виділяється при одному акті поділу. Історії опромінення враховується серією  $m$  паливних касет різного року експлуатації  $k$ , кожен з яких характеризується потужністю  $S_{ik}$  для кожного елемента та іншими параметрами.

Для отримання необхідних характеристик, що стосуються кожного паливного завантаження (ПЗ) було проаналізовано 5 звітів ПЗ другого енергоблоку Рівненської АЕС [3] – [7], де експлуатуються такі ж реакторні установки як і на АЕС Пакш. Отримані для касет ПЗ №40 дані зведені в таблицю 3. Єдина відмінність між РУ полягає в тому, що в результаті виконаних модернізацій, потужність енергоблоків в Угорщині була збільшена до 500 МВт [8], проте це відбулося після інциденту.

Таблиця 3 – Характеристики паливних завантажень

№	Параметри			
	Рік експлуатації касети, $k_n$	Вигорання, $V_{kn}$	Тривалість опромінення, $T_{kn}$	Час після зупину РУ, $t_{kn}$
$k_1$	12,8	27129600	243466560	40764,33
$k_2$	12,4	26464320	186416640	40463,19
$k_3$	11	26663040	156297600	35644,85
$k_4$	9,2	26870400	125971200	29581,99
$k_5$	2,9	27907200	94608000	9182,66

Повне тепловиділення внаслідок поділу визначається як сума усіх інтервалів опромінення та подільних ізотопів, за наступною формулою:

$$P_F(t; T) = \sum_{i=1}^4 \sum_{k=1}^m \left[ \frac{S_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^9 \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij}t_k}) e^{-\lambda_{ij}t_k} \right]; \tag{4}$$

Де індикатори  $i=1, 2, 3$  та  $4$  відповідають поділу  $U^{235}$ ,  $Pu^{239}$ ,  $U^{238}$ ,  $Pu^{241}$ . Для розрахунку (4) необхідно знайти  $S_{ik}$  та  $S_k$  за формулами (5) та (6), відповідно. Нижче, в якості прикладу, наведено розрахунок формул (5) та (6) для  $U^{235}$ . Результати для інших нуклідів наведено в таблиці 4.

$$S_{ik} = S_k * \frac{S_i}{S} = 40764,3 * 7,808 * 10^{-1} = 31830,4 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right); \tag{5}$$

Де  $S_k/S$  – відносна частка потужності, що визначається як функція від початкового збагачення та вигорання палива (Таблиця 3 [1]). Середня потужність для касети  $k$  визначається з врахуванням вигорання палива –  $B_k$ , та часу опромінення  $T_k$ :

$$S_k = \frac{8,64 * 10^{10} * B_k}{T_k} = \frac{8,64 * 10^{10} * 12,8}{27129600} = 40764,3 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right); \quad (6)$$

Одиницями вимірювання вигорання є МВт\*діб/кгU. Коефіцієнт  $8,64*10^{10}$  вводиться для переведення цього значення в Вт/кгU.

Таблиця 4 – Розраховані значення середньої потужності для касет кожного з років експлуатації та для кожного з нуклідів

k	$S_k$ , Вт/кгU	$S_{235k}$ , Вт/кгU	$S_{239k}$ , Вт/кгU	$S_{238k}$ , Вт/кгU	$S_{241k}$ , Вт/кгU
1	4,076E+04	3,183E+04	6,217E+03	2,521E+03	1,957E+02
2	4,048E+04	2,290E+04	1,296E+04	2,865E+03	1,763E+03
3	3,564E+04	1,474E+04	1,475E+04	2,823E+03	3,329E+03
4	2,958E+04	8,979E+03	1,407E+04	2,546E+03	3,990E+03
5	9,183E+03	2,267E+03	4,646E+03	8,379E+02	1,432E+03

Розраховані значення вкладників для величини  $P_F(t; T)$ , а саме  $\frac{S_{ik}}{Q_i} \sum_{j=1}^9 \frac{\alpha_{ij}}{\lambda_{ij}} (1 - e^{-\lambda_{ij} T_k}) e^{-\lambda_{ij} t_k}$  наведено в таблиці 5.

Таблиця 5 - Результати розрахунку вкладників  $P_F(t; T)$

k	$P_F$ , Вт/кгU				$\Sigma$
	$U^{235}$	$Pu^{239}$	$U^{238}$	$Pu^{241}$	
1	3,293E-01	4,543E-02	1,977E-02	1,388E-03	3,959E-01
2	2,666E-01	1,286E-01	2,805E-02	1,822E-02	4,415E-01
3	2,019E-01	1,999E-01	3,559E-02	4,940E-02	4,868E-01
4	1,613E-01	2,925E-01	4,670E-02	9,536E-02	5,959E-01
5	6,440E-02	1,726E-01	2,653E-02	6,338E-02	3,269E-01

Тоді, підставивши всі невідомі параметри в (4) маємо:

$$P_F(t; T) = 0,3959 + 0,4415 + 0,4868 + 0,5959 + 0,3269 = 2,247 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

#### Захоплення нейтронів продуктами поділу

При виконанні розрахунку в попередньому розділі не було враховано захоплення нейтронів продуктами поділу, що неодмінно відбувається при опроміненні палива в реакторі.

Оскільки результатом поглинання є утворення нестабільних нуклідів, кількість виділеної теплоти під час розпаду збільшується.

Ізотоп Cs-134 не утворюється в результаті прямого поділу, оскільки ланцюг розпаду завершується стабільним Xe-134, проте його наявність може мати значний внесок в кінцеве значення тепловиділення. В такому випадку єдиним шляхом його утворення є захоплення нейтрону ізотопом Cs-133.

Оскільки Cs-134 є домінуючим нуклідом з точки зору тепловиділення, в посібнику він розглянутий відповідно до методології розробленої в ISO 10645:1992. Внесок усіх інших нуклідів враховано застосуванням, відповідного поправочного коефіцієнту.

#### Внесок Cs-134

Кількість теплоти, що виділяється при розпаді Cs-134, внаслідок захоплення нейтрона Cs-133, визначається за формулою:

$$P_C(t; T) = YE\lambda_4 \frac{S}{Q} \left[ \frac{1 - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \phi) T}}{\lambda_4 + \sigma_4 \phi} + \frac{e^{-\sigma_3 \phi T} - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \phi) T}}{\sigma_3 \phi - (\lambda_4 + \sigma_4 \phi)} \right] e^{-\lambda_4 t}; \quad (7)$$

Де  $S/Q$  визначається за наступною формулою:

$$\frac{S}{Q} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^4 \frac{S_{ik}}{Q_i} T_k; \quad (8)$$



Для знаходження суми необхідно розрахувати вирази  $\frac{S_{ik}}{Q_i} T_k$  для кожного нукліду для касети кожного з років експлуатації. Нижче, в якості прикладу, наведено розрахунок для  $U^{235}$ . Результати розрахунку для інших ізотопів та, сумарні значення, для касет інших років експлуатації наведено в таблиці 6.

$$\frac{S_{ik}}{Q_i} T_k = \frac{31830}{202} * 27129600 = 4,275 * 10^9; \quad (9)$$

Таблиця 6 – Результати розрахунку комплексу  $\frac{S_{ik}}{Q_i} T_k$  для 4-ох ізотопів для касети кожного з років експлуатації

k	(S <sub>235k</sub> /Q <sub>235</sub> )*T <sub>k</sub>	(S <sub>239k</sub> /Q <sub>239</sub> )*T <sub>k</sub>	(S <sub>238k</sub> /Q <sub>238</sub> )*T <sub>k</sub>	(S <sub>241k</sub> /Q <sub>241</sub> )*T <sub>k</sub>
1	4,275E+09	7,987E+08	3,328E+08	2,484E+07
2	3,000E+09	1,624E+09	3,689E+08	2,184E+08
3	1,946E+09	1,862E+09	3,663E+08	4,154E+08
4	1,194E+09	1,790E+09	3,330E+08	5,017E+08
5	3,132E+08	6,139E+08	1,138E+08	1,870E+08
	Σ	Σ	Σ	Σ
	1,073E+10	6,688E+09	1,515E+09	1,347E+09

Отже виконавши підстановку в (8) маємо:

$$\frac{S}{Q} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \sum_{i=1}^4 \frac{S_{ik}}{Q_i} T_k = \frac{1}{135034560} * (1,073 * 10^{10} + 6,688 * 10^9 + 1,515 * 10^9 + 1,347 * 10^9) = 150,17;$$

Інші константи, що використовуються в формулі для визначення  $P_c(t; T)$ , наведено в таблиці 7

Таблиця 7 – Константи для розрахунку  $P_c(t; T)$

Константа	Значення	Опис
Y	6,83%	Ефективний вихід Cs-133 на один поділ
λ <sub>4</sub>	1,07E-08 1/с	Става розпаду Cs-134
σ <sub>3</sub>	11,3 барн	Середній (n;γ) переріз для Cs-133
σ <sub>4</sub>	10,9 барн	Середній переріз поглинання Cs-134
E	1,720 МеВ	Енергія, що виділяється при поділі Cs-134

В якості прикладу буде розраховано нейтронний потік для касети п'ятого року експлуатації. Результати розрахунку для касет інших років експлуатації наведені в таблиці 8.

$$\phi_k = \frac{S_k}{\alpha} * 2,58 * 10^{10} = \frac{S_k}{\alpha} * 2,58 * 10^{10} = \frac{9182,7}{3} * 2,58 * 10^{10} = 7,9 * 10^{13} \left( \frac{1}{\text{см}^2 * \text{с}} \right);$$

Де α – ефективне збагачення, що можна розрахувати з дійсного значення збагачення по  $U^{235}$  у всій кількості урану, використовуючи формулу:

$$\alpha = \left( \frac{E_s}{2} \right) + 1 = \left( \frac{4}{2} \right) + 1 = 3(\%);$$

Аналітичний вираз застосовний до опромінення касети кожного з років експлуатації потоком  $\phi_k$  та тривалістю  $T_k$ . Для опромінення усіх касет потік визначається як середнє значення. Після визначення усіх вкладників (таблиця 8), отримаємо:

$$\phi = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m \phi_k T_k = \frac{1}{135034560} * (9,511 * 10^{21} + 9,214 * 10^{21} + 8,173 * 10^{21} + 6,836 * 10^{21} + 2,204 * 10^{21}) = 2,66 * 10^{14} \left( \frac{1}{\text{см}^2 \text{с}} \right);$$

Таблиця 8 – Результати розрахунку  $\phi_k$  та добутку  $\phi_k T_k$  для усіх паливних завантажень

k	$\phi_k, 1/\text{см}^2 \cdot \text{с}$	$\phi_k * T_k, 1/\text{см}^2$
1	3,506E+14	9,511E+21
2	3,482E+14	9,214E+21
3	3,065E+14	8,173E+21
4	2,544E+14	6,836E+21
5	7,897E+13	2,204E+21

Розрахунок  $P_C(t; T)$ :

$$P_C(t; T) = YE\lambda_4 \frac{S}{Q} \left[ \frac{1 - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \phi)T}}{\lambda_4 + \sigma_4 \phi} + \frac{e^{-\sigma_3 \phi T} - e^{-(\lambda_4 + \sigma_4 \phi)T}}{\sigma_3 \phi - (\lambda_4 + \sigma_4 \phi)} \right] e^{-\lambda_4 t} =$$

$$= 0,0683 * 1,720 * 1,07 * 10^{-8} * 150,17 *$$

$$* \left[ \frac{1 - e^{-(1,07 * 10^{-8} + 10,9 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{-14}) * 135034560}}{1,07 * 10^{-8} + 10,9 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{-14}} + \right.$$

$$\left. + \frac{e^{-11,3 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{14} * 135034560} - e^{-(1,07 * 10^{-8} + 10,9 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{-14}) * 135034560}}{11,3 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{14} - (1,07 * 10^{-8} + 10,9 * 10^{-24} * 2,66 * 10^{-14})} \right] *$$

$$* e^{-1,07 * 10^{-8} * 94608000} = 0,957 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

#### Внесок інших нуклідів

Внесок від захоплення нейтронів, за виключенням Cs-133, визначається з використанням табульованих факторів, що надані в таблиці 4 [1], як функція від часу після зупину. Загальний внесок може бути розрахований за наступною формулою:

$$P_E(t; T) = H(t) * P_F(t; T) = 0,027381 * 2,247 = 0,0615 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

#### Актиніди

Тепловиділення від актинідів, може бути розраховане як сума внесків Америція (Am241), Кюрія (Cm242, Cm244) та Плутонія (Pu238, Pu239, Pu240, Pu241). Ці сім елементів займають більше ніж 99,5% загального внеску від актинідів від 30 діб до 200 років після розпаду. Залежний від часу, внесок тепловиділення від розпаду актинідів, за час t після поділу може бути розрахований за наступною формулою:

$$P'_A(t) = \sum_{n=1}^7 \hat{\beta}_n e^{-\lambda_n t}; \quad (10)$$

Де:

- Індекс n відповідає кожному актиніду;
- $\lambda_n$  – стала розпаду актиніду n;
- $\hat{\beta}_n$  – коефіцієнт, що розраховується за формулою:

$$\hat{\beta}_1 = \beta_1 - \beta_2 \frac{E_1}{E_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} = 0,013465 - 0,005633 * \frac{5,629}{5,361 * 10^{-3}} *$$

$$* \frac{5,078 * 10^{-11}}{5,078 * 10^{-11} - 1,531 * 10^{-09}} = 0,21637 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

$$\hat{\beta}_2 = \beta_2 \left[ 1 + \frac{E_1}{E_2} \frac{\lambda_1}{\lambda_1 - \lambda_2} \right] = 0,005633 * \left[ 1 + \frac{5,629}{5,361 * 10^{-3}} * \right.$$

$$\left. * \frac{5,078 * 10^{-11}}{5,078 * 10^{-11} - 1,531 * 10^{-09}} \right] = -0,1973 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Для актинідів з n=3...7, коефіцієнт  $\beta_n = \hat{\beta}_n$  і визначаються з таблиці 5 [1]. Отримані значення наведені в таблиці 9.  $E_1$  – теплова енергія, що виділяється за поділ Am<sup>241</sup> – 5,629 MeV та  $E_2$  – теплова енергія що виділяється на один поділ Pu<sup>241</sup> – 5,361\*10<sup>-3</sup> MeV. В таблиці 5 [1] наведено перелік коефіцієнтів  $\hat{\beta}_n$  для палива водо-водяних реакторів в залежності від початкового збагачення  $E_s$  та акумульованого значення вигорання –  $V_k$ . Для розрахунку  $P'_A(t)$ , доцільно розрахувати окремі вирази  $\hat{\beta}_n e^{-\lambda_n t}$  для кожного актиніду (Таблиця 9).

Таблиця 9 - Інтерпольовані та розраховані значення для семи актинідів

Актинід n	$\beta_n$	$\hat{\beta}_n$	$\hat{\beta}_n e^{-\lambda_n t}$
Am-241	1,347E-02	2,164E-01	2,153E-01
Pu-241	5,633E-03	-1,973E-01	-1,707E-01
Pu-240	2,087E-02	2,087E-02	2,086E-02
Pu-239	1,159E-02	1,159E-02	1,159E-02
Pu-238	2,623E-01	2,623E-01	2,562E-01
Cm-244	3,155E-01	3,155E-01	2,813E-01
Cm-242	4,635E+00	4,635E+00	4,399E-02

Підставивши отримані величини в (10) отримаємо:

$$P'_A(t) = \sum_{n=1}^7 \hat{\beta}_n e^{-\lambda_n t} = 2,153 * 10^{-1} + (-1,707 * 10^{-1}) + 2,086 * 10^{-2} + 1,159 * 10^{-2} + 2,562 * 10^{-1} + 2,813 * 10^{-1} + 4,399 * 10^{-2} = 0,659 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Коефіцієнт  $\beta_n$  відображає ефективну швидкість теплоти розпаду від кожного актиніду, екстрапольовану на час розпаду. Середня потужність, що була використана для отримання коефіцієнтів з таблиці 5 [1] складає 20 кВт/кгU. Теплова потужність від розпаду актинідів зростає зі зменшенням питомої потужності при зупині більше як 30 діб тому. Залежний від часу, внесок тепловиділення від розпаду актинідів, за час t після поділу повинен бути розрахований з поправкою для врахування змін питомої потужності в діапазоні від 12 до 50 кВт/кгU:

$$P_A(t) = P'_A(t) * 1,82 * [S_{avg}]^{-0,06} = 0,659 * 1,82 * [30946,3]^{-0,06} = 0,645 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Де середню потужність –  $S_{avg}$ , визначається за формулою:

$$S_{avg} = \frac{1}{T} \sum_{k=1}^m S_k T_k = \frac{1}{135034560} * (1,106 * 10^{12} + 1,071 * 10^{12} + 9,504 * 10^{11} + 7,949 * 10^{11} + 2,563 * 10^{11}) = 30946,3 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Варто зауважити, що одиницями виміру потужності для визначення  $\hat{\beta}_n$  є Вт/кгU. Для часу витримки менше ніж 3 роки та робочої потужності більше ніж 30 кВт/кгU, застосування поправочного коефіцієнту вносить деякий консерватизм (до 15%) до оцінки внеску тепловиділення від розпаду актинідів. Однак в зазначеному періоді витримки, внесок тепловиділення від поділу актинідів в загальне значення складає менше 20%. Таким чином надмірний консерватизм нівелюється.

#### Активация конструкційних матеріалів

Тепловиділення, що вноситься від активації конструкційних елементів зазвичай значно менше, якщо порівнювати з попередніми вкладниками і може становити лише декілька відсотків від кінцевого значення. Розраховується за формулою:

$$P_S(t; T) = A(t)P_F(t; T) = 0,060032 * 2,247 = 0,135 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Де величина A(t) визначається з таблиці 4 [1].

#### Фактори безпеки

Застосування додаткового фактору безпеки обґрунтовано врахуванням деяких невизначеностей в значеннях тепловиділення, що отримані за допомогою методів наведених в [1]. Даний коефіцієнт можна отримати з таблиці 4 [1], в залежності від часу витримки. Вплив невизначеність визначається шляхом порівняння прогнозованих значень та показів калориметра в діапазоні експериментальних даних. В підсумку порівняння було виявлено, що невизначеність відносно мала і застосування вищенаведених методів дає консервативні оцінки тепловиділення.

Фактори безпеки відіграють роль додаткової статистичної поправки, щоб гарантувати, що результати отримані при виконанні розрахунку відповідно до [1] є консервативними відносно 95% даних при 95% довірчому рівні. Також враховано і потенційну неконсервативність, що може виникати внаслідок інтерполяції та інших апроксимацій, що виконуються відповідно до методики проведення розрахунку.

