

Міністерство освіти і науки України
Національний технічний університет
«Дніпровська політехніка»

Кваліфікаційна наукова праця
на правах рукопису

ЗАМКОВА Ольга Андріївна

УДК 621.311.1:697.34:620.9:728.2

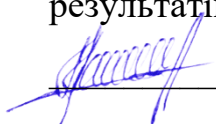
ДИСЕРТАЦІЯ
ПІДВИЩЕННЯ ЕНЕРГЕТИЧНОЇ ЕФЕКТИВНОСТІ РЕЖИМІВ
СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ ЖИТЛОВИХ БУДИНКІВ

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

14 – Електрична інженерія

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело

 О.А. Замкова

Науковий керівник: Кошеленко Є.В., кандидат технічних наук, доцент

Дніпро – 2026

АНОТАЦІЯ

Замкова О.А. Підвищення енергетичної ефективності режимів систем електропостачання житлових будинків. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка – Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», Міністерство освіти і науки України, Дніпро, 2026.

У дисертаційній роботі вирішено важливу наукову задачу, що полягає у встановленні закономірностей комплексного впливу класів енергетичної ефективності будівель, рівнів автоматизації їх інженерних мереж, інтеграції об'єктів розподіленої генерації та теплових насосів на формування енергоефективного режиму багатоквартирних житлових будинків, що дозволяє забезпечити вибір раціональних структур систем електропостачання.

Необхідність встановлення закономірностей впливу зазначених параметрів викликана розвитком підходів до проєктування та зміною у законодавчій базі України, а саме запровадженням обов'язкової сертифікації енергетичної ефективності будівель та досягнення мінімальних вимог щодо енергоспоживання систем кліматизації та теплофізичних властивостей огорожувальних конструкцій. Існуючі методи визначення електричних навантажень відповідно до ДБН В.2.5-23:2025 тривалий час не переглядались та потребують уточнення. Підходи до визначення електричних навантажень не враховують фактичний стан будівель та їх інженерних мереж, тому постає задача встановлення закономірностей комплексного впливу змін теплофізичних властивостей будівель, впровадження відновлюваних джерел енергії та автоматизованого управління режимами роботи інженерних систем на визначення питомих електричних навантажень багатоквартирних будинків з електроопаленням.

У дисертаційній роботі шляхом статистичного аналізу даних побудовано математичну модель для визначення питомих електричних навантажень з урахуванням показників енергетичної ефективності будівель та особливостей змін клімату. Отримано уточнені показники питомих електричних навантажень для систем електроопалення прямої дії для різних класів енергетичної ефективності будівель.

Запропоновано удосконалений алгоритм визначення електричних навантажень, який враховує клас енергетичної ефективності, рівні автоматизації систем моніторингу та управління інженерними системами будівель, наявність відновлюваних джерел та установок використання низькопотенційного тепла. Такий підхід дозволяє комплексно оцінити середню розрахункову потужність джерела енергозабезпечення та забезпечити раціональний вибір електротехнічного обладнання.

Особливістю дисертаційної роботи є комплексний підхід до дослідження режимів систем електропостачання житлових будинків, який поєднує аналіз нормативних вимог щодо енергетичної ефективності будівель із сучасними концепціями децентралізованого енергозабезпечення. На відміну від існуючих методик, запропонований підхід враховує взаємний вплив класу енергетичної ефективності будівлі, автоматизації інженерних систем, використання теплових насосів, дахових фотоелектричних станцій та змін кліматичних факторів на формування електричних навантажень. Це дозволило встановити закономірності формування режимів систем енергозабезпечення багатоквартирних будинків з електроопаленням та обґрунтувати принципи раціонального вибору електротехнічного обладнання систем електропостачання житлових будинків.

Теоретичне значення одержаних результатів полягає у розвитку науково-методичних підходів до оцінювання режимів систем енергозабезпечення багатоквартирних житлових будинків з урахуванням класу енергетичної ефективності будівель, рівня автоматизації інженерних систем, використання теплових насосів та об'єктів розподіленої генерації. У роботі встановлено закономірності впливу зазначених факторів на параметри електричних

навантажень і показники енергоефективності систем електропостачання, що розширює теоретичні засади проєктування сучасних енергоефективних житлових будівель та створює основу для вдосконалення нормативних методик визначення розрахункових електричних навантажень.