**Кінцеве значення тепловиділення**

Значення повного тепловиділення без врахування фактора безпеки можна отримати за формулою:

$$P_T(t; T) = P_F(t; T) + P_C(t; T) + P_E(t; T) + P_A(t; T) + P_S(t; T) = \\ = 2,247 + 0,975 + 0,0615 + 0,645 + 0,135 = 4,04 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right);$$

Де:

- $P_F(t; T)$  – тепловиділення при розпаді продуктів поділу (не враховуючи захоплення нейтронів);
- $P_C(t; T)$  – тепловиділення при захопленні нейтронів Cs-134;
- $P_E(t; T)$  – тепловиділення при захопленні нейтронів іншими продуктами поділу;
- $P_A(t; T)$  – тепловиділення при розпаді актинідів;
- $P_S(t; T)$  – тепловиділення при активації конструкційних елементів.

З врахуванням фактору безпеки отримуємо кінцеве значення тепловиділення:

$$P'_T(t; T) = P_T(t; T) * F_S(t) = 4,04 * 1,02 = 4,13 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{кгU}} \right) = 4130 \left( \frac{\text{Вт}}{\text{тU}} \right).$$

Для порівняння, варто зауважити, що результати для аналогічного періоду витримки, касети п'ятого року експлуатації, відповідно до [2], складають 4697 Вт/тU, тобто результат за СОУ НАЕК 197:2020 є більш консервативними в даному випадку. Проте, якщо порівнювати касети від першого до четвертого років експлуатації, отримуємо протилежні результати.

**Висновок**

Досвід застосування технології промивки касет реактора ВВЕР-440 на АЕС Пакш засвідчив недостатність обґрунтування безпеки в аварійному режимі, пов'язаному із відсутністю циркуляції теплоносія по трубопроводах баку від Framatome. Через недостатнє відведення тепла в даному режимі для обґрунтування безпеки при промивці, необхідно оцінити час випаровування води, оскільки таке явище фазового переходу призводить до оголення паливних касет та руйнування конструкцій під дією високих температур. При виконанні теплогідравлічного аналізу для розрахунку такого часу, значення залишкового енерговиділення є ключовим фактором, який повинен бути врахований та матиме найбільший вплив на дотримання критеріїв прийнятності.

Наразі для визначення залишкового енерговиділення можна користуватися спрощеними формулами (Вея-Вігнера, Уінтермайра-Велса), що мають дуже велику похибку (50%) або даними СОУ НАЕК 197:2020 [2].

Стандарт СОУ НАЕК 197:2020 містить результати розрахунку залишкового енерговиділення, отримані із застосуванням пакету програм SCALE із відповідними бібліотеками нейтронно-фізичних характеристик для конкретного типу палива, проте, такий підхід не дозволяє врахувати історію паливних завантажень, реальну історію вигорання для кожної окремої касети та тривалість планово-попереджувальних ремонтів (ППР), що є невід'ємною складовою безпечної та тривалої експлуатації обладнання атомної електростанції. Ще одним суттєвим недоліком зазначеного документу є відсутність розрахованих значень для всієї номенклатури палива, зокрема, наразі, тепловиділяючих збірок виробництва Westinghouse, що є критичним аспектом, з огляду на перехід українських АЕС на паливо цього виробника. Зазначені недоліки мають суттєвий вплив на кінцевий результат.

Розрахунок із застосуванням пакету програм SCALE з урахуванням реальної історії вигорання для кожної окремої касети є надто витратним для реалізації застосування технології під час проведення ППР.

В рамках підготовки статті було розроблено розрахунковий алгоритм з реалізованою методологією [1], що дозволяє отримувати точні значення тепловиділення за короткий проміжок часу, шляхом підстановки вихідних даних для реальних касет.

Відповідно до отриманих результатів, зважаючи на необхідність застосування консервативного підходу відповідно до чинних вимог норм та правил, для забезпечення безпеки при промивці паливних касет в баці очистки Framatome, тепловиділення касет п'ятого року експлуатації, доцільніше розраховувати за методологією, що використовувалась при написанні стандарту СОУ НАЕК 197:2020 [2]. В той же час, залишкове тепловиділення касет від першого до четвертого років експлуатації, варто розраховувати за методологією NRC, що реалізована в основній частині даної статті. Такий підхід дозволить отримувати консервативніші результати та в подальшому використовувати їх для обґрунтування та забезпечення безпеки при промивці паливних касет.

**Список використаної літератури**

- 1.SPENT FUEL HEAT GENERATION IN AN INDEPENDENT SPENT FUEL STORAGE INSTALLATION : RG 05.2022 no. 3.54.
- 2.РАДІАЦІЙНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ І ЗАЛИШКОВЕ ЕНЕРГОВИДІЛЕННЯ ВІДПРАЦЬОВАНИХ ТЕПЛОВИДІЛЯЮЧИХ ЗБІРОК ВВЕР-440 : СОУ НАЕК 197:2020 від 23.03.2020 № 197.

3. Звіт «Обґрунтування безпеки експлуатації завантаження. Основні результати роботи 35 паливного завантаження та фізичних розрахунків 36 паливного завантаження реактора блоку 2 Рівненської АЕС. № 131-530-ЗВ-ВЯБ».

4. Звіт «Обґрунтування безпеки експлуатації завантаження. Основні результати роботи 36 паливного завантаження та фізичних розрахунків 37 паливного завантаження реактора блоку 2 Рівненської АЕС. № 131-545-ЗВ-ВЯБ».

5. Звіт «Обґрунтування безпеки експлуатації завантаження. Основні результати роботи 37 паливного завантаження та фізичних розрахунків 38 паливного завантаження реактора блоку 2 Рівненської АЕС. № 131-555-ЗВ-ВЯБ».

6. Звіт «Обґрунтування безпеки експлуатації завантаження. Основні результати роботи 38 паливного завантаження та фізичних розрахунків 39 паливного завантаження реактора блоку 2 Рівненської АЕС. № 131-572-ЗВ-ВЯБ».

7. Звіт «Обґрунтування безпеки експлуатації завантаження. Основні результати роботи 39 паливного завантаження та фізичних розрахунків 40 паливного завантаження реактора блоку 2 Рівненської АЕС. № 131-602-ЗВ-ВЯБ».

8. International Atomic Energy Agency, 2018. | Series: Proceedings series (International Atomic Energy Agency), Topical issues in nuclear installation safety, ISSN 0074-1884 | Includes bibliographical references. [p. 251].

V. Danilov<sup>1</sup>, master student, ORCID 0009-0000-3070-535X

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

## **SAFETY JUSTIFICATION FOR WASHING BBEP-440 REACTOR FUEL ASSEMBLIES IN THE FRAMATOME CLEANING TANK**

*The primary objective of conducting this research is to obtain a more accurate estimation of the residual heat release from fuel assemblies after their removal from the reactor core and to determine, based on calculation results, the optimal method applicable for assemblies from different years of operation. The application of an advanced methodology [1] proposed by the U.S. Nuclear Regulatory Commission (NRC) enabled the consideration of various heat sources, while the residual heat release calculations in the standards of the SE “NNEGC “Energoatom” employed the SCALE software package, which accounts for the specific characteristics of the fuel. The approach suggested by the NRC allows for the identification of the heat contribution generated by each component, namely: heat release due to actinide decay, neutron capture, activation of structural elements, and fission product decay. The sum of these contributions defines the total heat release of the fuel assembly. The calculations indicated that for assemblies in their fifth year of operation, it is more appropriate to use the NNEGC Standard method, whereas for assemblies from the first to fourth years of operation, the approach proposed by the NRC is preferable. This approach will allow for more conservative results, which can subsequently be used to substantiate safety.*

**Keywords:** Framatome, NRC, decay heat removal, Paks NPP, neutron fission, irradiation, fuel load.

### **References**

1. SPENT FUEL HEAT GENERATION IN AN INDEPENDENT SPENT FUEL STORAGE INSTALLATION: RG 05.2022 no. 3.54.

2. RADIATION CHARACTERISTICS AND RESIDUAL ENERGY RELEASE OF SPENT FUEL ASSEMBLIES OF VVER-440: NNEGC Standard 197:2020 No. 197.

3. Report “Justification of the Safety of the Loading Operation. Main results of 35 fuel loading and physical calculations of 36 fuel loading of Rivne NPP Unit 2. NO. 131-530-Rep.-NSD”.

4. Report “Justification of the Safety of the Loading Operation. Main results of 36 fuel loading and physical calculations of 37 fuel loading of Rivne NPP Unit 2. NO. 131-545-Rep.-NSD”.

5. Report “Justification of the Safety of the Loading Operation. Main results of 37 fuel loading and physical calculations of 38 fuel loading of Rivne NPP Unit 2. NO. 131-555-Rep.-NSD”.

6. Report “Justification of the Safety of the Loading Operation. Main results of 38 fuel loading and physical calculations of 39 fuel loading of Rivne NPP Unit 2. NO. 131-572-Rep.-NSD”.

7. Report “Justification of the Safety of the Loading Operation. Main results of 39 fuel loading and physical calculations of 40 fuel loading of Rivne NPP Unit 2. NO. 131-602-Rep.-NSD”.

8. International Atomic Energy Agency, 2018. | Series: Proceedings series (International Atomic Energy Agency), Topical issues in nuclear installation safety, ISSN 0074-1884 | Includes bibliographical references. [p. 251].

Надійшла: 20.11.2024

Received: 20.11.2024

Є.М. Письменний<sup>1</sup>, д-р техн. наук, проф., ORCID 0000-0001-6403-6596О.І. Руденко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-8541-9710О.П. Ніщик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-1149-1928О.М. Терех<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0002-1320-8594Є.С. Алексєйк<sup>1</sup>, канд. техн. наук., ORCID 0000-0003-4889-8879<sup>1</sup>Національний технічний університет України

“Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського”

## ХАРАКТЕРИСТИКИ МІЦНОСТІ ПЛОСКООВАЛЬНИХ ТРУБ З ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ДЛЯ ДВОФАЗНИХ ТЕРМОСИФОНІВ НИЗЬКОТЕМПЕРАТУРНОГО ДІАПАЗОНУ

*Розвиток та вдосконалення теплообмінних апаратів та систем охолодження і термостабілізації електронної техніки потребує використання нових високоефективних теплопередавальних елементів, які здатні передавати значні теплові потоки при малих габаритних розмірах. Широкого застосування в якості таких елементів набули двофазні термосифони (ДТС). Завдяки простій технології виготовлення, зручній формі та високим теплоаеродинамічним показникам перспективними для використання в якості корпусів ДТС є плоскоовальні труби. При роботі в низькотемпературному діапазоні внутрішній тиск в ДТС може досягати 4 МПа, тому ключовим є питання міцності. Оскільки дані щодо характеристик міцності плоскоовальних труб відсутні, то це питання потребує дослідження.*

*В статті представлено результати експериментальних досліджень характеристик міцності плоскоовальних труб з поздовжнім зварним швом, виготовлених із вуглецевої сталі. Для проведення досліджень із таких труб було виготовлено 3 зразки ДТС, заправлених водою. Внутрішній тиск створювався за рахунок підведення теплоти до ДТС. Його величина визначалась за температурою насичення, яка, в свою чергу, знаходилась за показами термомпар, встановлених на зовнішній поверхні корпусу ДТС.*

*Отримані результати показали, що за температур до 210°C і тисків до 19,074·10<sup>5</sup> Па зміна форми поперечного перерізу ДТС з корпусом із плоскоовальної труби не відбувалась. Збільшення температури та тиску призводило до деформації корпусу ДТС із подальшою його розгерметизацією. При цьому в усіх випадках розгерметизація відбувалась по шву на торці заправного штенгеля. Також були отримані закономірності зміни геометричних розмірів плоскоовальних ДТС в залежності від температури та тиску в графічному вигляді. Отримані дані необхідно враховувати при створенні систем охолодження, термостабілізації та теплообміну на основі плоскоовальних ДТС.*

**Ключові слова:** характеристики міцності, плоскоовальна труба, двофазний термосифон.

### Вступ

Прагнення розробників різноманітних приладів і апаратів до поліпшення їхніх характеристик у багатьох випадках пов'язане зі збільшенням їхньої потужності при умові збереження або мінімізації існуючих габаритних розмірів, наслідком чого є ускладнення конструкції, та підвищенням температури як окремих тепловідільних елементів, так і всього пристрою загалом.

Усуненню зазначених недоліків, як правило, сприяє поява нових ідей, конструктивних рішень, застосування нових матеріалів і технологій. Що ж стосується неминучого при цьому підвищення температури як окремих елементів, так і всього пристрою загалом, то здебільшого вирішення задачі утримання температури в заданих межах є досить складним, а в деяких випадках ця задача не може бути вирішена за допомогою традиційних засобів.

Практичний досвід показує, що хоча наявні пристрої для охолодження (вентилятори, радіатори, теплопровідні шини, термоелектричні модулі та ін.) широко використовуються [1], у багатьох випадках їхнє застосування не завжди доцільне. Це насамперед пов'язано зі збільшенням маси і розмірів охолоджуваного обладнання, збільшенням витрат електроживлення та часу для обслуговування і складністю ремонту засобів охолодження, шумом під час роботи тощо. Тому пошук нових пристроїв або систем, позбавлених цих недоліків і таких, що дають змогу ефективно відводити теплоту, є актуальною задачею.

Аналіз більш ранніх робіт [2-5], а також публікацій останніх років [6-9], направлених на вирішення цієї задачі, показує, що реалізація завдань ефективного відведення теплоти від тепловідільних елементів, забезпечення оптимальних температурних режимів їхньої роботи, їхньої термостабілізації, а також передачі теплоти між теплоносіями та її утилізації, може бути вирішена за допомогою теплопередавальних елементів випаровувально-конденсаційного типу, з яких найпростішими та, відповідно, найдешевшими під час виробництва та в експлуатації є двофазні термосифони (ДТС). Висока теплопередавальна здатність і

низький термічний опір цих пристроїв дають змогу істотно підвищити ефективність систем охолодження, зменшити їхню масу та габарити, а також розв'язувати різні завдання відведення теплоти в обмеженому просторі з метою оптимізації конструктивних рішень різноманітного обладнання з джерелами тепловиділення. Обґрунтоване використання ДТС у багатьох випадках призводить до створення простих за побудовою, але ефективних та надійних систем охолодження та теплообміну, здатних функціонувати автономно в пасивному режимі, тобто без наявності джерел живлення і зовнішнього керування.

Повертаючись до аналізу вищевказаних робіт, необхідно зазначити, що в практиці застосування або досліджень теплотехнічних характеристик ДТС, у якості їхніх корпусів використовувались труби як традиційного круглого поперечного перерізу, так і так звані профільні труби трикутного, прямокутного та іншого поперечного перерізу [1, 3, 6]. Проте застосування профільних труб здійснюється значно рідше, головним чином через значне збільшення металомісткості обладнання з цими трубами, особливо за високих тисків [4]. Тому в більшості випадків перевага надавалась трубам круглого поперечного перерізу як найпоширенішими і найбільш часто вживаними для монтажу, експлуатації або проведення експериментів. При цьому для виготовлення корпусів ДТС у всіх випадках використовувались, як правило, суцільнотягнуті труби.

Відповідно проведеному аналізу асортименту виробів трубокатних підприємств на цей час на ринку доступні профільні труби плоскоовального поперечного перерізу з низьковуглецевої сталі (рис. 1,а). Така форма поперечного перерізу передбачає можливість застосування зварювання як при виготовленні самих труб, так і для прикріплення дискретних сталевих ребер на прямих ділянках їх зовнішньої поверхні (технологію розроблено в КПІ ім. Ігоря Сікорського спільно з ОКТБ ІЕС ім. Є.О. Патона). Застосування зварювання сприяє зменшенню витрат на виготовлення оребрених труб з такою формою поперечного перерізу, причому ця технологічна операція забезпечує практично ідеальний термічний контакт між несучою трубою та оребренням (рис. 1, б).

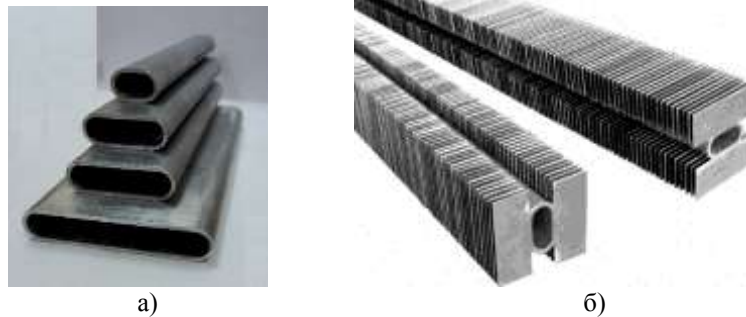


Рисунок 1 - Загальний вигляд плоскоовальних труб: а) без оребрення; б) з поперечним прямокутним оребренням на зовнішніх плоских поверхнях.

Результати досліджень теплоаеродинамічних характеристик таких труб [10-16] і численні приклади їхнього застосування [17-19] засвідчили доцільність використання плоскоовальних труб при виготовленні, наприклад, трубчастих елементів конвективних поверхонь теплообміну, які працюють в умовах підвищених температур і тисків і знайшли широке застосування на низці енергетичних і промислових підприємств України.

У зв'язку з цим, актуальним є питання вивчення можливості використання таких труб у якості корпусів ДТС з урахуванням особливостей, характерних для їхньої роботи в низькотемпературному діапазоні (від - 20 °С до 250 °С) внаслідок відмінностей режимних параметрів функціонування в порівнянні з відомими прикладами застосування плоскоовальних труб, а саме: а) конструктивному виконанні; б) характері та режимах руху робочого середовища; в) параметрах роботи - температурі та тиску. Необхідність визначення можливості застосування труб вказаного профілю в нових умовах функціонування зумовлена тим, що, як впливає, наприклад, з даних [17, 19], температура і тиск води, що рухається в плоскоовальних трубах економайзера-теплоутилізатора, не перевищували 70-80°С і 31,201 - 47,415 кПа, відповідно. В ДТС низькотемпературного діапазону, які є герметичними пристроями, з водою як теплоносієм, температури і тиски можуть досягати 250 °С і близько  $4 \cdot 10^3$  кПа, відповідно, тобто, більш ніж у 3 рази за температурою і більше ніж у 84 рази за тиском. Тому необхідно визначити здатність зварного корпусу ДТС із зазначених профільних труб за таких параметрів теплоносія залишатися герметичним.

Як вже зазначалося вище, для практичного використання або досліджень ДТС застосовувались, як правило, суцільнотягнуті труби круглого поперечного перерізу, для яких є достатньо інформації про їхні характеристики, зокрема і про характеристики міцності. На основі експериментальних даних для таких труб розроблено методику розрахунку напружень, що виникають у стінці корпусу труб за різної температури і тиску, яка дає можливість зробити обґрунтований висновок щодо можливості їхнього застосування як

корпусів ДТС. Що стосується труб плоскоовального профілю, то для них подібних досліджень не проводилося. Крім цього, зварні шви по довжині корпусів ДТС з плоскоовальних труб і в місцях з'єднання торцевих пробок з корпусами ДТС можуть бути найбільш слабкими місцями при їх функціонуванні при підвищеній температурі і, відповідно, тиску. Це пов'язано з тим, що в герметичних корпусах ДТС одночасно переміщуються пара і конденсат, тобто, вони за своїми особливостями функціонування близькі до паропроводів, у яких найслабшими елементами, що визначають їхній ресурс роботи, є саме зварні з'єднання (шви). Тому можна припустити, що і надійність роботи ДТС зі зварними корпусами також буде визначатися головним чином надійністю зварних з'єднань.