Практичне значення результатів дисертаційної роботи полягає у розробленні удосконаленого алгоритму визначення розрахункових електричних навантажень багатоквартирних житлових будинків з електроопаленням, який враховує клас енергетичної ефективності будівель, рівень автоматизації систем моніторингу та управління, інтеграцію теплових насосів. Запропоновані рішення забезпечують можливість обґрунтованого вибору параметрів обладнання систем електропостачання багатоквартирних будинків: трансформаторних підстанцій, кабельних мереж, комутаційної та захисної апаратури, дозволяють зменшити капітальні витрати під час проєктування систем електропостачання, підвищити їх енергетичну ефективність та надійність. Основні результати дослідження впроваджені у проєктній діяльності та використовуються в освітньому процесі під час підготовки фахівців електроенергетичного профілю.

Ключові слова: енергетична ефективність, електропостачання, дахова фотоелектрична станція, тепловий насос, режими енергоспоживання, електричне навантаження, система кліматизації, система енергозабезпечення.

SUMMARY

Zamkova O.A. Improving the energy efficiency of operating modes of power supply systems in residential buildings. – Qualifying scientific work on manuscript rights.

Dissertation for obtaining the scientific degree of Doctor of Philosophy in specialty 141 - Electrical energetics, electrical engineering and electromechanics – Dnipro University of Technology, Ministry of Education and Science of Ukraine, Dnipro, 2026.

The dissertation solves an important scientific problem consisting in establishing the regularities of the integrated influence of building energy efficiency classes, the levels of automation of their engineering systems, the integration of distributed generation facilities and heat pumps on the formation of an energy-efficient operating mode of multi-apartment residential buildings, which makes it possible to ensure the selection of rational power supply system structures.

The necessity of establishing the regularities of the influence of the above-mentioned parameters is driven by the development of design approaches and changes in the legislative framework of Ukraine, namely the introduction of mandatory certification of the energy performance of buildings and the achievement of minimum requirements for the energy consumption of climate control systems and the thermophysical properties of building envelope structures. The existing methods for determining electrical loads in accordance with DBN V.2.5-23:2025 have not been revised for a long time and require refinement. The approaches to determining electrical loads do not take into account the actual condition of buildings and their engineering systems; therefore, there is a need to establish the regularities of the integrated influence of changes in the thermophysical properties of buildings, the implementation of renewable energy sources, and the automated control of engineering system operating modes on the determination of specific electrical loads of multi-apartment buildings with electric heating.

In the dissertation, a mathematical model for determining specific electrical loads was developed by means of statistical data analysis, taking into account the energy performance indicators of buildings and the characteristics of climate change. Refined values of specific electrical loads for direct electric heating systems were obtained for different building energy efficiency classes.

An improved algorithm for determining electrical loads is proposed, which takes into account the building energy efficiency class, the levels of automation of monitoring and control systems for building engineering systems, the availability of renewable energy sources, and low-grade heat utilization systems. This approach makes it possible to comprehensively assess the average design capacity of the energy supply source and ensure the rational selection of electrical equipment.

A distinctive feature of the dissertation is the integrated approach to the study of operating modes of residential building power supply systems, which combines the analysis of regulatory requirements for the energy performance of buildings with modern concepts of decentralized energy supply. Unlike existing methodologies, the proposed approach considers the mutual influence of the building energy efficiency class, the automation of engineering systems, the use of heat pumps, rooftop photovoltaic power plants, and changes in climatic factors on the formation of electrical loads. This made it possible to establish the regularities of the formation of operating modes of energy supply systems for multi-apartment buildings with electric heating and to substantiate the principles of rational selection of electrical equipment for residential building power supply systems.

The theoretical significance of the obtained results lies in the development of scientific and methodological approaches to assessing the operating modes of energy supply systems for multi-apartment residential buildings, taking into account the building energy efficiency class, the level of automation of engineering systems, the use of heat pumps, and distributed generation facilities. The study establishes the regularities of the influence of these factors on electrical load parameters and the energy efficiency indicators of power supply systems, which expands the theoretical

foundations for designing modern energy-efficient residential buildings and creates the basis for improving regulatory methodologies for determining design electrical loads.

The practical significance of the dissertation results lies in the development of an improved algorithm for determining the design electrical loads of multi-apartment residential buildings with electric heating, taking into account the building energy efficiency class, the level of automation of monitoring and control systems, and the integration of heat pumps. The proposed solutions provide the possibility of substantiated selection of equipment parameters for power supply systems of multi-apartment buildings, including transformer substations, cable networks, switching and protective equipment, make it possible to reduce capital costs during the design of power supply systems, and improve their energy efficiency and reliability. The main research results have been implemented in design practice and are used in the educational process for the training of specialists in the field of electric power engineering.

Keywords: energy efficiency, power supply, rooftop photovoltaic power plant, heat pump, energy consumption modes, electrical load, climate control system, energy supply system.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ,

в яких опубліковані основні наукові результати дисертації

Статті у фахових виданнях:

1. Замкова О. А., Кошеленко А. О. (2026). Визначення питомих електричних навантажень багатоквартирних будинків. *Електротехнічні та інформаційні системи*, (109), 154–162. <https://doi.org/10.32782/EIS/2026-109-18>
2. Замкова, О., & Кошеленко, А. (2026). Дослідження річного енергоспоживання житлової будівлі з фотоелектричною станцією. *Електротехніка та електроенергетика*, (1), 75–83. <https://doi.org/10.15588/1607-6761-2026-1-8>
3. Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова. Аналіз ефективності систем енергозабезпечення багатоквартирних житлових будинків з тепловими насосами. Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2025 – № 83. С 209-219. DOI: [10.33271/crpnmu/83.209](https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.209)
4. Є.В. Кошеленко, І.М. Луценко, О.А. Замкова, П.С. Циган, А.О. Кошеленко. Технології створення систем комбінованого живлення об'єктів міст. Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2024 – № 79. С 222-230. DOI: [10.33271/crpnmu/79.222](https://doi.org/10.33271/crpnmu/79.222)
5. А.В. Рухлов, І.М. Луценко, Н.Ю. Рухлова, Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова. «Регулювання електроспоживання підприємств для зниження пікових навантажень в енергосистемі». Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2023 – № 74. С 204-212. DOI: [10.33271/crpnmu/74.204](https://doi.org/10.33271/crpnmu/74.204)

Тези доповідей:

6. Методика оцінки впливу кліматичних змін на сталий енергетичний розвиток територіальних громад / Замкова О.А., Лобода А.Ю. // Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада. III Науково-практична конференція. 15-17 жовтня 2025 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. 303 с. <https://science.nmu.org.ua/ua/conferences/Forum/Zbirnyk2025.pdf>

7. Основні засади кліматичної нейтральності та зеленого переходу України / Замкова О.А., Кошеленко А.О. // «Наукова весна» 2025: матеріали XV Міжнародної науково-технічної конференції аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 року / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2025. 156 с. https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2025/Scientific_Spring_2025.pdf

8. Основні аспекти створення раціональних структур систем електрозабезпечення муніципальних споживачів з використанням відновлюваних джерел енергії/ М. Луценко, А. Кошеленко, О. Запишний, Г. Власенко, Ю. Смирнов, О. Замкова // Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність. 20 грудня 2024 р. – 2024. Збірник тез. Дніпро. НТУ «ДП». 22-24 с. https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2024.pdf

9. Вплив значення температури оточуючого середовища на показники енергетичної ефективності будівлі / Замкова О.А., Кошеленко А.О. // Молодь: наука та інновації: Матеріали XII Міжнародної науково-технічної конференції студентів, аспірантів та молодих вчених. Дніпро, 13-15 листопада 2024 року: у 3-х т. / Національний технічний університет «Дніпровська політехніка» – Дніпро : НТУ «ДП», 2024. Том 2. 43-45 с. <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2024/molod-2024-vol2.pdf>

10. Циган П.С. Замкова О.А. Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність - 2023. «Вплив товщини шару

теплоізоляції на теплове значення втрат»; 3-5 с.
https://vde.nmu.org.ua/ua/lib/EE_2023.pdf