Як показує аналіз робіт, присвячених розгляду питань надійності випарувально-конденсаційних пристроїв (ДТС [4], теплові труби [20-22]), інформація в них має більше рекомендаційний характер і ґрунтується, здебільшого, на даних, що стосуються необігрівних посудин, що працюють під тиском [23], або на даних, отриманих після проведення гідравлічних випробувань [24]. Об'єктивна інформація, максимально наближена до умов застосування ДТС на практиці, може бути отримана в результаті експериментальних досліджень, наприклад, [25], даних періодичних випробувань або безпосередньо експлуатаційних даних. У зв'язку з цим, результати дослідження характеристик міцності ДТС з плоскоовальних труб в умовах, наближених до умов їхньої експлуатації, можуть бути корисними для спеціалістів, які займаються проектуванням і розробкою різноманітного теплообмінного обладнання з використанням труб вказаного профілю.

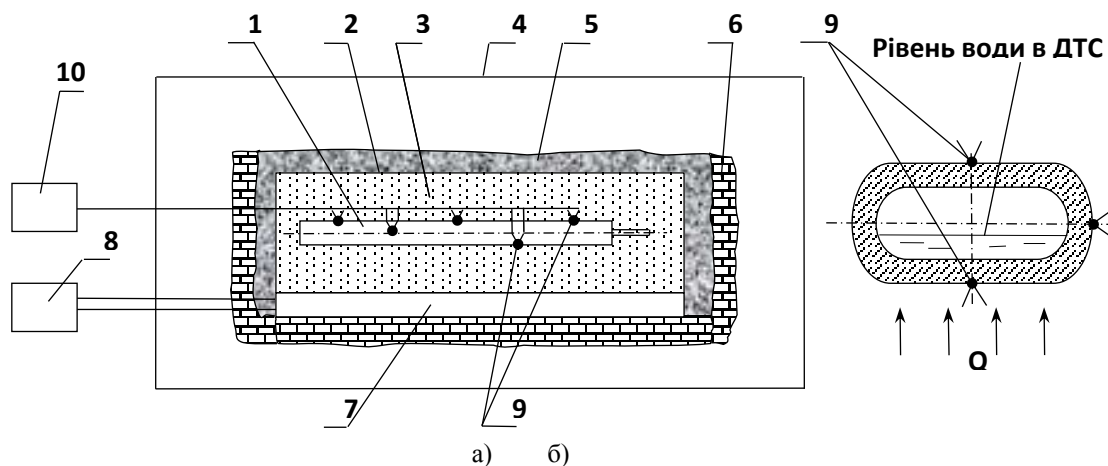
#### Мета роботи

Метою даної роботи є отримання експериментальним шляхом характеристик міцності плоскоовальних труб з поздовжнім зварним швом без оребрення для визначення їхньої придатності до використання в якості корпусів низькотемпературних ДТС, а також в іншому теплообмінному устаткуванні.

#### Метод досліджень

Дослідження проводилися з трьома ДТС, виготовленими з вуглецевої сталі 08кп. Геометрія плоскоовальної труби корпусів ДТС, їхня довжина і товщина стінки становили 15x30 мм, 220 мм і 1,5 мм, відповідно. Теплоносій - дистильована деаерована вода, обсяг заправки якої становив 30% від внутрішнього об'єму ДТС. Для складання всіх елементів ДТС (торцевих заглушок з корпусом, заправного штенгеля з торцевою заглушкою у зоні конденсації) застосовували аргоно-дугове зварювання. Заправлення ДТС теплоносієм здійснювали під вакуумом через заправний штенгель, який потім перетискали, а утворений при цьому шов холодного зварювання підсилювали шляхом запаювання його припоєм ПСр-37.

Враховуючи, що температура і тиск, за яких може статися розгерметизація корпусів ДТС заздалегідь невідомі, для досліджень була спроектована та виготовлена експериментальна установка з широким діапазоном зміни цих параметрів, принципова схема якої представлена на рис. 2, а. Кожен із досліджуваних ДТС 1 по черзі розміщувався в піддоні 2, засипався дрібнозернистим середовищем 3 (висушений річковий пісок) та встановлювався у випробувальну камеру 4. Зменшення втрат теплоти в навколишнє середовище досягалося за рахунок використання теплоізоляційних шарів базальтового волокна 5 марки БСТВ-1 і вогнетривкої цегли 6. Підведення теплоти до піддону 2 і до встановлених в ньому ДТС 1, здійснювалося омичним нагрівачем 7, живлення до якого підводилося за допомогою регульованого трансформатора 8 (РНО-250-5).



1 – двофазний термосифон; 2 – піддон; 3 – пісок; 4 – випробувальна камера; 5 – теплоізоляція; 6 – вогнетривка цегла; 7 – нагрівач; 8 – регульований трансформатор; 9 – термопари; 10 – вторинний прилад для вимірювання температури

Рисунок 2 - Схема експериментальної установки (а) і розташування термопар (б) на ДТС



Вимірювання температури стінок корпусів ДТС здійснювалось п'ятьма хромель-копелевими термопарами 9, встановленими в різних перетинах по всій довжині ДТС (рис. 2, а, б) і підключеними до вторинного приладу 10 (А 565-002-01). Усі термопари закріплювались на корпусі ДТС пластинками з мідної фольги, які щільно обмотувались ниткою зі скловолокна.

Під час проведення експериментів періодично вимірювалися температурні поля на зовнішній поверхні ДТС, при цьому інтервал між вимірами визначався дослідним шляхом і становив 5 хвилин, а час опитування всіх п'яти термопар не перевищував (10-15) сек. Між вимірами контроль температури здійснювався постійно за однією з термопар. У випадку виходу з ладу цієї постійно діючої термопари, значення поточної температури в інших точках ДТС у вимірюваному проміжку визначалось шляхом екстраполяції на основі даних про зміну температури у цих точках за період часу, коли ДТС ще зберігали свою цілісність.

Температури, за яких відбувалися випробування ДТС, визначали як середні величини:

$$\bar{t}_i = \frac{\sum_{i=1}^5 t_i}{n}, \quad (1)$$

де  $t_i$  - температура поверхні корпусу ДТС у  $i$ - тому перерізі, °С;  $n=5$  - кількість точок вимірювання (термопар), шт.

При цьому допускалося, що середня температура на зовнішній поверхні стінок корпусу кожного ДТС дорівнює температурі пари теплоносія внаслідок адіабатних умов проведення випробувань та малої товщини стінок. Тиск у внутрішній порожнині ДТС як функція  $P=f(t)$  визначався відповідно до рекомендацій [26] на підставі даних про середні температури стінок їхніх корпусів. Настання моменту втрати герметичності корпусів ДТС визначалось за шумовим ефектом (вибухом).

#### Результати та їх обговорення

Для отримання даних про діапазон температури (тиску) вірогідного руйнування з втратою герметичності корпусів ДТС, виготовлених за ідентичною технологією, були проведені попередні випробування одного з трьох термосифонів (ДТС № 2). Відповідно отриманим результатам, розгерметизація цього термосифона сталася за температури 349,88°С, що відповідає тиску  $165,05 \cdot 10^5$  Па. Цей експеримент показав, що внаслідок дії внутрішнього тиску форма і розміри корпусу ДТС № 2 зазнали суттєвих змін. На рис.3 представлено фрагмент поперечного перерізу ДТС № 2 після випробувань, вирізаний з корпусу в середній його частині (рис. 3, б), а також фрагмент поперечного перерізу вихідної плоскоовальної труби (рис. 3, а), з якої були виготовлені корпуси досліджуваних ДТС. Очевидно, що форма поперечного перерізу ДТС 2 під час проведення експерименту змінилася від плоскоовальної (рис.3, а) до овальної з тенденцією до круглої (рис. 3, б). При цьому візуальні дослідження корпусу ДТС № 2 і його перевірка на герметичність показали відсутність будь-яких пошкоджень, поздовжній зварювальний шов на корпусі не зазнав змін і також залишився герметичним, а розгерметизація сталася по шву на торці заправного штенгеля (холодне зварювання та паяння припоєм ПСр-37).

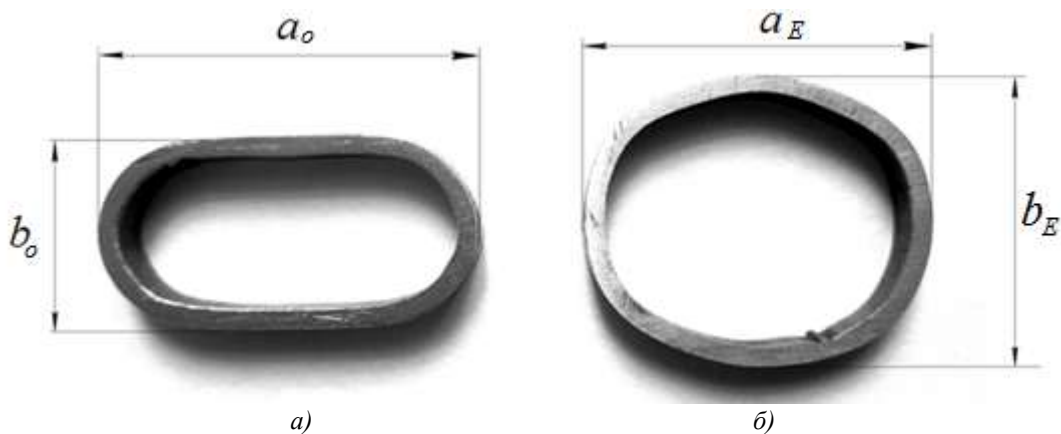


Рисунок 3 - Зміна форми і розмірів поперечного перерізу ДТС № 2: а) до проведення випробувань; б) після його розгерметизації

Наступні випробування, проведені з ДТС № 1 в аналогічних умовах для порівняння з результатами, отриманими для ДТС № 2, показали, що в цьому експерименті втрата герметичності ДТС № 1 відбулася при температурі 373,39°С і тиску  $219,16 \cdot 10^5$  Па, а розгерметизація, як і в ДТС № 2, сталася також в заправному штенгелі в місці запакування торця штенгеля припоєм ПСр-37. Як і в ДТС № 2, в ДТС № 1 відбулося подібне змінювання форми і розмірів поперечного перерізу корпусу в середній його частині без

порушення його герметичності. При цьому сам корпус ДТС № 1 не мав якихось різких викривлень форми і, також як і корпус ДТС № 2, набув подібну конфігурацію завдовжки, за винятком місць, наближених до місця зварювання торцевих заглушок із корпусом (мал.4а,б).

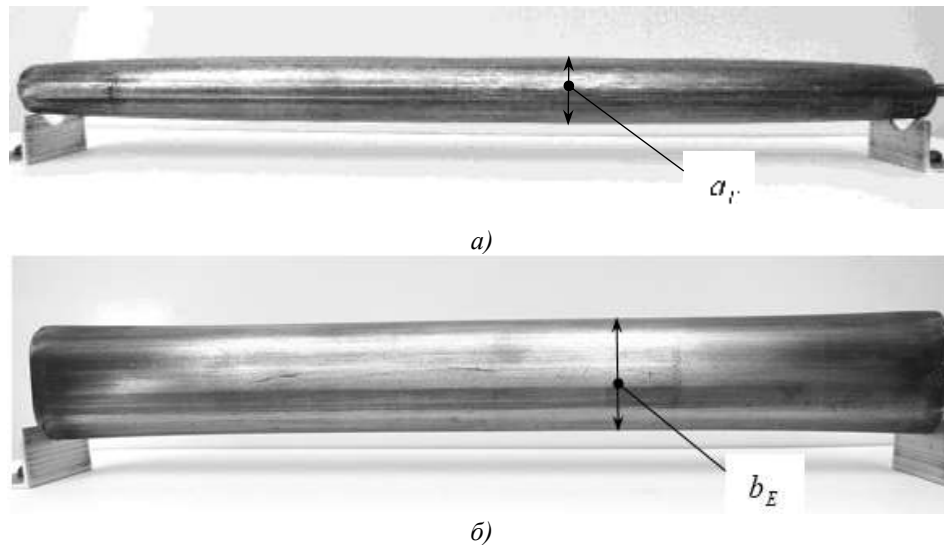


Рисунок 4 - Вигляд ДТС № 1 після випробувань: а) зміни за розміром  $a_E$ ; б) зміни за розміром  $b_E$

Проведені дослідження показали, що зміна форми і розмірів поперечного перерізу корпусів ДТС № 1 і ДТС № 2 безпосередньо пов'язана з температурою і, відповідно, тиском у їхній внутрішній порожнині. Тому, щоб визначити характер і зміни геометричних розмірів термосифонів залежно від зазначених параметрів, під час наступних випробувань з ДТС № 3, було проведено періодичні вимірювання розмірів поперечного перерізу корпусу термосифона в середній частині у двох взаємно перпендикулярних площинах під час його поступового нагрівання. Для цього, починаючи з температури поверхні термосифона приблизно  $80^{\circ}\text{C}$ , через кожні  $50 \pm 2^{\circ}\text{C}$  ДТС № 3 виймали з випробувальної камери, і за допомогою мікрометрів МК 0-25 мм і МК 25-50 мм (ціна поділки 0,01 мм) визначали розміри  $a_E$  і  $b_E$  (див. рис. 3). З огляду на те, що за час проведення вимірювань (приблизно 1-2 хв.) ДТС № 3 дещо охолоджувався, температури, за яких їх проводили,  $t_{ВИМ.i}$  розраховували як середні, зважаючи на дані про температури на початку  $t_{ПОЧ.i}$  і наприкінці  $t_{КИН.i}$  кожного вимірювання:

$$\overline{t_{ВИМ.i}} = \frac{t_{ПОЧ.i} + t_{КИН.i}}{2} \quad (2)$$

При цьому припускали, що за час вимірювань розміри поперечного перерізу практично не змінюються, оскільки в діапазоні температур ( $100 \dots 400^{\circ}\text{C}$ ) коефіцієнт температурного розширення сталі 08кп незначний і складає  $\alpha = (12,5 \dots 14,5) \cdot 10^{-6} / ^{\circ}\text{C}$  [27].

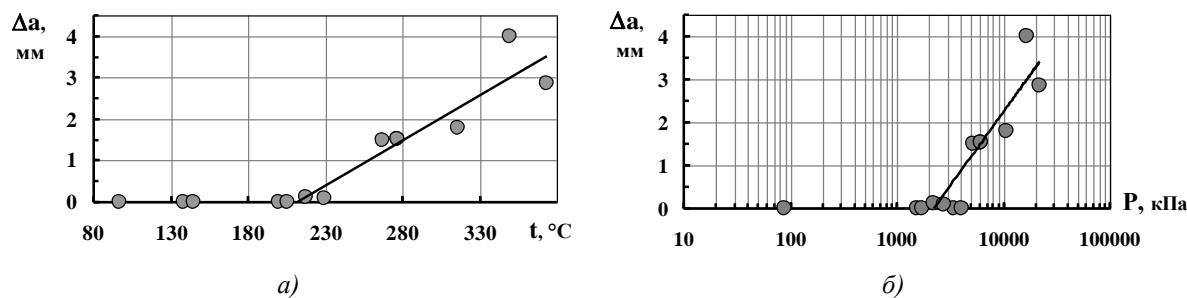
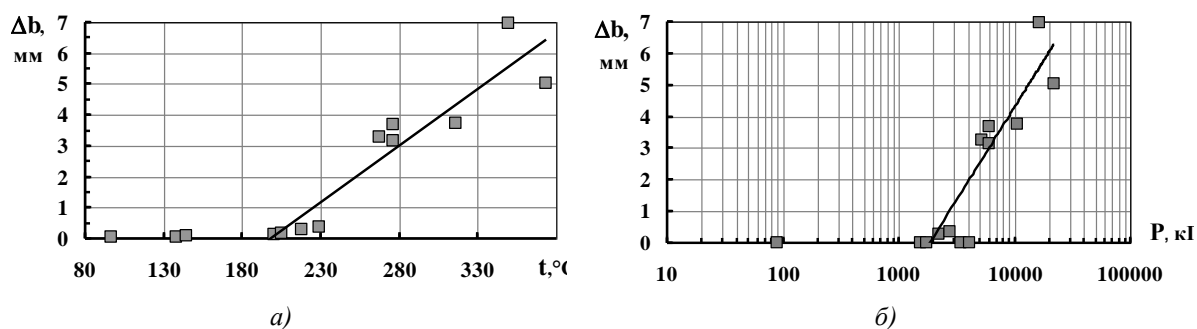
Під час проведення випробувань за такою методикою розгерметизація ДТС № 3 сталася при температурі  $316,18^{\circ}\text{C}$ , що відповідає тиску  $107,24 \cdot 10^5$  Па. Як і в попередніх експериментах з ДТС № 1 і ДТС № 2, втрата герметичності в ДТС № 3 сталася в заправному штенгелі, водночас корпус термосифона не мав жодних ушкоджень, і, як і у випадку з ДТС № 1 і ДТС № 2 прийняв подібну до них форму поперечного перерізу і конфігурацію за довжиною. Найімовірнішою причиною нижчої температури розгерметизації стало те, що вимірювання розмірів ДТС № 3 супроводжувалося неодноразовими циклами нагрівання-охолодження термосифона. Це сприяло тому, що в місці перетискання і паяння припоєм ПСр - 37 у заправному штенгелі могли виникнути залишкові напруження внаслідок різких змін температури і тиску і, відповідно, появи втоми в металі.

Після проведення експериментів з усіма ДТС було проведено порівняння зміни їх розмірів, отриманих після випробувань, з початковими розмірами. На рис. 5, 6 представлено результати такого порівняння у вигляді залежностей:

$$\Delta a = a_0 - a_E = f(t) \quad \text{та} \quad \Delta a = a_0 - a_E = f(P), \quad (3)$$

$$\Delta b = b_E - b_0 = f(t) \quad \text{та} \quad \Delta b = b_E - b_0 = f(P), \quad (4)$$

де:  $a_0, b_0$  - розміри поперечного перерізу корпусів ДТС до початку випробувань, мм.,  $a_E, b_E$  - розміри поперечного перерізу корпусів ДТС після випробувань за температури  $t_{ВИМ.i}$ , мм.

Рисунок 5 - Залежності  $\Delta a=f(t)$  (а) та  $\Delta a=f(P)$  (б)Рисунок 6 - Залежності  $\Delta b=f(t)$  (а) та  $\Delta b=f(P)$  (б)

Очевидно, що отримані дані про зміну розмірів  $\Delta a$  і  $\Delta b$  залежно від температур і тисків перебувають у задовільній відповідності між собою, що підтверджується їхніми близькими значеннями в точках перегину відповідних залежностей для всіх ДТС. Аналіз отриманих результатів показав, що за температур до  $t \approx 210^\circ\text{C}$  і, відповідно, тисків насичених парів теплоносія до  $P \approx 19,074 \cdot 10^5$  Па зміна форми поперечного перерізу ДТС з корпусом із плоскоовальної труби не спостерігалася. Подальше підвищення температури і тиску призводять до зміни форми ДТС і геометрії його поперечного перерізу, що необхідно враховувати при створенні систем охолодження, термостабілізації та теплообміну із застосуванням плоскоовальних ДТС.