11. П.С. Циган, О.А. Замкова, С.А. Пінчук. Молодь: наука та інновації: XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22-24 листопада 2023 року. «Заходи з підвищення стійкості децентралізованих систем електропостачання» Том 1 427-428 с.
<https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2023/molod-2023-vol1.pdf>

12. P.S. Tsyhan, O.A. Zamkova, S.A. Pinchuk . 6rd International Scientific and Technical Internet Conference "Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources" 2023. «The influence of complex building renovation on minimization of heat losses and reduction of greenhouse gas emissions» Petroșani, Romania November 16, 2023. BOOK OF Abstracts edition 6/2023 Universitas Publishing Petroșani 55-56 p.
https://www.upet.ro/cercetare/manifestari/Ukraine_2023_Book_of_Abstracts.pdf

13. Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова. «Наукова весна» 2023: XIII Всеукраїнська науково-технічна конференція, 1-3 березня 2023 року. «Аналіз впливу підвищення енергетичної ефективності на системи електропостачання» 149-150 с. https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/naukova-vesna-2023/Scientific_Spring_2023.pdf

14. Ю.А. Папаїка, О.Г. Лисенко, О.А. Замкова, Д.І. Буртний. Молодь: наука та інновації: X Міжнародна науково-технічна конференція, 23-25 листопада 2022 року. «Розрахунок та проектування ліній електропередач з використанням онлайн сервісу SICAD» 317-318 с. <https://rmv.nmu.org.ua/ua/arkhiv-zbirok-konferentsiy/molod-nauka-ta-innovatsii-2022/molod-2022.pdf>

ЗМІСТ

АНОТАЦІЯ	2
ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ.....	13
ВСТУП.....	14
1 Аналіз стану проблеми та завдання дослідження	23
1.1 Аналіз методик визначення електричних навантажень об'єктів житлового сектора	23
1.2 Вимоги до будівель з позицій енергоефективності	28
1.3 Аналіз характерних класів енергоефективності будівель	33
1.4 Аналіз поточного стану систем енергозабезпечення будівель.....	38
1.5 Технічний стан та режими роботи систем електропостачання	43
1.6 Висновки і постановка задач дослідження	46
2 Побудова моделі багатоквартирної будівлі для аналізу режимів енергоспоживання	48
2.1 Теплофізичні властивості зовнішніх оболонок	48
2.2 Врахування стану інженерних мереж.....	60
2.3 Моделювання графіків теплових навантажень	71
2.4 Обґрунтування підходів визначення потужності систем електроопалення ..	81
2.5 Запровадження низькотемпературних систем опалення	91
2.6 Переведення на теплонасосне обладнання	95
2.7 Визначення SCOP	105
2.8 Визначення розрахункових навантажень СЕП багатоквартирних будинків із системою електроопалення	112
3 Вдосконалення методики визначення електричних навантажень.....	121

3.1 Обґрунтування показників, які мають бути враховані при проєктуванні СЕП багатоквартирних будинків.....	121
3.2 Моделювання режимів роботи СЕП багатоквартирних будинків з електричним опаленням	123
3.3 Визначення потужності джерела електроопалення	130
3.4 Алгоритм визначення раціональної потужності СЕП	134
4 Впровадження дахових ФЕС для досягнення показників кліматичної нейтральності.....	139
4.1 Моделювання режимів генерації дахових ФЕС	139
4.2 Передумови формування показників операційної та повної кліматичної нейтральності.....	145
4.3 Оцінка умов досягнення кліматичної нейтральності для багатоквартирних будинків	149
4.4 Оцінка економічної ефективності дахових ФЕС.....	154
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	160
ДОДАТОК А	167

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

АСМУБ – автоматизація систем моніторингу та управління будівель;

КЕЕ – клас енергетичної ефективності;

ОРГ – об'єкти розподіленої генерації;

СРГ – системи розподіленої генерації;

ТН – тепловий насос;

ФЕС – фотоелектричні станції;

ФЕМ – фотоелектричні модулі;

СОР – коефіцієнт ефективності претворення енергії

ІТП – індивідуальний тепловий пункт

ЦТП – центральний тепловий пункт

ОК – огорожувальні конструкції

ЕОПД – електроопалення прямої дії

МЗК – місця загального користування

ГВП – гаряче водопостачання

ЕЕБ – енергетична ефективність будівель

ЗУ – Закон України

ТЕН – трубчастий електричний нагрівач

ЖКГ – житлово-комунальне господарство

ВСТУП

Актуальність теми.