Визначені закономірності зміни форми і розмірів поперечного перерізу плоскоовальних труб при дії зсередини на їхні стінки тиску дозволили отримати новий спосіб ущільнення труб та пакетів труб в трубних дошках [28], який може бути використаний при виготовленні різноманітного теплообмінного устаткування.

#### Висновки

Результати проведених досліджень ДТС і подальша їхня перевірка на наявність будь-яких ушкоджень засвідчили, що всі корпуси ДТС в діапазоні температур до  $(316-373)^\circ\text{C}$  зберегли свою герметичність, що дає змогу зробити такі висновки:

1. Застосування плоскоовальних труб зі зварним швом як корпусів ДТС для низькотемпературного діапазону ( $t \leq 250^\circ\text{C}$ ;  $P \leq 4 \cdot 10^3$  кПа) найдоцільніше за температур до  $t \approx 210^\circ\text{C}$  і тисків до  $P \approx 19,074 \cdot 10^5$  Па, тому що за цих параметрів зміни форми поперечного перерізу і втрати герметичності ДТС не відбувається.

2. Отримані дані дають підставу вважати, що плоскоовальні труби для корпусів ДТС можна також використовувати при температурах і тисках, що перевищують низькотемпературний діапазон, тобто, за температур  $250 \leq t \leq 316^\circ\text{C}$  і тисків  $39,76 \cdot 10^5 \leq P \leq 106,98 \cdot 10^5$  Па при застосуванні зварювання під час герметизації заправних штенгелів і урахування зміни форми ДТС і геометрії його поперечного перерізу.

3. Результати, отримані для плоскоовальних труб, виготовлених зварюванням їхніх обичайок, можуть бути також справедливими і для суцільнотягнутих труб аналогічного профілю, що не мають послаблення по довжині корпусу у вигляді повздовжнього шва.

#### Список використаної літератури

1. Николаенко Ю. Е. Схемные решения организации тепловода от функциональных модулей ЭВМ с помощью двухфазных теплопередающих элементов. *Управляющие системы и машины*. 2005. № 2. С. 29–37.

2. Разработка и совершенствование систем охлаждения энерготехнологических агрегатов цветной металлургии на основе использования замкнутых двухфазных термосифонов / М. К. Безродный и др. *Промышленная энергетика*. 1984. № 2. С. 34–37.

3. Семена М. Г., Гершуни А. Н., Руденко А. И. Характеристики двухфазных термосифонов как элементов теплообменников. *Промышленная энергетика*. 1988. № 4. С. 41–44.

4. Пиоро И. Л., Антоненко В. А., Пиоро Л. С. Эффективные теплообменники с двухфазными термосифонами. К.: Наук. думка, 1991. 248 с.
5. Гершуни А. Н., Нищик А. П. Разработка и внедрение эффективных теплоутилизаторов на основе теплопередающих элементов испарительно-конденсационного типа. *Промышленная теплотехника*. 1997. Т. 19, № 6. С. 69–73.
6. Хайрнасоев С. М., Рассемакин Б. М., Быков В. Е. Исследование тепловых режимов среднетемпературного термосифона для систем утилизации теплоты уходящих газов с температурой более 400 °С. *Енергетика: економіка, технології, екологія*. 2014. № 1. С. 89–95.
7. Eidan A. A., Najim S. E., Jalil J. M. Experimental and numerical investigation of thermosyphone performance in HVAC system applications. *Heat and Mass Transfer*. 2016. Vol. 52, no. 12. P. 2879–2893. URL: <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1800-y>
8. Alizadeh M., Ganji D. D. Heat transfer characteristics and optimization of the efficiency and thermal resistance of a finned thermosyphon. *Applied Thermal Engineering*. 2021. Vol. 183. Art. no. 116136. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116136>
9. Gürtürk M., Kale C., Kok B. Investigation of the performance of a new thermosyphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas. *Applied Thermal Engineering*. 2020. Art. no. 116520. URL: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116520>
10. Heat transfer of staggered bundles of flat oval tubes in transverse flow / В. А. Кондратиук та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 1, no. 8(73). P. 43-48. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37318>
11. Analysis of experimental data on aerodynamic drag of flat-oval tube bundles / С. М. Письменний та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2015. Vol. 6, no. 8(78). P. 19-24. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55529>
12. Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in staggered bundles of flat-oval tubes / V. A. Kondratiuk et al. *International Journal of Energy for a Clean Environment*. 2017. Vol. 18, no. 3. P. 189–202. URL: <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2017021912>
13. Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers / Y. V. Zhukova et al. *Heat Transfer Research*. 2020. Vol. 51, no. 15. P. 1383–1397. URL: <https://doi.org/10.1615/heattransres.2020035821>
14. Pis'mennyi E. N. Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units. *Thermal Engineering*. 2012. Vol. 59, no. 6. P. 485–490. URL: <https://doi.org/10.1134/s0040601512060080>
15. Heat transfer of a single drop shaped cylinders in cross flow / О. М. Терех та ін. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2014. Vol. 1, no. 8(67). P. 27-31. URL: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.20066>
16. Zhukova Y. V., Terekh A. M., Rudenko A. I. Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number. *Doklady of the National Academy of Sciences of Belarus*. 2019. Vol. 62, no. 6. P. 756–762. URL: <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>
17. Руденко А. И., Мезенцева О. А., Терех А. М. Эффективность внедрения инновационного энергосберегающего оборудования на предприятиях ЖКХ Украины. *БІЗНЕСІНФОРМ*. 2014. № 3. С. 220–224.
18. Інноваційне енергозберігаюче устаткування для підприємств теплокомунальної енергетики / О. І. Руденко та ін. *Науковий вісник Ужгородського університету. Серія «Економіка»*. 2016. № 2 (48). С. 228–232.
19. Руденко О. І., Мезенцева О. О., Терех О. М. Економічна ефективність інноваційного енергозберігаючого обладнання для енергетичних і промислових підприємств. *Інноваційна економіка*. 2013. № 3 (41). С. 117–120.
20. Воронин Г. И. Низкотемпературные тепловые трубы для летательных аппаратов. М.: Машиностроение, 1976. 200 с.
21. Технологические основы тепловых труб / М. И. Ивановский и др. М.: Атомиздат, 1980. 160 с.
22. Алексеев В. А., Арефьев В. А. Тепловые трубы для охлаждения и термостатирования радиоэлектронной аппаратуры. М.: Энергия, 1979. 128 с.
23. Чи С. Тепловые трубы. Теория и практика. М.: Машиностроение, 1981. 207 с.
24. Дан П., Рей Д. Тепловые трубы. М.: Энергия, 1979. 272 с.
25. Экспериментальное исследование тепловой трубы для космических аппаратов / А. И. Руденко и др. *Промышленная теплотехника*. 2002. Т. 24, № 6.
26. Варгафтик Н. Б. Справочник по теплофизическим свойствам газов и жидкостей. Москва: ГИФМЛ, 1963. 708 с.
27. Шишков М. М. Марочник сталей і сплавів: довідник. вид. 3-є, доповнене. Донецьк, 2000. 456 с.
28. Спосіб закріплення труби в отворі трубної дошки.: пат. 154428 Україна. Опубл. 15.11.2023, Бюл. № 46.

Ye. Pysmenny<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0001-6403-6596

O. Rudenko<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-8541-9710

O. Nishchyk<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-1149-1928

O. Terekh<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-1320-8594

Ye. Alekseik<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4889-8879

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine “Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute”

## STRENGTH CHARACTERISTICS OF CARBON STEEL FLAT-OVAL TUBES FOR TWO-PHASE THERMOSYPHONS OF THE LOW-TEMPERATURE RANGE

*The development and improvement of heat exchangers and systems of cooling and thermal stabilisation of electronic equipment requires the use of new highly efficient heat transfer elements capable of transferring significant heat fluxes with small overall dimensions. Two-phase thermosyphons (TS) are widely used as such elements. As a rule, TS casings are made of round, solid pipes, but alternative profiles, such as flat-oval, are also used to improve the overall dimensions and heat transfer characteristics. Due to their simple manufacturing technology, convenient shape and high thermal and aerodynamic performance, flat-oval tubes have broad prospects for use as TS casings. When operating in the low-temperature range, the internal pressure in the TS can reach 4 MPa, so the key issue when using any pipes as TS casings is strength. Since there is no data on the strength characteristics of flat-oval pipes, this issue needs to be investigated.*

*The paper presents the results of experimental studies of the strength characteristics of flat-oval tubes with a longitudinal weld made of carbon steel. To conduct the research, 3 samples of TS filled with water were made from such pipes. The internal pressure was created by supplying heat to the TS. Its value was determined by the saturation temperature, which, in turn, was determined by the readings of thermocouples installed on the outer surface of the TS casing.*

*The obtained results showed that at temperatures up to 210°C and pressures up to 19,074·10<sup>5</sup> Pa, there was no change in the shape of the cross-section of the TS with a flat-oval tube casing. An increase in temperature and pressure led to deformation of the DTS casing with its subsequent depressurisation. In all cases, the depressurisation occurred along the sealing at the end of the filling tube. Also, the regularities of changes in the geometric dimensions of flat-oval TS depending on temperature and pressure were obtained in graphical form. The data obtained should be taken into account when designing cooling, thermal stabilisation and heat transfer systems based on flat-oval TS.*

**Key words:** strength characteristics, flat-oval tube, two-phase thermosyphon.

### References

1. Y. Y. Nikolaienko, “Schematic solutions of heat removal organisation from the computer functional modules by means of two-phase heat transfer elements”, *Control Syst. Comput.*, № 2, c. 29–37, 2005.
2. M. K. Bezrodnyi, S. S. Volkov, V. B. Ivanov ra V. N. Petrov, “Development and improvement of power technological units cooling systems of non-ferrous metallurgy based on the use of closed two-phase thermosyphons”, *Promyshlennaya Energetika*, № 2, c. 34–37, 1984.
3. M. H. Semena, A. N. Hershuni ra A. I. Rudenko, “Characteristics of two-phase thermosyphons as heat exchanger elements”, *Promyshlennaya Energetika*, № 4, c. 41–44, 1988.
4. I. L. Pioro, V. A. Antonenko ta L. S. Pioro, *Efficient Heat Exchangers With Two-Phase Thermosyphons*. Kyiv: Nauk. Dumka, 1991.
5. A. N. Hershuni ta A. P. Nishchyk, “Development and implementation of efficient heat recovery units based on evaporative-condensation type heat transfer elements”, *Ind. Heat Eng.*, vol. 19, № 6, p. 69–73, 1997.
6. S. M. Khairnasov, B. M. Rassamakin, Y. V. Bykov, “Study of thermal regimes of middle-temperature no-wick heat-pipe for exhaust gases heat recovery systems with temperatures more than 400 °C”, *POWER ENG.: Econ., Technique, Ecol.*, № 1, p. 89–95, 2014.
7. A. A. Eidan, S. E. Najim, J. M. Jalil, “Experimental and numerical investigation of thermosyphone performance in HVAC system applications”, *Heat Mass Transf.*, vol. 52, № 12, p. 2879–2893, March 2016. <https://doi.org/10.1007/s00231-016-1800-y>
8. M. Alizadeh, D. D. Ganji, “Heat transfer characteristics and optimization of the efficiency and thermal resistance of a finned thermosyphon”, *Appl. Thermal Eng.*, vol. 183, p. 116136, Jan. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116136>
9. M. Gürtürk, C. Kale, B. Kok, “Investigation of the performance of a new thermosyphon heat pipe design for applications heat transfer from liquid to gas”, *Appl. Thermal Eng.*, art. no. 116520, Dec. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2020.116520>
10. V. A. Kondratiuk, O. M. Terekh, O. V. Baraniuk, Ye. M. Pysmennyi, “Heat transfer of staggered bundles of flat oval tubes in transverse flow”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 1, № 8(73), p. 43-48, Feb. 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.37318>

11. Ye. M. Pysmennyi, V. A. Kondratiuk, O. M. Terekh, O. I. Rudenko, O. V. Baraniuk, “Analysis of experimental data on aerodynamic drag of flat-oval tube bundles”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 6, № 8(78), p. 19–24, Dec. 2015. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2015.55529>
12. V. A. Kondratiuk, A. M. Terekh, V. A. Rogachov, A. V. Baranyuk, A. I. Rudenko, “Analysis and generalization of the experimental data on heat transfer in staggered bundles of flat-oval tubes”, *Int. J. Energy Clean Environ.*, vol. 18, № 3, p. 189–202, 2017. <https://doi.org/10.1615/interjenercleanenv.2017021912>
13. Y. V. Zhukova, A. M. Terekh, S. A. Isaev, E. N. Pismenny, “Aerodynamic and heat transfer characteristics of an oval-shaped tube at different reynolds numbers”, *Heat Transfer Res.*, vol. 51, № 15, p. 1383–1397, 2020. <https://doi.org/10.1615/heattransres.2020035821>
14. E. N. Pis'mennyi, “Ways for improving the tubular heaters used in gas turbine units”, *Thermal Eng.*, vol. 59, № 6, p. 485–490, May 2012. <https://doi.org/10.1134/s0040601512060080>
15. O. M. Terekh, O. V. Semeniako, O. I. Rudenko, V. A. Kondratiuk, “Heat transfer of a single drop shaped cylinders in cross flow”, *Eastern-Eur. J. Enterprise Technol.*, vol. 1, № 8(67), p. 27–31, Feb. 2014. <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.20066>
16. Y. V. Zhukova, A. M. Terekh, A. I. Rudenko, “Convective heat transfer and drag of two side-by-side tubes in the narrow channel at different Reynolds number”, *Doklady Nat. Acad. Sci. Belarus*, vol. 62, № 6, p. 756–762, Jan. 2019. <https://doi.org/10.29235/1561-8323-2018-62-6-756-762>
17. A. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, A. M. Terekh, “Efficiency of introduction of innovative energy-saving equipment at the enterprises of the housing and utilities sector of Ukraine”, *Bus. Inform.*, № 3, c. 220–224, 2014.
18. O. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, O. M. Terekh, M. M. Vozniuk, “Innovative energy-saving equipment for heat and power companies”, *Scientific Bull. Uzhhorod Univ. Ser. "Econ."*, № 2(48), c. 228–232, 2016.
19. O. I. Rudenko, O. O. Mezentseva, O. M. Terekh, “Economic efficiency of innovative energy-saving equipment for energy and industrial enterprises”, *Innov. Econ.*, № 3 (41), c. 117–120, 2013.
20. G. I. Voronin, *Low Temperature Heat Pipes for Aircrafts*. Moscow: Mashynostroenye, 1976.
21. M. N. Ivanovsky, V. P. Sorokin, B. A. Tchulkov, I. V. Yagodkin, *Heat Pipe Technological Fundamentals*. Moscow: Atomizdat, 1980.
22. V. A. Alekseev, V. A. Arefev, *Heat Pipes for Cooling and Temperature Control of Radio-Electronic Equipment*. Moscow: Enerhyia, 1979.
23. S. W. Chi, *Heat Pipe. Theory and Practice*. Moscow: Mashynostroenye, 1981.
24. P. D. Dunn, D. A. Reay, *Heat Pipes*. Moscow: Enerhyia, 1979.
25. A. I. Rudenko, V. M. Baturkin, S. K. Zhuk, D. N. Olefirenko, “Experimental study of a heat pipe for space vehicles”, *Ind. Heat Eng.*, vol. 24, № 6, 2002.
26. N. B. Varhaftik, *Reference Book on Thermophysical Properties of Gases and Liquids*. Moscow: MEOPML, 1963.
27. M. M. Shyshkov, *Steel and Alloys: A Reference Book. Ed. 3rd, Supplemented*. Donetsk, 2000.
28. Y. M. Pysmennyi, O. I. Rudenko, O. P. Nishchyk, O. M. Terekh, Y. S. Alekseik, L. V. Lipnitskyi, “Method of fixing the pipe in the hole of the pipe board”, Patent of Ukraine 154428, 15 Nov. 2023.

Надійшла: 15.01.2025

Received: 15.01.2025

# ЕНЕРГЕТИЧНІ СИСТЕМИ ТА КОМПЛЕКСИ

## ENERGY SYSTEMS AND COMPLEXES

УДК 621.311

DOI 10.20535/1813-5420.1.2025.324212

В.П. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000 - 0003- 4028- 0185

О.В. Бориченко<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-6127-2945

О.В. Мейта<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0002-4132-5202

В.В. Калінчик<sup>1</sup>, канд. техн. наук, ORCID 0000-0003-3931-646X

В.А. Побігайло<sup>1</sup>, канд. техн. наук, доцент, ORCID 0000-0003-2673-7329

<sup>1</sup>Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

### УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРИЧНИМ НАВАНТАЖЕННЯМ ВИРОБНИЧИХ ОБ'ЄКТІВ ЗА ДОПОМОГОЮ СПОЖИВАЧІВ-РЕГУЛЯТОРІВ

*Показано, що в сформованій енергетичній галузі України базові електрогенеруючі потужності суттєво переважають маневрові, які вкрай необхідні для ефективного покриття потреб в електроенергії, особливо в періоди пікового попиту на неї. Створення маневрових електроенергетичних потужностей вимагає значних коштів і, що не менш важливо, значного часу. Іншим шляхом вирішення цієї задачі є управління електроспоживанням. Зниження електроспоживання промисловими підприємствами в пікові години може сприяти вирівнюванню графіків навантаження енергосистем, що дозволить зменшити необхідну кількість маневрових джерел живлення для покриття дефіциту в години максимуму і, відповідно, знизити вартість електричної енергії. На підприємствах зниження навантаження можна досягти за рахунок споживачів-регуляторів. Для ранжування та оптимізації роботи споживачів-регуляторів запропоновано генетичний алгоритм – евристичний метод пошуку, що використовується для рішення задач оптимізації і моделювання шляхом випадкового підбору комбінування і варіації шуканих параметрів. Досліджено та побудовано генетичний алгоритм вибору споживачів-регуляторів, за допомогою яких відбуватиметься регулювання навантаження. Проведена перевірка даної моделі для підприємства хімічної промисловості з вироблення аміаку.*

**Ключові слова:** електроспоживання, навантаження, управління, ранжування, генетичний алгоритм.

**Вступ.** Графік навантаження об'єднаної енергосистеми України має нерівномірний характер, характерною особливістю якого є наявність двох піків – ранкового й вечірнього. Для згладжування піків навантаження необхідно вводити додаткові (маневрові) джерела генерації. В сформованій енергетичній галузі України базові електрогенеруючі потужності суттєво переважають маневрові, які вкрай необхідні для ефективного покриття потреб в електроенергії, особливо в періоди пікового попиту на неї. Створення маневрових електроенергетичних потужностей вимагає значних коштів і, що не менш важливо, значного часу. Іншим шляхом вирішення цієї задачі є управління електроспоживанням. Потужні промислові підприємства мають значний вплив на енергосистему. Зниження їх електроспоживання в пікові години може сприяти вирівнюванню графіка навантаження енергосистем, що дозволить зменшити необхідну кількість маневрових джерел живлення для покриття дефіциту в години максимуму і, відповідно, знизить вартість електричної енергії. Зниження споживання електроенергії досягається різними способами, проте необхідно обирати такі, що мають мінімальний вплив на технологічний процес. На підприємствах зниження навантаження можна досягти за рахунок споживачів-регуляторів (СР). В цьому випадку виникає задача вибору та ранжування СР, за критерієм мінімального впливу на технологічний процес, тобто виконати задачу дискретної оптимізації. В роботах [1 - 4] для ранжування та оптимізації роботи СР запропоновано генетичний алгоритм (ГА) – евристичний метод пошуку, що використовується для рішення задач оптимізації і моделювання шляхом випадкового підбору комбінування і варіації шуканих параметрів з використанням механізмів аналогічних природньому відбору. Досліджено та побудовано генетичний алгоритм вибору споживачів-регуляторів, за допомогою яких відбуватиметься регулювання навантаження. В цій роботі вказаний алгоритм застосовано для управління електричним навантаженням потужного промислового підприємства.

**Метою роботи** є обґрунтування застосування генетичного алгоритму для регулювання електричного навантаження.

**Викладення основного матеріалу.** За допомогою генетичного алгоритму обирають СР, які мають найменший вплив на технологічний процес та часті включення і виключення яких не призводять до пошкодження самого обладнання. Перевірку даної моделі проведемо для підприємства хімічної промисловості з вироблення аміаку [5].

Укрупнена схема технологічного процесу показана на рисунку 1. Так як основні технологічні операції безперервні і не допускають переривання електропостачання, то очевидно, вони не можуть бути застосовані для регулювання навантаження.

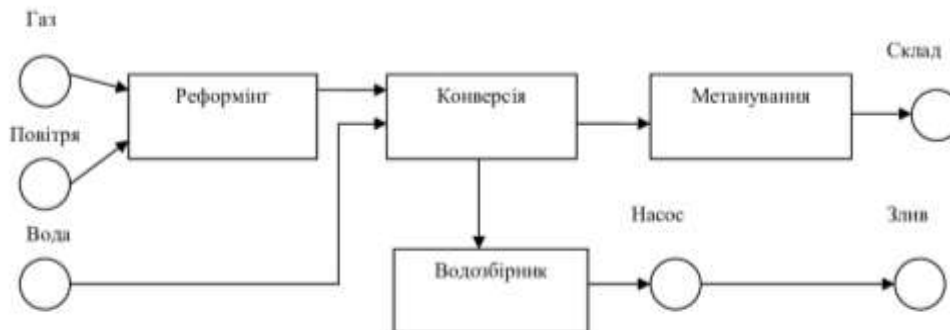


Рисунок 1 - Технологічна схема вироблення аміаку

Розглянемо ранжування СР за процедурою генетичних алгоритмів. Для цього складаються два списки споживачів, які можуть бути використані для регулювання навантаження. Списки наведені в таблицях 1 і 2.

Таблиця 1 – Перший список споживачів

Споживач	Потужність PкВт
Насос водоочищення	1000
Насос водоочищення	1000
Насоси водовідведення	200
Насоси водовідведення	200
Насоси водовідведення	600
Насоси водовідведення	600
Насоси промивки фільтрів	400
Насоси промивки фільтрів	400

Таблиця 2 - Другий список споживачів

Споживач	Потужність P, кВт
Вентилятор повітряного охолодження	400
Вентилятор повітряного охолодження	400
Компресор водонагрівача	800
Компресор водонагрівача	800
Насоси водовідведення	400
Насоси водовідведення	400
Допоміжне виробництво	1500
Допоміжне виробництво	1500

Сформовані хромосоми  $G_1$  і  $G_2$  визначають склад споживачів-регуляторів [1]. Кількість споживачів  $m_1 = 10$  і  $m_2 = 5$  і вони відносяться до нижнього рівня ієрархії електричної мережі підприємства.

1-й ген	2-й ген	3-й ген	4-й ген	5-й ген	6-й ген	7-й ген	8-й ген
1	1	0	1	1	0	1	0

Рисунок 2- Хромосома  $G_1$  особи  $Z_1$

1-й ген	2-й ген	3-й ген	4-й ген	5-й ген	6-й ген	7-й ген	8-й ген
0	0	1	0	0	1	0	1

Рисунок 3 - Хромосома  $G_2$  особи  $Z_2$



Споживачі технологічного процесу виключені зі списку СР, так як їх відключення впливає на випуск продукції та на надійність роботи самого обладнання. Тобто збитки від простою технологічного обладнання дуже значні, тому це обладнання не бере участь у регулюванні споживання електричної енергії.

Вагові коефіцієнти мають однакове значення, оскільки за умовою збиток і кількість перемикачів однаково важливі

$$\varphi_1 = 0,6;$$

$$\varphi_1 = 0,4.$$

Сумарна потужність

$$Q^Z = \sum_{i=1}^{m_n} P_i k_i G_i^Z,$$

Для кожної хромосоми (споживача зі списку) значення булевої функції дорівнює  $k_i = 1$ .

Від простою обладнання збиток умовно встановимо рівний 1, тобто збитки незначні, а, отже, основний фактор вибору СР це навантаження, на яке можна знизити загальне споживання електроенергії.

Для першого списку сумарна потужність буде рівна:

$$Q^{Z1} = 1000 \cdot 1 \cdot 1 + 1000 \cdot 1 \cdot 1 + 200 \cdot 1 \cdot 0 + 200 \cdot 1 \cdot 1 + 600 \cdot 1 \cdot 1 + 600 \cdot 1 \cdot 0 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 0 = 3200 \text{кВт},$$

Для другого списку сумарна потужність буде рівна:

$$Q^{Z2} = 400 \cdot 1 \cdot 0 + 400 \cdot 1 \cdot 0 + 800 \cdot 1 \cdot 1 + 800 \cdot 1 \cdot 0 + 400 \cdot 1 \cdot 0 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 1500 \cdot 1 \cdot 1 + 1500 \cdot 1 \cdot 1 = 4200 \text{кВт}.$$

Цільова функція для першого і другого списків вирішується з урахуванням збитку від простоїв обладнання і впливає на самий вибір обладнання.

Необхідно виконати схрещування особин [1]. Схрещування особин відбувається наступним чином: із поточного покоління випадково обираються дві різні особини і далі кожний ген хромосоми нащадку з однаковою ймовірністю  $p = 0,5$  може прийняти значення відповідного гена одного або іншого із батьків.

1-й ген	2-й ген	3-й ген	4-й ген	5-й ген	6-й ген	7-й ген	8-й ген
1	1	0	1	1	0	1	0
$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$
1-й ген нащадку	2-й ген нащадку	3-й ген нащадку	4-й ген нащадку	5-й ген нащадку	6-й ген нащадку	7-й ген нащадку	8-й ген нащадку
1	0	1	1	1	1	1	1
$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$	$p = 0,5$
1-й ген	2-й ген	3-й ген	4-й ген	5-й ген	6-й ген	7-й ген	8-й ген
0	0	1	0	0	1	0	1

Рисунок 4 – Процедура схрещування особин популяції

На наступному етапі визначимо сумарну потужність  $Q_{\text{спож}}$  списку споживачів, представленого нащадком  $G_{\text{спож}}$

$$Q_{\text{спож}} = \sum_{i=1}^{m_n} P_i k_i G_{i\text{спож}}$$

$$Q_{\text{спож}} = 1000 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 0 + 800 \cdot 1 \cdot 1 + 200 \cdot 1 \cdot 1 + 600 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 1500 \cdot 1 \cdot 1 = 4900 \text{кВт},$$

Збиток від простою обладнання не змінився, а потужність, яка вимикається збільшилась, тому поточний список кращий ніж попередній.

Проводимо мутацію списку, тобто обираємо із списків деяку особину і інвертуємо ген, тобто  $G_i^L = \bar{G}_i^L$ , в результаті утвориться особина  $G^{L*}$  - мутант особини  $G^L$ ;

Розрахуємо параметри мутанта  $Q^{L*}, F^{L*}$

1-й ген нащадку	2-й ген нащадку	3-й ген нащадку	4-й ген нащадку	5-й ген нащадку	6- й ген нащадку	7-й ген нащадку	8- ген нащадку
1	<u>1</u>	1	1	1	1	1	1

Рисунок 5 - Хромосома  $G_2$  після мутації

$$Q^{L^*} = \sum_{i=1}^{m_n} P_i k_i G^{L^*}$$

$$Q^{L^*} = 1000 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 800 \cdot 1 \cdot 1 + 200 \cdot 1 \cdot 1 + 600 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 400 \cdot 1 \cdot 1 + 1500 \cdot 1 \cdot 1 = 5300 \text{ кВт},$$

При застосуванні другого гену нащадку (споживачів списку, що утворився) значення цільової функції нового списку не змінюється, а потужність, що вимикається збільшилась без впливу на технологічний процес, це означає, що відбулася «добра» мутація, тому новий список задовольняє умови і є остаточним списком споживачів для регулювання потужності, і має наступний вигляд

Таблиця 4 – Новий список споживачів-регуляторів

Споживач	Потужність $P$ , кВт
Насос водоочищення	1000
Насос водоочищення	1000
Компресор водонагрівача	800
Насоси водовідведення	200
Насоси водовідведення	600
Насоси водовідведення	400
Насоси промивки фільтрів	400
Насоси промивки фільтрів	1500

Новий список має найбільшу потужність, на яку можна знизити споживання у пікові години навантаження, а отже найбільше задовольняє вирішенню задачі.

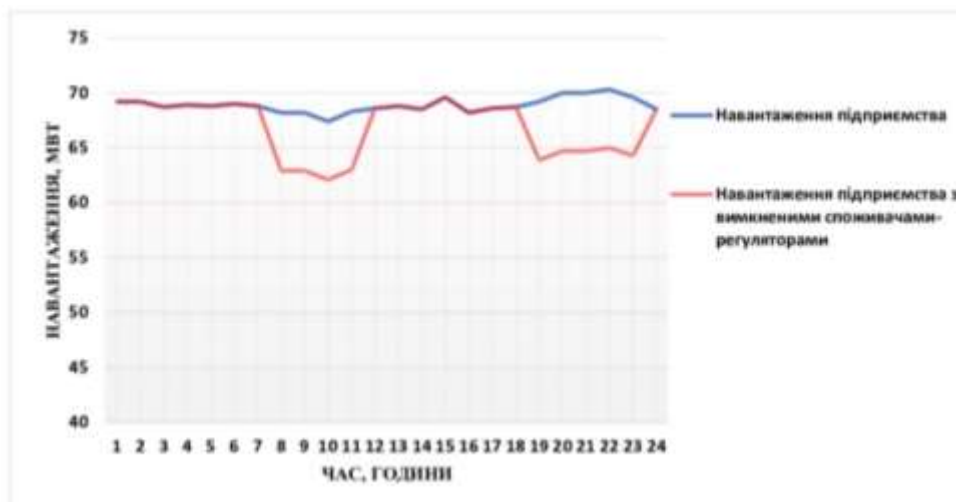


Рисунок 5 – Порівняння графіків навантажень без управління та з управління навантаженням хімічного підприємства

За допомогою обраних СР загальна потужність підприємства знизилась в середньому на 8%. В залежності від кількості СР, які братимуть участь у регулюванні навантаження, потужність можна знизити до 20%.

**Висновок.** Проведені в роботі дослідження вибору споживачів-регуляторів показали високу ефективність генетичного алгоритму з мінімальними збитками для підприємства. Генетичний алгоритм має високу точність тому його доцільно використовувати для управління електричним навантаженням підприємств з безперервним характером виробництва

**Список використаної літератури**

1. В.П. Калінчик. Ранжування споживачів – регуляторів електричного навантаження/ В.П. Калінчик, О.В. Бориченко, О.В. Мейта, В.В. Калінчик, В.В. Побігійло// *Енергетика: економіка, тех-нології, екологія*. – 2024. - № 4. – С.20-27.
2. В. Калінчик. Управління електричним навантаженням за допомогою споживачів-регуляторів// В. Калінчик, М. Шкрєбтій./ Збірник наукових праць. Матеріали XXVI Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції „Проблеми та перспективи розвитку науки на початку третього тисячоліття у країнах Європи та Азії” – Переяслав-Хмельницький. – 2016.- С.246-248.
3. Clement R. Genetic Algorithms and Dus-Driver Scheduling. // Clement R., Wren A./ Presented at the 6th International Conference for Computer-Aided Transport Scheduling. Lisbon. Portugal. 1993.
4. Шкрєбтій М.В. Застосування генетичних алгоритмів для вибору споживачів-регуляторів/ Шкрєбтій М.В./ Збірник наукових праць. Матеріали VII міжнародної науко-во-технічної кон-ференції. Енергетика. екологія. людина. - – Київ: КПІ імені Ігоря Сікорського, ІЕЕ, 2016. – С. 115-117.
5. Іншеков Є.М. Оптимізація режимів електроспоживання підприємств хімічної промисловості/ Іншеков Є.М., Калінчик І.В. - НТУУ „КПІ” Н.-д. ін-т автоматика та енергетики „Енергія”. – Київ, 2012. – 11 с.: іл. –Укр. – Деп. в ДНТБ України 27.04.12, № 13-Ук – 2012.

**V.P. Kalinchyk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-4028-0185

**O. Borychenko**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-6127-2945

**O.V. Meita**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0002-4132-5202

**V.V. Kalinchyk**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3931-646X

**V. Pobigaylo**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0003-2673-7329

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**MANAGEMENT OF ELECTRICAL LOAD OF PRODUCTION FACILITIES  
WITH THE HELP OF CONSUMER - REGULATORS**

*It is shown that in the existing energy sector of Ukraine, basic power generating capacities significantly outnumber shunting capacities, which are essential for efficiently covering electricity needs, especially during periods of peak demand for electricity. The creation of shunting power capacities requires significant funds and, just as importantly, considerable time. Another way to solve this problem is to manage electricity consumption. Reducing electricity consumption by industrial enterprises during peak hours can help to level the load schedules of power systems, which will reduce the required number of shunting power sources to cover the deficit during peak hours and, accordingly, reduce the cost of electricity. At enterprises, load reduction can be achieved at the expense of regulated consumers. To rank and optimize the work of consumer-regulators, a genetic algorithm is proposed - a heuristic search method used to solve optimization and modeling problems by randomly selecting a combination and variation of the desired parameters. A genetic algorithm for selecting consumers-regulators, which will be used to regulate the load, has been studied and built. This model was tested for a chemical industry enterprise producing ammonia.*

**Keywords:** *electricity consumption, load, control, ranking, genetic algorithm.*

**References**

- 1.Kalinchyk V.P.. Ranking of consumers - regulators of electric load/ V.P. Kalinchyk, O.V. Borichenko, O.V. Meyta, V.V. Kalinchyk, V.A. Pobigaylo // *Energy: Economics, Technology, Ecology*. - № 4. – С.20 - 27.
- 2.Kalinchyk V.. Management of electric load with the help of consumers-regulators // V. Kalinchyk, M. Shkrebtiy. Proceedings of the XVI International Scientific and Practical Internet Conference “Problems and Prospects for the Development of Science at the Beginning of the Third Millennium in Europe and Asia” - Pereyaslav-Khmelnytskyi - 2016.- P.246-248.
- 3.Clement R. Genetic Algorithms and Dus-Driver Scheduling. // Clement R., Wren A./ Presented at the 6th International Conference for Computer-Aided Transport Scheduling. Lisbon. Portugal. 1993.
- 4.Shkrebtiy M.V. Application of genetic algorithms for the selection of consumers-regulators / Shkrebtiy M.V. / Collection of scientific papers. Materials of the VII International Scientific and Technical Conference. Energy, ecology, man. - Kyiv: Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute, IEE, 2016. - P. 115-117.
- 5.Inshekov E.M. Optimization of power consumption modes of chemical industry enterprises / Othera-kov E.M., Kalinchyk I.V. - NTUU “KPI” Research Institute of Automation and Energy “Energy” - Ky-iv, 2012. 11 p.: illus. - Dep. in SSTB of Ukraine 27.04.12, № 13-Uk - 2012.

Надійшла: 19.12.2024

Received: 19.12.2024

## СИГНАТУРА ДВОФАЗНИХ НЕБАЛАНСНИХ ПРОВАЛІВ НАПРУГИ В ТРИФАЗНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

*В статті запропоновано підхід до ідентифікації двофазних небалансних провалів напруги в трифазній електричній мережі. На першому етапі, за рахунок застосування вейвлет-перетворення до сигналу напруги електричної мережі, визначається наявність спотворення якості електричної енергії, його тривалість та час його початку та закінчення. На другому етапі проводиться аналіз сигнатури векторів напруги в комплексній площині за методологією просторового вектору та напруги нульової послідовності. Сигнатура просторового вектору складається з позитивних та негативних векторів кутової частоти, а потім слідує за еліпсом у комплексній площині. Показано, що різні типи провалів ідентифікуються за допомогою характеристик еліпсу та напруги нульової послідовності. Досліджено вплив глибини провалу напруги на характеристики просторового вектору для провалів напруги типу C, E, G.*

**Ключові слова:** *якість електричної енергії, двофазні провали напруги, просторовий вектор.*

**Вступ.** Якість електричної енергії (ЯЕЕ) – це сукупність властивостей електричної енергії відповідно до встановлених стандартів, які визначають ступінь її придатності для використання за призначення. Відповідно до положень пункту 11.4.6 глави 11.4 розділу XI Кодексу систем розподілу, затвердженого постановою НКРЕКП від 14.03.2018 № 310 (далі – КСР), «... параметри ЯЕЕ в точках приєднання споживачів в нормальних умовах експлуатації мають відповідати параметрам, визначеним у ДСТУ EN 50160:2014: Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності (далі – ДСТУ EN 50160:2014)» [1].

Насичення різного роду пристроїв силової електроніки в Енергосистемі призводить до необхідності впровадження методів та засобів не тільки виявлення наявності спотворень, а і ліквідації їх впливу на електрообладнання.

Одним із параметрів ЯЕЕ є провали напруги, які мають найбільший вплив на таке обладнання. Для підтримання показників ЯЕЕ (провалів напруги) належного рівня необхідне впровадження системи їх моніторингу, яка б включала в собі методи їх виявлення, ідентифікації та класифікації. Завдяки своєчасній ідентифікації провалів напруги обслуговуючий персонал отримує інформацію про причини провалу, місце несправності в електричній мережі.