У теперішній час особливо актуальними задачами з наукової та практичної точки зору є підвищення енергобезпеки та енергонезалежності України. Зниження споживання енергетичних ресурсів у ЖКГ є однією з пріоритетних задач євроінтеграції. Застарілість центральних теплових мереж, регулярні аварійні ситуації на теплових магістралях та додаткові втрати, які виникають при транспортуванні теплової енергії супроводжуються значними фінансовими збитками для налагодження та реконструкції мереж. Така ситуація ставить ряд викликів, щоб задовольнити потреби населення. Основними споживачами теплової енергії є житлові багатоквартирні будівлі. Поточний стан інженерних мереж будівель ставить питання необхідності тотальної реконструкції систем енергозабезпечення з метою подолання викликів та задоволення енергопотреб споживачів. Актуальність проблеми підсилюється відмовою споживачів від централізованого енергозабезпечення та масовим переходом на електроопалення. Цей факт зумовлює підвищення вимог до пропускну здатності систем електропостачання та необхідність завищення їх параметрів в 2-3 рази, а також оцінки спроможності існуючої електричної мережі забезпечити надійне електропостачання споживачів.

Тому постає необхідність у підвищенні рівня енергетичної ефективності будівель та встановлення закономірностей впливу комплексної реновації будівлі на параметри електричних навантажень та ефективність вибору параметрів обладнання систем електропостачання з наближенням їх характеристик до раціональних, одночасним задоволенням потреб споживачів та комфортних умов відповідних приміщень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи були застосовані під час виконання госпдоговірних науково-дослідних робіт: «Обґрунтування раціональної структури системи низьковуглецевого енергозабезпечення

м. Першотравенськ, Синельниківський р-н, Дніпропетровська обл.» (072292-24, 2024 р.), «Розробка енергетичного плану Черкаської селищної територіальної громади до 2030 року», (072205-2, 2025 р.), «План дій сталого енергетичного розвитку та клімату Перещепинської міської територіальної громади на період до 2050 року» (072214-25, 2025 р.), «Стратегія розвитку Черкаської селищної територіальної громади до 2030 року», (072241-26, 2026 р.) та молодіжної наукової тематики МОН на тему «Моделі та засоби підвищення енергоефективності та надійності мікрогрід-систем в розрізі концепцій Industry 4.0 і GreenTech» (наказ МОН України від 12.01.2017 № 40).

Наукова задача дисертаційної роботи полягає у встановленні закономірностей комплексного впливу класів енергетичної ефективності будівель, рівнів автоматизації їх інженерних мереж, інтеграції об'єктів розподіленої генерації та теплових насосів на формування енергоефективного режиму багатоквартирних житлових будинків, що дозволяє забезпечити вибір раціональних структур систем електропостачання.

Мета і задачі дослідження.

Мета досліджень полягає у забезпеченні ресурсо- та енергоефективності використання обладнання систем електропостачання об'єктів житлової інфраструктури міст у відповідності до фактичних режимів роботи з урахуванням класів енергетичної ефективності будівель.

Для досягнення мети поставлено та вирішено наступні задачі:

- оцінити відповідність параметрів обладнання діючих систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків за показниками фактичних режимів роботи;
- оцінити технічну спроможність та енергетичну ефективність режимів роботи обладнання при переведенні об'єктів житлової інфраструктури на електроопалення;
- проаналізувати існуючі методологічні підходи щодо проєктування систем електропостачання об'єктів житлової інфраструктури міст та визначити потенційні фактори підвищення їх енергетичної ефективності;

- встановити закономірності впливу класів енергетичної ефективності та рівнів автоматизації систем моніторингу та управління будівель на режими роботи систем електропостачання багатоквартирних житлових будівель;
- встановити закономірності впливу об'єктів розподіленої генерації електричної та теплової енергії на режими роботи систем електропостачання багатоквартирних житлових будівель;
- обґрунтувати вдосконалений алгоритм вибору обладнання систем електропостачання з урахуванням встановлених закономірностей впливу класів енергетичної ефективності, об'єктів розподіленої генерації, рівні автоматизації систем моніторингу та управління будівель;
- оцінити потенційний економічний ефект від впровадження розроблених заходів щодо підвищення енергетичної ефективності режиму роботи систем електропостачання житлових будинків.