**Огляд наукових досліджень.** Проведений огляд наукових публікацій для визначення наявності спотворень ЯЕЕ показав наступне. Використання скритих марківських моделей потребує знання статистичних властивостей сигналів. Метод опорних векторів використовується в основному для вирішення задач класифікації та регресійного аналізу, а нейромережеві експертні системи, зазвичай, призначені для розв'язання задач діагностики та прогнозування. При цьому слід враховувати, що навчання та перенавчання штучних нейронних мереж є багатопараметричною задачею нелінійної оптимізації та вимагає багато часу [2 – 6].

Відносно провалів напруги розглядалися наступні методи: швидке перетворення Фурє, метод фазового автопідстроювання частоти (PLL), техніка векторного керування (SPLL), метод подачі пікового значення та метод вейвлетного перетворення (WT) [9], [10]. Оцінка кожного методу базувалася на швидкості виявлення провалу (його тривалості) та точності визначення його глибини. Враховувалась також вартість реалізації та складність кожного методу [7 – 12]. Застосування одного із зазначених методів для виявлення наявності провалів напруги, обчислення їх початку та закінчення (тривалості) та ідентифікації типу провалу є недостатньо ефективним. Тобто, необхідна розробка нового методу, або модифікація існуючих.

**Мета та завдання дослідження.** Розробка модифікованого методу виявлення та ідентифікації типів провалу напруги з розрахунком їх основних характеристик.

**Матеріал і результати досліджень.** Модифікований метод виявлення та ідентифікації складається із двох етапів. На першому етапі за допомогою методу вейвлет-перетворення напруги електричної мережі [13] визначається наявність провалу напруги, час його початку та закінчення. Ідентифікація типу провалу проводиться на другому етапі за методологією просторового вектору (методу Кларка) [14]. Даний метод використовується для спрощення розрахунків у трифазних електричних мережах. Перетворення Кларка –

це перехід від трифазної системи електричної мережі в двофазну. Тобто, миттєве значення трьох фаз представляється вектором напруги або струму. Потім даний вектор представляється в ортогональному стаціонарному відліку. Вектор напруги складається із двох векторів, один з яких обертається в прямому напрямку (1), а інший – в зворотному напрямку (2) [14]:

$$U_{\alpha} = \frac{2}{3} \left( U_A - \frac{1}{2} U_B - \frac{1}{2} U_C \right) \quad (1)$$

$$U_{\beta} = \frac{2}{3} \left( \frac{\sqrt{3}}{2} U_B - \frac{\sqrt{3}}{2} U_C \right) \quad (2)$$

Для незбалансованих електричних мереж обчислюється додатково іще напруга нульової послідовності:

$$U_{\gamma} = \frac{2}{3} \left( \frac{1}{2} U_A + \frac{1}{2} U_B + \frac{1}{2} U_C \right) \quad (3)$$

**Двофазні провали напруги в трифазних електричних мережах.** До даних типів провалів напруги відносяться провали типу С, Е, Г.

**Провал типу С.** Провал типу С призводить до того, що дві фазні напруги змінюються лише вздовж уявної осі (як за величиною, так і за кутом).

На рис. 1 представлений провал типу С з рівняннями напруг та векторною діаграмою.

$$u_A(t) = U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$$

$$u_B(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi - \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)\right)$$

$$u_C(t) = h \cdot U \cdot \sin\left(\omega t + \varphi + \left(\frac{2\pi}{3} + \alpha\right)\right)$$

$$R_{\max} = U, \quad r_{\min} = (1-h) \cdot U$$

а

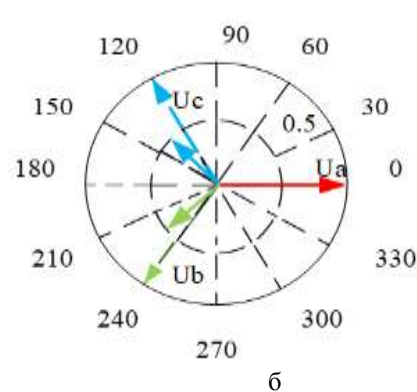


Рисунок 1 - Тип провалу напруги С: а – рівняння напруг; б – векторна діаграма,  $h = 0,5$

**Провал типу Е.** Провал типу Е – це двофазне замикання яке виникає при навантаженні що підключається, так званім, шлейфом. Характеризується провалами напруги у двох фазах та наявністю напруги нульової послідовності.

**Провал типу Г.** Тип провалу напруги Г – це двофазне замикання (виникає через навантаження, підключене через незаземлений трансформатор, видаляючи компонент нульової послідовності). Характеризується наявністю провалів у всіх трьох фазах.

*Проведемо дослідження залежності просторового вектору (його характеристик) від типу провалу та для різних фаз даного провалу (двофазні типи провалів напруги С, Е, F).*

Як слідує із рис. 3, мала вісь еліпса залежить від глибини провалу напруги при  $h = 0.85$  значення  $r_{\min} = 0.15$ , а при  $h = 0.2$  значення  $r_{\min} = 0.8$  для всіх фаз. Кут нахилу еліпса фази А –  $\Theta_A = 0^\circ$ , фази В –  $\Theta_B = -60^\circ$  і фази С –  $\Theta_C = -120^\circ$ . Із рис. 3 ясно слідує, що  $R_{\max}$  для всіх фаз електричної мережі залежить від глибини провалу напруги.

Як слідує із рис. 4, мала вісь еліпса залежить від глибини провалу напруги при  $h = 0.85$  значення  $r_{\min} = 0.15$ , а при  $h = 0.2$  значення  $r_{\min} = 0.8$  для всіх фаз. Кут нахилу еліпса фази А –  $\Theta_A = 0^\circ$ , фази В –  $\Theta_B = -60^\circ$  і фази С –  $\Theta_C = -120^\circ$ . Із рис. 4 ясно слідує, що  $R_{\max}$  для всіх фаз електричної мережі залежить від глибини провалу напруги.

Результати проведених досліджень залежності характеристик просторового вектору від глибини провалів напруги двофазних небалансних провалів напруги в електричній мережі показали наступне.

Три типи двофазних провалів напруги в електричній мережі (С, Е, G) можна ідентифікувати завдяки двом параметрам:

- напруга нульової послідовності, яка дорівнює  $u_0(t) = \frac{h}{3} \cdot U \cdot \sin(\omega t + \varphi)$  для провалу типу Е і  $u_0(t) = 0$  для провалів типу С і G;

• велика вісь еліпса,  $R_{\max} = U_{\text{ном}}$  для провалу типу С і  $R_{\max} < U_{\text{ном}}$  для двох інших типів провалу напруги – Е, G.

Провал напруги типу С (рис. 2).

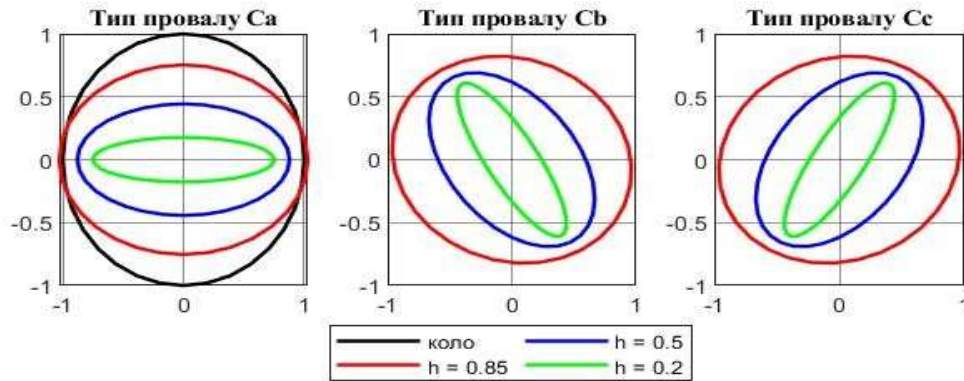


Рисунок 2 - Залежність характеристик просторового вектору провалу типу С від значення глибини провалу

Провал напруги типу Е (рис. 3).

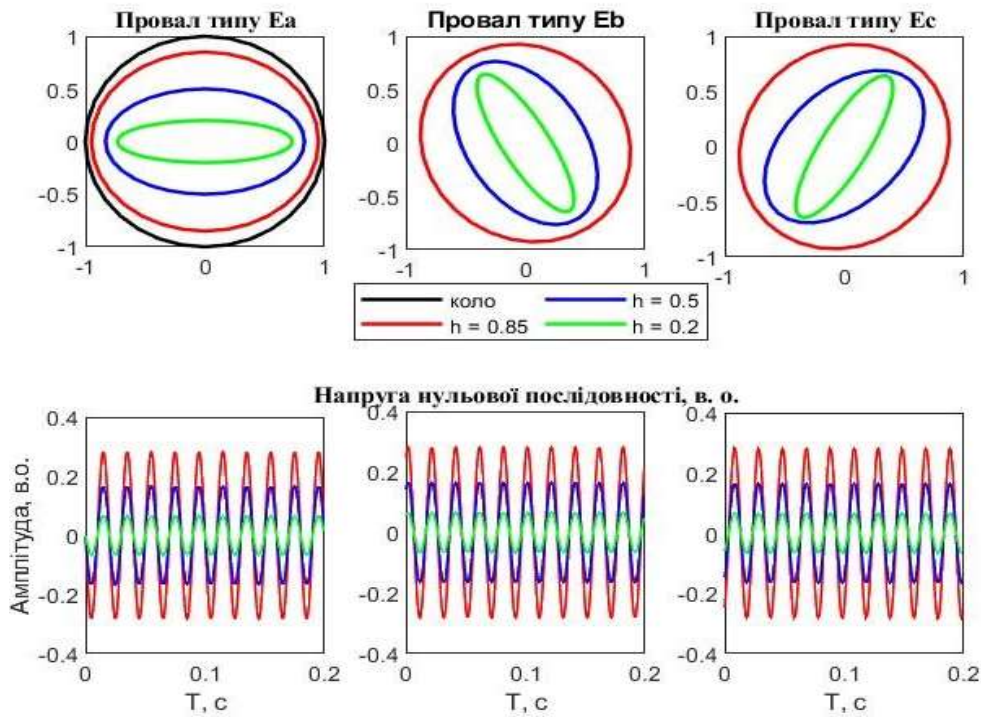


Рисунок 3 - Просторові вектори провалу типу Е: Ea – фаза А, Eb – фаза В, Ec – фаза С

Провал напруги типу G (рис. 4).

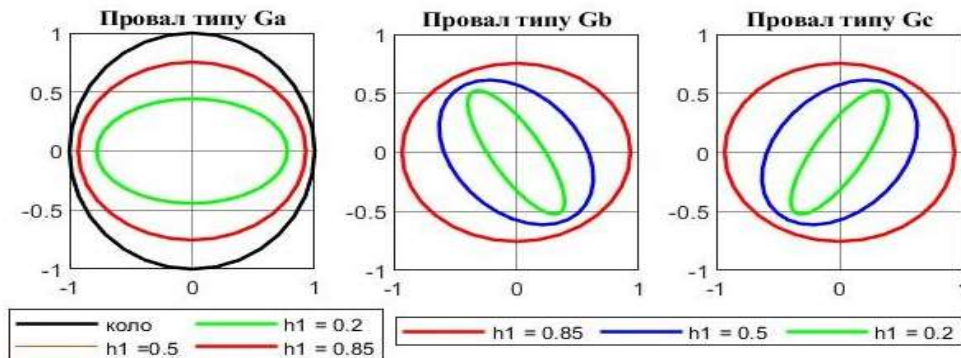


Рисунок 4 - Просторові вектори провалу типу G: Ga – фаза А, Gb – фаза В, Gc – фаза С

**Висновки:**

1. Для двофазних провалів напруги типу  $C$  та  $G$  перемінна  $h$  є функцією зсуву фазового кута та падіння фаз напруги в місці несправності. Що означає невірне відображення глибини провалу.
2. Для невеликих значень провалів напруги можна враховувати значення  $h$  тотожно глибині провалу.
3. Просторовий вектор і напруга нульової послідовності можуть бути застосовані для ідентифікації провалів напруги. Крім того, можна відзначити, що малу вісь еліпса  $r_{\min}$  і величину напруги нульової послідовності можна використовувати для виявлення виникнення провалу напруги (мала вісь еліпса менша за номінальну напруги для всіх типів провалів від  $A$  до  $G$ ).
4. Просторовий вектор і напруга нульової послідовності також можуть використовуватися для сегментації записаних форм сигналу напруги та визначення області часу падіння. Вони також можуть бути корисними для оцінки тяжкості провалу напруги, оскільки вони безпосередньо залежать від глибини провалу  $h$ .

**Список використаної літератури**

1. ДСТУ EN 50160:2014 “Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності” (EN 50160:2010, IDT).
2. Zwe-Lee Gaing. “Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 19, № 4, pp. 1560–1567, 2004.
3. Emmanouil Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. “Expert system for classification and analysis of Power system events”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 17, № 2, pp. 423–428, 2002.
4. B. Bizjak, P. Planinsic. “Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic”, *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1356–1360, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778591>
5. P. G. V. Axelberg; I. Y.-H. Gu; M. H. J. Bollen. “Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances”, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, № 3, pp. 1297–1303, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900065>
6. P. Janik, T. Lobos. “Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network”, *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 21, № 3, pp. 1663–1669, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874114>
7. M. V. K. Perera, *Control of a Dynamic Voltage Restorer to Compensate Single Phase Voltage Sags*, Stockholm University, 2007.
8. C. Fitzer, M. Barnes and P. Green, “Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan./Feb. 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821801>
9. V. A. Skolota & G. S. Zinovev, “Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag”, *IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, pp. 606–611, 2018.
10. J. R. Camarillo-Peñaranda and G. Ramos, “Characterization of voltage sags due to faults in radial systems using three-phase voltage ellipse parameters”, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2032–2040, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101878>
11. J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, “Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at medium voltage level”, *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806–813, May 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826504>
12. A. R. Diwan, K. M. Abdulhassan, F. M. Alnahwi. “A Fast and Accurate Method for Power System Voltage Sag Detection”, *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 16, Issue 1, pp. 78–84. June 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.37917/ijeee.16.1.10>
13. Волошко А. В. “Узагальнений ідентифікатор наявності спотворень якості електричної енергії”, *Технічна електродинаміка*, 2022, №6, с. 72–76, 2022. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.072>
14. V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha. “Space vector method for voltage dips and swells analysis”, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 2054–2061, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028787>

A. Voloshko<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0009-0004-2113-3600

D. Filyanin<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), ORCID 0000-0003-3576-3633

K. Liakhova<sup>1</sup>, student

<sup>1</sup>National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

## APPLICATION OF ASCA TO SOLVE THE PROBLEMS OF HARMONIC DISTORTIONS SOURCES IDENTIFICATION

*The article proposes an approach to identifying two-phase unbalanced voltage sags in a three-phase electrical network. At the first stage, by applying wavelet transform to the electrical network voltage signal, the presence of electrical energy quality distortion, its duration and the time of its beginning and end are determined. At the second stage, the signature of voltage vectors in the complex plane is analyzed using the methodology of the space vector and zero-sequence voltage. The space vector signature consists of positive and negative angular frequency vectors, and then follows an ellipse in the complex plane. It is shown that different types of sags are identified using the characteristics of the ellipse and zero-sequence voltage. The influence of the voltage dip depth on the characteristics of the space vector for voltage sags of types C, E, G is studied.*

**Keywords:** power quality, two-phase voltage sags, spatial vector.

### References

1. ДСТУ EN 50160:2014 "Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності" (EN 50160:2010, IDT).
2. Zwe-Lee Gaing. "Wavelet-based neural network for Power Disturbance recognition and classification", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 19, № 4, pp. 1560–1567, 2004.
3. Emmanouil Styvaktakis, M. H. J. Bollen, I. Y. H. Gu. "Expert system for classification and analysis of Power system events", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 17, № 2, pp. 423–428, 2002.
4. B. Bizjak, P. Planinsic. "Classification of Power Disturbances using Fuzzy Logic", *12th International Power Electronics and Motion Control Conference*, pp. 1356–1360, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2006.4778591>
5. P. G. V. Axelberg; I. Y.-H. Gu; M. H. J. Bollen. "Support Vector Machine for Classification of Voltage Disturbances", *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 22, № 3, pp. 1297–1303, 2007. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2007.900065>
6. P. Janik, T. Lobos. "Automated classification of Power-quality disturbances using SVM and RBF network", *IEEE Trans. On Power Delivery*, Vol. 21, № 3, pp. 1663–1669, 2006. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2006.874114>
7. M. V. K. Perera, *Control of a Dynamic Voltage Restorer to Compensate Single Phase Voltage Sags*, Stockholm University, 2007.
8. C. Fitzer, M. Barnes and P. Green, "Voltage Sag Detection Technique for a Dynamic Voltage Restorer", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 40, no. 1, pp. 203–212, Jan./Feb. 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TIA.2003.821801>
9. V. A. Skolota & G. S. Zinovev, "Detecting Voltage Swell, Interruption and Sag", *IEEE 19th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM)*, pp. 606–611, 2018.
10. J. R. Camarillo-Peñaranda and G. Ramos, "Characterization of voltage sags due to faults in radial systems using three-phase voltage ellipse parameters", *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 54, no. 3, pp. 2032–2040, 2018. doi: <https://doi.org/10.1109/IAS.2017.8101878>
11. J. G. Nielsen, M. Newman, H. Nielsen, F. Blaabjerg, "Control and testing of a Dynamic Voltage Restorer (DVR) at medium voltage level", *IEEE transactions on Power Electronics*, vol. 19, no. 3, pp. 806–813, May 2004. doi: <https://doi.org/10.1109/TPEL.2004.826504>
12. A. R. Diwan, K. M. Abdulhassan, F. M. Alnahwi. "A Fast and Accurate Method for Power System Voltage Sag Detection", *Iraqi Journal for Electrical and Electronic Engineering*, Vol. 16, Issue 1, pp. 78–84. June 2020. doi: <http://dx.doi.org/10.37917/ijeee.16.1.10>
13. A.V. Voloshko. "Generalized identifier of the presence of distortions of quality of electricity", *Technical Electrodynamics*, 2022, №6, pp. 72–76, 2022. doi: <https://doi.org/10.15407/techned2022.06.072>
14. V. Ignatova, P. Granjon, S. Bacha. "Space vector method for voltage dips and swells analysis", *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 24(4), pp. 2054–2061, 2009. doi: <https://doi.org/10.1109/TPWRD.2009.2028787>

Надійшла: 08.12.2024

Received: 08.12.2024



## СИНТЕЗ ЛІНГВІСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВІДТВОРЕННЯ ВПЛИВУ БЛИСКАВКИ НА ЧАСТОТУ ВІДМОВ ЕКРАНУВАННЯ ПОВІТРЯНОЇ ЛІНІЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ

**Проблематика.** Традиційні методи розрахунку систем блискавкозахисту з часом удосконалюються з урахуванням нових знань про блискавку та її характеристики. Зростаючі вимоги до ефективності захисту, особливо для ліній електропередавання в концепції Smart Grid, створюють потребу в нових підходах. Нечітка логіка виступає як один із способів вирішення цих завдань, оскільки вона дозволяє моделювати складні і невизначені процеси, що характерні для блискавкозахисту. **Мета дослідження.** Основною метою є розробка лінгвістичної моделі для прогнозування частоти відмов екранування на основі параметрів струму блискавки, ширини зони відмови та функції щільності ймовірності струму. **Методика реалізації.** Для визначення ширини зони відмови екранування використано електрогеометричну модель. Синтез лінгвістичних моделей для відтворення впливу блискавки на частоту відмов екранування виконано за допомогою математичного апарату нечіткої логіки. **Результати дослідження.** Отримано дані щодо ширини зони відмови блискавкозахисту для типової опори лінії електропередавання 330 кВ, які демонструють, як змінюється ця зона при різних значеннях очікуваного струму блискавки. **Висновки.** Моделювання частоти відмов екранування за допомогою нечіткої логіки та алгоритму Мамдані дозволяє більш точно прогнозувати відмови, враховуючи мінливі умови. Структурні схеми та передаточні функції демонструють, як різні параметри, такі як струм, щільність струму та ширина зони відмови, впливають на частоту відмов. Усі ці параметри та їх взаємозв'язки описуються з використанням лінгвістичних змінних та нечітких правил, що дає змогу здійснювати більш ефективні прогнози для систем блискавкозахисту.

**Ключові слова:** блискавка, електрогеометрична модель, частота відмов екранування, повітряна лінія електропередавання, лінгвістичні моделі, нечітка логіка, розумні мережі, прогнозування відмов.

### Вступ

Традиційні підходи до розрахунку систем блискавкозахисту формувалися протягом десятиліть і продовжують удосконалюватися й до сьогодні [1]. На своєму історичному етапі вони довели свою ефективність, адже дозволяли забезпечити дієвий захист від блискавки для різних об'єктів. Однак з часом, у зв'язку зі зростанням наших знань про блискавку та її характеристики, а також з підвищенням вимог до ефективності систем блискавкозахисту – особливо для повітряних ліній електропередавання, які є частиною концепції Smart Grid – виникає потреба в пошуку нових підходів для удосконалення розрахунків і аналізу ефективності таких систем [2, 3]. Ці зміни вимагають більш гнучких та інноваційних методів, здатних забезпечити ще вищий рівень надійності і безпеки.

Використання математичного апарату нечіткої логіки може бути одним із ефективних шляхів вирішення сучасних завдань захисту від блискавки повітряних ліній електропередавання. Нечітка логіка дозволяє ефективно моделювати складні та невизначені процеси, які мають місце в системах захисту від блискавки [4, 5]. Вона дає змогу врахувати різні параметри, такі як струм блискавки, функція щільності ймовірності струму та ширина зони відмови блискавкозахисту, де точні математичні моделі можуть бути важкими для застосування через високий рівень невизначеності або складність взаємозв'язків. Зокрема, нечіткі системи дозволяють описувати ці параметри мовою, що ближча до природної, наприклад, у вигляді "низький струм" чи "висока ймовірність", що робить модель більш адаптованою до реальних умов і дає змогу здійснювати ефективніші прогнози та приймати управлінські рішення у системах захисту.

Застосування нечіткої логіки може дати змогу краще прогнозувати і зменшувати ймовірність відмов блискавкозахисту в залежності від змінних умов, підвищуючи надійність і ефективність захисту повітряних ліній електропередавання та підстанцій високої напруги.

### Мета та завдання

Основною метою даного дослідження є синтез лінгвістичної моделі впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування. Екрануючі (грозозахисні) троси знижують ймовірність прямого удару блискавки у фазні провідники, проте вони не можуть повністю виключити такий ризик, що підтверджується результатами численних розрахунків [3, 6], проведених за допомогою електрогеометричної моделі.

У рамках концепції Smart Grid, яка передбачає інтеграцію сучасних інформаційних технологій для покращення ефективності та надійності електричних мереж, значення захисту від блискавки стає ще більш критичним. Високий рівень автоматизації та дистанційного моніторингу в таких мережах посилює вимоги до безперебійної роботи ліній, адже навіть короткочасні порушення можуть призвести до серйозних системних збоїв або пошкодження обладнання. Тому, застосування математичного апарату нечіткої логіки для моделювання та аналізу відмов блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання є актуальним завданням.

#### Матеріал і результати досліджень

Одним із основних параметрів, якими характеризують ефективність блискавкозахисту повітряних ліній електропередавання є частота відмов блискавкозахисту або, іншими словами, частота відмов екранування (Shielding Failure Rate в науковій англомовній літературі). Це очікувана кількість спалахів блискавки, які зможуть оминати екрануючий (грозозахисний) трос та влучити у фазний провідник за певний часовий інтервал. Зазвичай, обчислюється як кількість таких спалахів на 100 км довжини повітряної лінії електропередавання за 1 рік. Ця подія може спричинити електричне перекриття ізоляції з провідника на заземлену траверсу, а може і не спричинити цього. З урахуванням уточнення [7], даний параметр обчислюється за наступною формулою [8]:

$$SFR = 2 \times 10^{-3} \cdot N_g \cdot L \cdot \int_{I=I_{min}}^{I=I_{max}} D(I) \cdot f(I) \cdot dI, \quad (1)$$

де:  $SFR$  – частота відмов екранування, 1/рік;  $N_g$  – щільність спалахів блискавки між хмарою та землею для території, де проходить траса лінії електропередавання, 1/(км<sup>2</sup>×рік);  $L$  – довжина траси лінії електропередавання, км;  $I$  – очікуваний струм блискавки, кА;  $D(I)$  – ширина зони відмови блискавкозахисту для даного фазного провідника, м;  $f(I)$  – функція щільності ймовірності струму блискавки, 1/кА;  $I_{min}$  – мінімальний струм блискавки, прийнятий у розрахунку, кА;  $I_{max}$  – максимальний струм блискавки, при якому досягається повне екранування, кА.

В формулі (1) мінімальний струм ( $I_{min}$ ) можна прийняти рівним 3,0 кА, оскільки струмів першого зворотного удару блискавки менше цього значення не спостерігалось при вимірюваннях в польових умовах на опорах повітряних ліній електропередавання [9]. Розрахунки також показують достатньо малу ймовірність такої події. Так, ймовірність того, струм блискавки (як випадкова величина) прийме значення менше або рівне певному пороговому значенню, можна оцінити за наближеною формулою [8]:

$$P(I_f \leq I) = 1 - P(I_f > I) = 1 - \frac{1}{1 + \left(\frac{I}{31,0}\right)^{2,6}}. \quad (2)$$

Дійсно, за підрахунками за формулою (2), ймовірність того, що під час спалаху блискавки максимальне значення струму першого зворотного удару буде менше або рівне 3,0 кА, дорівнює 0,0023 (або 0,23%).

В даній роботі для опису функції щільності ймовірності струму блискавки як випадкової величини було використано наступний вираз:

$$f(I) = \frac{1}{\sqrt{2 \cdot \pi} \cdot I \cdot 0,61} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\ln(I) - 3,401}{0,61} \right)^2}. \quad (3)$$

Формула (3) відповідає результатам прямих вимірювань струму блискавки да дослідницьких вежах на горі Монте-Сан-Сальваторе в минулому столітті [10], які до сих пір вважаються одними з найбільш точних, та дуже близько наближаються до результатів вимірювань на опорах повітряних ліній електропередавання [9]. Відповідний аналіз та порівняння проведено в роботі [7].

В якості тестової моделі для дослідження за допомогою електрогеометричної моделі в даній роботі було використано креслення типової опори повітряної лінії електропередавання класу 330 кВ з горизонтальним розташуванням фазних провідників на опорі, яке наведено в публікації з відкритим доступом [11]. Для даної лінії було проведено розрахунки ширина зони відмови блискавкозахисту  $D$  для крайнього фазного провідника лінії. Процедура розрахунку наведено із необхідними поясненнями в публікації у відкритому доступі [7]. Оскільки процедура розрахунку є достатньо громіздкою та викладена в іншій роботі, для уникнення повторювань, в даній статті наводити її не будемо. Наведемо лише основні результати, отримані згідно із концепцією електрогеометричної моделі (рис. 1).

Встановлено, що для даної конструкції лінії, біля її опор повне екранування (або іншими словами повний блискавкозахист) досягається при струмі блискавки 10,02 кА. Це означає, що починаючи із цього значення, удари блискавки будуть влучати або безпосередньо в екрануючий (грозозахисний) трос, або у землю поблизу лінії. На рис. 1 наведено візуалізацію того, як змінюється ширина зони відмови блискавкозахисту  $D$  при зміні від мінімального до максимального струму блискавки з рівняння (1).

Зокрема, на рис. 1: ширина зони відмови блискавкозахисту  $D_1 = 3,38$  м (з одної сторони лінії) відповідає струму блискавки  $I_{min} = 3,0$  кА;  $D_2 = 0$  м (тобто повне екранування від прямого удару блискавки) відповідає струму блискавки  $I_{max} = 10,02$  кА.

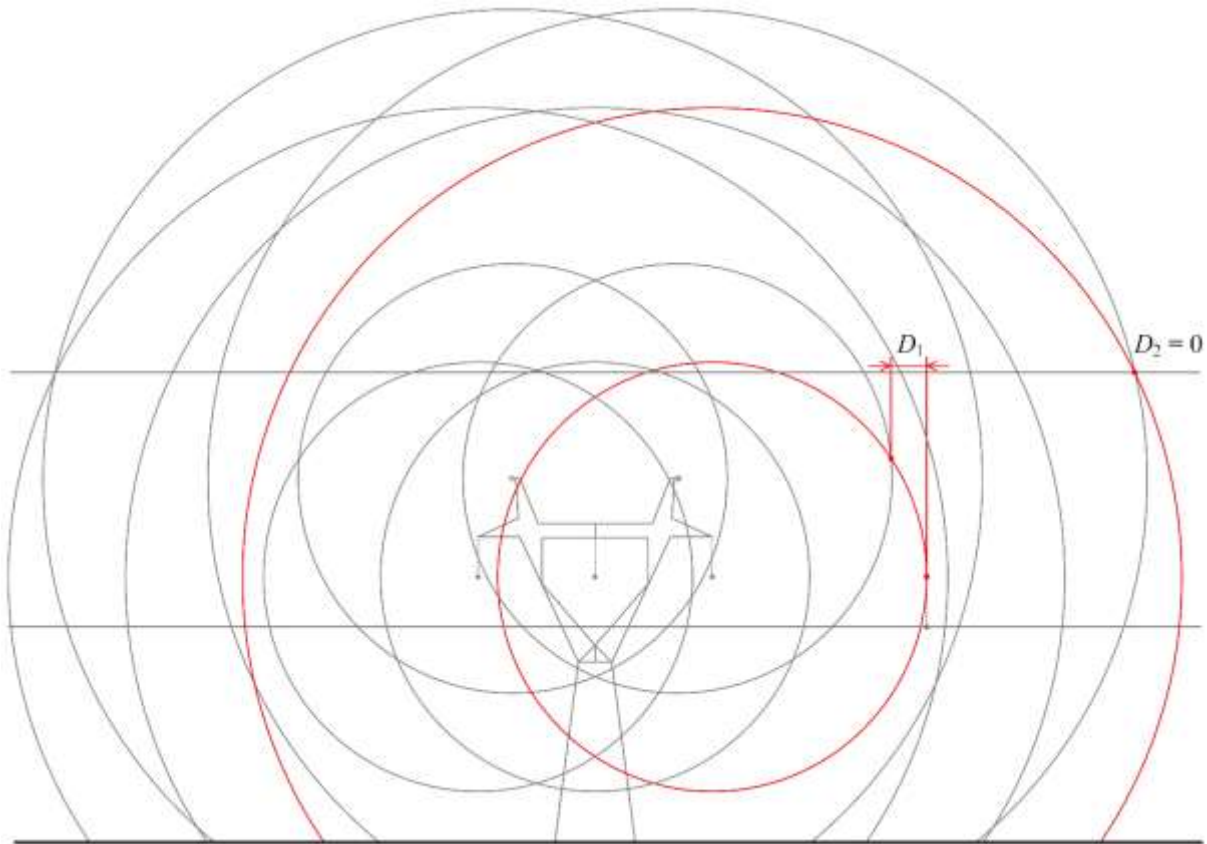


Рисунок 1 – Визначення ширини зони відмови блискавкозахисту безпосередньо біля опори лінії електропередавання за допомогою електрогеометричної моделі

Для обчислення інтегралу в формулі (1) залежність  $D(I)$  була розрахована в окремих точках на інтервалі від 3,0 кА до 10,02 кА, а потім апроксимована поліномом 3-го ступеня згідно із методикою, наведеною в [7]:

$$D(I) = D_3(I) = 8,872 \times 10^{-3} \cdot I^3 - 0,266 \cdot I^2 + 1,748 \cdot I + 0,276. \quad (4)$$

Фактично, діапазон зміни добутку двох функцій (3) й (4) під знаком інтегралу в (1) дорівнює діапазону зміни функції  $D(I)$ . Як вже було сказано раніше, цей діапазон має свої межі. Мінімальне значення цього діапазону може бути прийнято рівним 3,0 кА для всіх типів опор ліній, тому, що за результатами багатолітніх вимірювань струмів блискавки на дослідницьких вежах та опорах ліній не спостерігалось струмів першого зворотного удару блискавки менше цього значення. Максимальне значення цього діапазону дорівнює значенню струму блискавки, при якому буде досягнуто повного екранування від прямого удару блискавки. Це значення для кожного типу опор ліній електропередавання буде різним. Поза межами цього інтервалу функція  $D(I)$  дорівнює нулю, а отже і весь підінтегральний вираз у формулі (1) також дорівнює нулю. Графік цієї залежності наведено на рис. 2.

Очікуваний інтервал часу між відмовами (Mean Time Between Failures в англomовній науковій літературі) буде обернено пропорційним частоті відмов блискавкозахисту [7]:

$$MTBF = \frac{1}{SFR}. \quad (5)$$

Прийнявши базове значення  $N_g = 1,0$  спалахів/(км<sup>2</sup>×рік), згідно із формулою (1) отримаємо, що  $SFR = 0,01155$  спалахів/рік на 100 км довжини лінії. Тоді, за формулою (5) можна очікувати, що хоча б одна відмова блискавкозахисту відбудеться за  $MTBF = 86,58$  років. Приймаючи  $N_g = 4,5$  спалахів/(км<sup>2</sup>×рік), що відповідає усередненому значенню, наприклад, для України та Японії станом на січень 2025 року згідно [12], отримаємо, відповідно,  $SFR = 0,0520$  спалахів/рік на 100 км довжини лінії, а  $MTBF = 19,24$  років.

Далі лінгвістичну модель впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування було синтезовано на основі

системи нечіткого логічного висновку FIS за алгоритмом Мамдані (рис. 3) в програмному додатку Fuzzy Logic Designer програмного середовища MATLAB®, згідно із методикою [13].

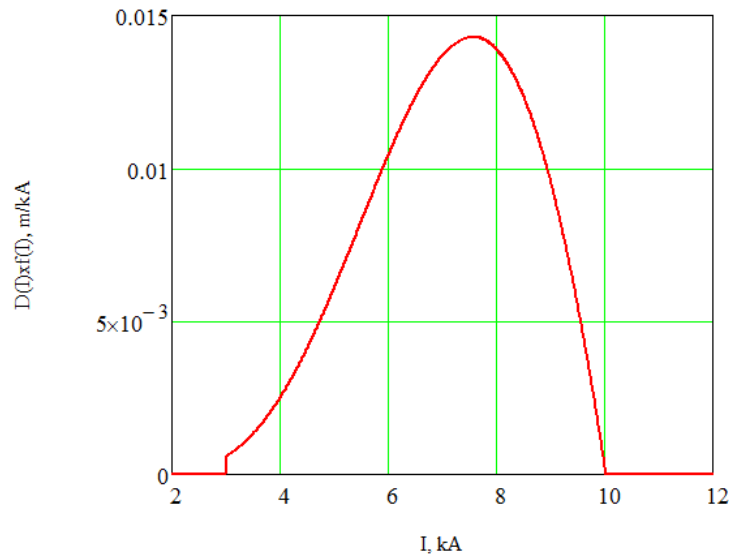


Рисунок 2 – Графік підінтегрального виразу в формулі (1)

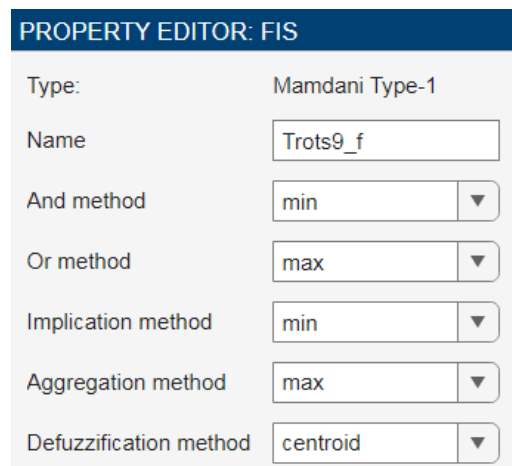


Рисунок 3 – Характеристика параметрів алгоритму Мамдані

Модель впливу струму блискавки  $I$  на частоту відмов екранування  $SFR$  синтезовано природною мовою за моделлю, наведеною на рис. 4.

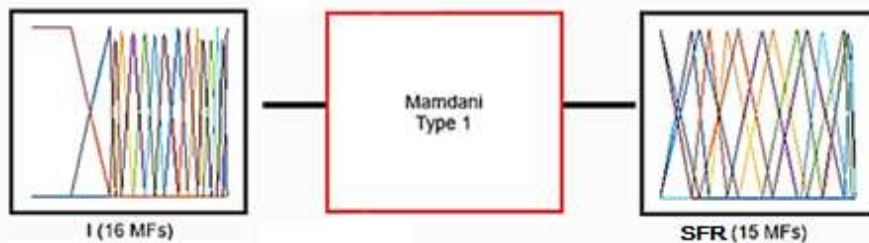


Рисунок 4 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу струму блискавки на частоту відмов екранування за алгоритмом Мамдані

Лінгвістична змінна «струм –  $I$ » представлена терм-множиною шістнадцяти нечітких змінних « $I_0$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $I_4$ , ...,  $I_{14}$ ,  $I_{15}$ ». З них « $I_0$ » представлена Z-подібною функцією належності (MFs), а « $I_{15}$ » – S-подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної «струм» в межах від 0 до 10 kA (у відносних одиницях від 0 до 1).

Вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування – *SFR*» представлена терм-множиною п'ятнадцяти нечітких змінних «*Z, GZ, GVL, GL, GA, GAA, GH, GVH, RVH, RH, RVA, RA, RL, RZ, ZE*». З них «*Z*» представлена *Z*-подібною функцією належності (MFs), а «*ZE*» – *S*-подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної «*SFR*» в межах від 0 до 0,01155 (у відносних одиницях від 0 до 1).

Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок струму блискавки *I* з частотою відмов екранування *SFR* наведено в табл. 1.

Таблиця 1 – Лінгвістичні правила вхідної змінної «струм» з ваговими коефіцієнтами «weight»

Rule	Weight
If I is I1 then SFR is GZ	1
If I is I2 then SFR is GVL	1
If I is I3 then SFR is GL	1
If I is I5 then SFR is GAA	1
If I is I6 then SFR is GH	1
If I is I4 then SFR is GA	1
If I is I7 then SFR is GVH	1
If I is I8 then SFR is GVH	0.4
If I is I8 then SFR is RVH	0.6
If I is I9 then SFR is RVH	1
If I is I10 then SFR is RH	1
If I is I11 then SFR is RVA	1
If I is I12 then SFR is RA	1
If I is I13 then SFR is RL	1
If I is I14 then SFR is RZ	1
If I is I0 then SFR is Z	1
If I is I15 then SFR is ZE	1

На рис. 5 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок струму блискавки *I* та частоту відмов екранування *SFR*.

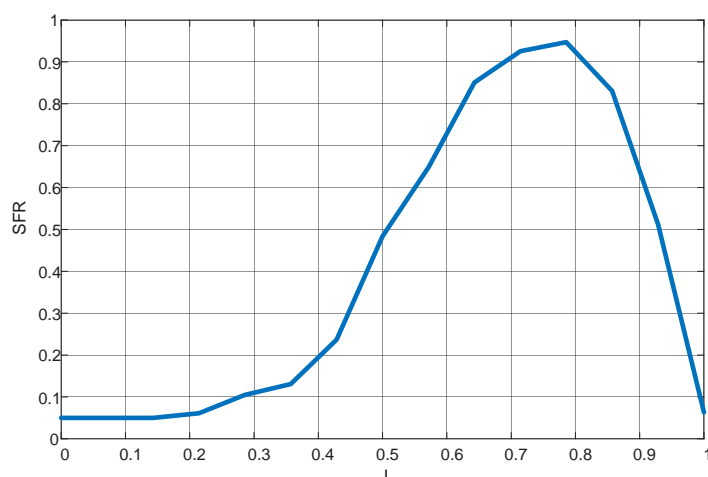


Рисунок 5 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування *SFR* від струму блискавки *I*

Модель впливу щільності ймовірності струму блискавки *f* на частоту відмов екранування *SFR* синтезовано природною мовою за моделлю наведеною на рис. 6.

Лінгвістична змінна «функція щільності ймовірності струму блискавки – *f*» представлена терм-множиною з п'яти нечітких змінних «*Z, AZ, L, VL, A*». З них «*Z*» представлена *Z*-подібною функцією належності (MFs), а «*A*» – *S*-подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені

трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної « $f$ » в межах від 0 до 0,027 (у відносних одиницях від 0 до 1).

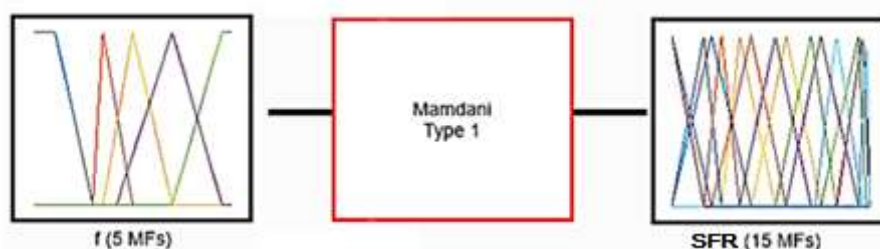


Рисунок 6 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу ймовірності струму блискавки на частоту відмов екранування

Вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування –  $SFR$ » представлена терм-множиною з п'ятнадцяти нечітких змінних, аналогічно попередній моделі (рис. 4).

Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок щільності ймовірності струму блискавки  $f$  з частотою відмов екранування  $SFR$  наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Лінгвістичні правила вхідної змінної « $f$ » з ваговими коефіцієнтами «weight»

Rule	Weight
If $f$ is L then SFR is GL	0.8
If $f$ is AZ then SFR is Z	1
If $f$ is Z then SFR is Z	1
If $f$ is L then SFR is GA	1
If $f$ is L then SFR is GVL	1
If $f$ is VL then SFR is GVH	1
If $f$ is VL then SFR is RA	1
If $f$ is A then SFR is ZE	0.8
If $f$ is VL then SFR is RZ	0.2
If $f$ is A then SFR is RZ	0.8
If $f$ is VL then SFR is RVA	1

На рис. 7 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок функції щільності ймовірності струму блискавки  $f$  з частотою відмов екранування  $SFR$ .

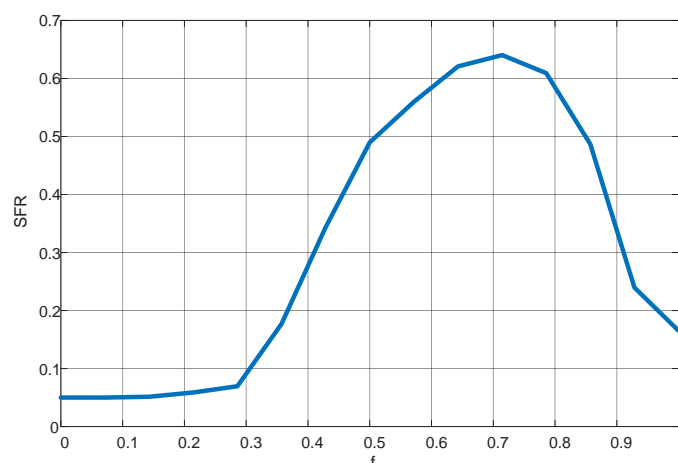


Рисунок 7 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування  $SFR$  від функції щільності ймовірності струму блискавки  $f$

Модель впливу ширини зони відмови блискавкозахисту  $D$  на частоту відмов екранування  $SFR$  синтезовано за моделлю наведеною на рис. 8.

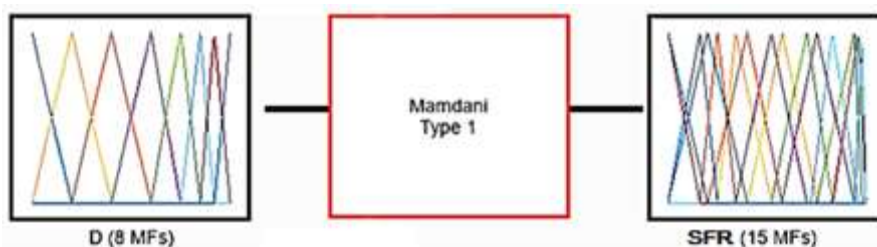


Рисунок 8 – Структурна схема Fuzzy моделі впливу ширини зони відмови блискавкозахисту на частоту відмов екранування

В наведеній моделі вихідна лінгвістична змінна «частота відмов екранування – SFR» представлена терм-множиною з п'ятнадцяти нечітких змінних, аналогічно попередніх моделей (рис. 4, рис. 6).

Лінгвістична змінна «ширина зони відмови блискавкозахисту – D» представлена терм-множиною з восьми нечітких змінних «Z, S, VS, A, VA, H, VH, AVH». З них «Z» представлена Z-подібною функцією належності, а «AVH» – S-подібною функцією належності. Всі інші нечіткі змінні представлені трикутними функціями належності з відповідним позиціонуванням по універсумі лінгвістичної змінної «D» в межах від 0 до 7 метрів (у відносних одиницях від 0 до 1). Лінгвістичні правила, що відображають зв'язок ширини зони відмови блискавкозахисту D з частотою відмов екранування SFR наведено в табл. 3.

Таблиця 3 – Лінгвістичні правила вхідної змінної «D»

Rule	Weight
If D is Z then SFR is ZE	1
If D is S then SFR is RA	1
If D is VS then SFR is RH	1
If D is VS then SFR is RVA	0.2
If D is A then SFR is RH	0.5
If D is A then SFR is RVH	1
If D is H then SFR is GH	1
If D is H then SFR is GAA	1
If D is VH then SFR is GL	0.5
If D is VH then SFR is GV	1
If D is AVH then SFR is Z	1
If D is VH then SFR is Z	1
If D is VA then SFR is GH	1

На рис. 9 наведено передаточну функцію нечіткої моделі, яка відображає зв'язок ширини зони відмови блискавкозахисту D з частотою відмов екранування SFR.

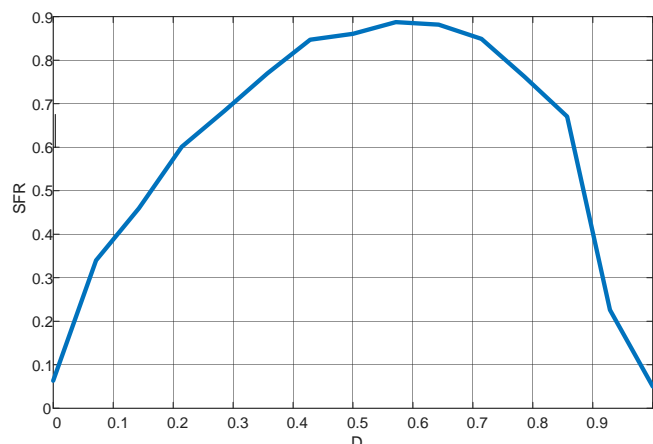


Рисунок 9 – Синтезована характеристика залежності частоти відмов екранування SFR від ширини зони відмови блискавкозахисту D

**Висновки.** На основі використання математичного апарату нечіткої логіки створено лінгвістичні моделі, які параметрично відтворюють передатні характеристики впливу функції щільності ймовірності струму блискавки, ширини зони відмови блискавкозахисту та струму блискавки на частоту відмов екранування *SFR* ліній електропередавання у всьому діапазоні змін цих параметрів.

Синтезовані передатні характеристики для ліній електропередавання напругою 330 кВ можливо використовувати в імітаційних моделях дослідження систем блискавкозахисту високовольтних ліній електропередавання різних рівнів напруги, використовуючи при цьому коефіцієнти масштабування.

Це дає можливість покращити точність прогнозування відмов екранування на основі змінних зовнішніх факторів, таких як інтенсивність блискавки та технічний стан ізоляції. Оскільки ці моделі враховують комплексну взаємодію різних параметрів, вони можуть бути ефективним інструментом для розробки більш надійних і гнучких систем блискавкозахисту в рамках сучасних концепцій Smart Grid.

#### **Список використаної літератури**

1. Dai S., Jianben L., Huang L., Liu Z., Xiao Q., Liu G. Shielding failure trip-out rate algorithm based on improved EGM transmission line. 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China. 2019. P. 319-323, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886256.
2. Tong C., Cai Y., Zhang Z., Wang Q., Gao Y., Li J., Wei B., Yu D. Artificial intelligence-based lightning protection of smart grid distribution system. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil. 2017. P. 279-286, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116937.
3. Троценко С. О., Архипов Я. А. Розумні мережі та захист повітряних ліній електропередачі від блискавки. Матеріали XXV Міжнародної науково-практичної конференції «Відновлювана енергетика та енергоефективність у XXI столітті», Київ, 22–24 травня 2024 року, 2024, С. 139-140, doi: 10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024.
4. Utomo B. T., Nappu M. B., Said S. M., Arief A. The placement of the transmission lightning arrester (TLA) at 150 kV network using fuzzy logic. 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, Indonesia. 2018. P. 347-352, doi: 10.1109/ICITEE.2018.8534899.
5. Hafeez K., Khan S. Risk management analysis with the help of lightning strike mapping around 500 k-v grid station using artificial intelligence technique. 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence, Rawalpindi, Pakistan. 2012. P. 165-168, doi: 10.1109/ICRAI.2012.6413384.
6. Hamel T., Bedoui S., Bayadi A. Impact of transmission line lightning performance on an operational substation reliability considering the lightning stroke incidence angle. *Electrical Engineering & Electromechanics*. 2025. No. 1. P. 56-64, doi: 10.20998/2074-272X.2025.1.08.
7. Trotsenko Y., Arkhypov Y. On application of polynomial functions in assessment of lightning shielding performance of overhead transmission lines. *Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University*. 2024. Issue 4(147). P. 186-193, doi: 10.32782/1995-0519.2024.4.24.
8. IEEE Std 1243-1997. IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines. 1997. P. 1-44, doi: 10.1109/IEEESTD.1997.84660.
9. Takami J., Okabe S. Observational results of lightning current on transmission towers. *IEEE Transactions on Power Delivery*. 2007. Vol. 22. No. 1. P. 547-556, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883006.
10. Berger K. Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. *Journal of the Franklin Institute*. 1967. Vol. 283. No. 6. P. 478-525, doi: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
11. Häusler M., Schlayer G., Fitterer G. Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings. *ABB review*. 1997. No. 3. P. 4-11.
12. Vaisala Xweather Interactive Global Lightning Density Map. URL: <https://interactive-lightning-map.vaisala.com> (дата звернення: 05.01.2025).
13. Кирик В. В. Математичний апарат штучного інтелекту в електроенергетичних системах: підручник / В. В. Кирик. – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, Вид-во «Політехніка». 2019. – 224 с., ISBN 978-966-622-969-7.

**Y. Trotsenko**<sup>1</sup>, Cand. Sc. (Eng.), Assoc. Prof, ORCID 0000-0001-9379-0061

**V.V. Kyryk**<sup>1</sup>, Dr. Sc. (Eng.), Prof., ORCID 0000-0003-0419-8934

<sup>1</sup>**National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"**

## **SYNTHESIS OF LINGUISTIC MODELS FOR REPLICATING THE IMPACT OF LIGHTNING ON THE SHIELDING FAILURE RATE OF AN OVERHEAD POWER TRANSMISSION LINE**

**Background.** Traditional methods for calculating lightning protection systems are continuously improving based on new knowledge about lightning and its characteristics. Growing demands for protection efficiency, especially for power transmission lines in the Smart Grid concept, create a need for new approaches. Fuzzy logic serves as one way to address these challenges, as it allows modeling complex and uncertain processes, which are



typical for lightning protection systems. **Objective.** The main goal is to develop a linguistic model for predicting the failure frequency of shielding based on lightning current parameters, the width of the failure zone, and the current probability density function. Simulation helps calculate failure frequencies that could lead to insulation flashovers and equipment damage. **Methods.** An electrogeometric model was used to determine the width of the shielding failure zone. The synthesis of linguistic models for replicating the effect of lightning on the shielding failure rate was performed using a mathematical apparatus of fuzzy logic. The shielding failure rate is considered, which determines the probability that lightning will strike the phase conductor, bypassing the overhead shield wire. It is assumed that the minimum current for calculations is 3.0 kA, which is the threshold below which no initial lightning strikes have been observed on real power transmission lines. The probability of such a lightning current is calculated to be only 0.23%. For modeling the lightning current probability density function, formulas similar to the results of measurements on research towers were used. **Results.** A data about the width of the lightning shielding failure zone on a typical 330 kV power transmission line tower is obtained, demonstrating how this zone changes with different prospective lightning current values. **Conclusions.** Simulating the failure frequency of shielding using fuzzy logic and the Mamdani algorithm allows for more accurate failure predictions, taking into account variable conditions. Structural diagrams and transfer functions demonstrate how different parameters, such as current, current density, and failure zone width, affect the failure frequency. All these parameters and their interrelationships are described using linguistic variables and fuzzy rules, enabling more effective predictions for lightning protection systems. This approach provides more accurate and flexible modeling, meeting modern requirements for the safety of overhead power transmission lines, especially within the Smart Grid concept.

**Keywords:** lightning, electrogeometric model, shielding failure rate, overhead power line, linguistic models, fuzzy logic, smart grids, failure prediction.

#### References

1. Dai, S., Jianben, L., Huang, L., Liu, Z., Xiao Q., & Liu, G. (2019). Shielding failure trip-out rate algorithm based on improved EGM transmission line. 2019 4th International Conference on Intelligent Green Building and Smart Grid (IGBSG), Hubei, China, pp. 319-323, doi: 10.1109/IGBSG.2019.8886256.
2. Tong, C., Cai, Y., Zhang, Z., Wang, Q., Gao, Y., Li, J., Wei, B., & Yu, D. (2017). Artificial intelligence-based lightning protection of smart grid distribution system. 2017 International Symposium on Lightning Protection (XIV SIPDA), Natal, Brazil, pp. 279-286, doi: 10.1109/SIPDA.2017.8116937.
3. Trotsenko, Y., & Arkhypov, Y. (2024). Smart grids and lightning protection of overhead power lines. XXV International Scientific and Practical Conference "Renewable energy and energy efficiency in the XXI century", Ukraine, Kyiv, May 22-24, pp. 139-140, doi: 10.36296/renewable.conf.22-24.05.2024.
4. Utomo, B. T., Nappu, M. B., Said, S. M., & Arief, A. (2018). The placement of the transmission lightning arrester (TLA) at 150 kV network using fuzzy logic. 2018 10th International Conference on Information Technology and Electrical Engineering (ICITEE), Bali, Indonesia, pp. 347-352, doi: 10.1109/ICITEED.2018.8534899.
5. Hafeez, K., & Khan, S. (2012). Risk management analysis with the help of lightning strike mapping around 500 k-v grid station using artificial intelligence technique. 2012 International Conference of Robotics and Artificial Intelligence, Rawalpindi, Pakistan, pp. 165-168, doi: 10.1109/ICRAI.2012.6413384.
6. Hamel, T., Bedoui, S., & Bayadi, A. (2025). Impact of transmission line lightning performance on an operational substation reliability considering the lightning stroke incidence angle. Electrical Engineering & Electromechanics, no. 1, pp. 56-64, doi: 10.20998/2074-272X.2025.1.08.
7. Trotsenko, Y., & Arkhypov, Y. (2024). On application of polynomial functions in assessment of lightning shielding performance of overhead transmission lines. Transactions of Kremenchuk Mykhailo Ostrohradskyi National University, Issue 4(147), pp. 186-193, doi: 10.32782/1995-0519.2024.4.24.
8. IEEE Std 1243-1997. (1997). IEEE Guide for improving the lightning performance of transmission lines, pp. 1-44, doi: 10.1109/IEEESTD.1997.84660.
9. Takami, J., & Okabe, S. (2007). Observational results of lightning current on transmission towers. IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 22, no. 1, pp. 547-556, doi: 10.1109/TPWRD.2006.883006.
10. Berger, K. (1967). Novel observations on lightning discharges: Results of research on Mount San Salvatore. Journal of the Franklin Institute, vol. 283, no. 6, pp. 478-525, doi: 10.1016/0016-0032(67)90598-4.
11. Häusler, M., Schlager, G., & Fitterer, G. (1997). Converting AC power lines to DC for higher transmission ratings. ABB review, no. 3, pp. 4-11.
12. Vaisala Xweather Interactive Global Lightning Density Map. URL: <https://interactive-lightning-map.vaisala.com> (January 05, 2025).
13. Kyryk, V. V. (2019). Mathematical Apparatus of Artificial Intelligence in Electric Power Systems: Textbook [Matematychnyy aparat shtuchnoho intelektu v elektroenerhetychnykh systemakh: pidruchnyk]. Kyiv. Igor Sikorsky KPI: Politehnika. – 224 P. ISBN 978-966-622-969-7.

Надійшла: 17.01.2025

Received: 17.01.2025