Об'єкт дослідження: системи електропостачання багатоквартирних житлових будинків.

Предмет дослідження: режими електроспоживання багатоквартирних житлових будинків різних класів енергетичної ефективності.

Методи дослідження. При виконанні досліджень використовувались теоретичні методи досліджень, а також математичне моделювання житлових будинків, об'єктів фотоелектричних станцій з використанням програмного продукту PV Syst та методів математичної статистики.

Ідея роботи полягає у забезпеченні енергоефективних процесів електропостачання, зниження навантаження на електричну мережу та раціонального вибору устаткування прибудинкових ТП.

Допущення, прийняті у роботі:

1. Клас енергетичної ефективності будівель визначається енергоспоживанням системи опалення, часткою енергоспоживання системи охолодження – знехтувано.
2. Прийнято, що усі складові енергоспоживання опалення пропорційні різниці температур.

3. Розрахункове значення потужності електроопалення визначається пропорційно граничному максимальному значенню розрахункового енергоспоживання для кожного класу енергетичної ефективності будівель.

Наукові положення, що виносяться на захист.

1. Раціональна потужність електроопалення багатоквартирних будинків прямо пропорційна граничному значенню енергоспоживання будівель стандартних класів енергетичної ефективності з урахуванням місцевих кліматичних умов та знаходиться в діапазоні 0,21-1,00 від нормативного значення.

2. Формування інверсного до побутового електроспоживання режиму роботи системи електроопалення багатоквартирних житлових будинків лінеаризує добовий графік електричних навантажень та знижує їх розрахункову електричну потужність на 14-30 % залежно від класу енергетичної ефективності будівель та місцевих кліматичних умов.

Наукові результати та їх новизна

1. Встановлено, що врахування класів енергетичної ефективності типових багатоквартирних будинків з системами прямого електроопалення дозволяє зменшити розрахункові електричні навантаження до 4,7 разів при збереженні надійності електропостачання та забезпеченні належних умов роботи системи кліматизації.

2. Запропоновано уточнений алгоритм визначення електричних навантажень багатоквартирних житлових будинків з різними системами електроопалення, що враховує фактичні кліматичні показники, клас енергетичної ефективності та рівні автоматизації систем моніторингу та управління будівлями.

3. Набуло подальшого розвитку керування системами електричного опалення шляхом застосування закону інверсного регулювання їхньої потужності відносно базового графіка електричних навантажень будівлі, що, на відміну від традиційного керування за температурним режимом, забезпечує

вирівнювання графіка електроспоживання, зниження його пікових значень і зменшення повного розрахункового навантаження будівлі до 30 %.

4. Оснащення житлових будинків низькотемпературними теплонасосними системами опалення дозволяє у 2,1-2,5 рази зменшити електроспоживання систем кліматизації будівель та досягти показників операційної кліматичної нейтральності за рахунок енергії, згенерованої даховими ФЕС у річному вимірі.

Обґрунтованість та достовірність наукових положень і результатів.

Наукові положення, висновки і рекомендації, запропоновані у роботі, підтверджуються: коректністю допущень і початкових умов, прийнятих у математичних моделях, їх відповідністю завданням моделювання та умовам експлуатації електрообладнання багатоквартирних будинків; результатами зіставлення теоретичних і експериментальних досліджень, проведених в реальних умовах із застосуванням сучасного вимірювального комплексу; позитивним досвідом впровадження результатів роботи.

Практичне значення одержаних результатів.

1. Існуюча методика проєктування систем електропостачання багатоквартирних будинків оперує сталим значенням питомої потужності електроопалення і не враховує клас енергетичної ефективності будівлі та рівні АСМУБ, що призводить до завищення розрахункової потужності приєднання, перерізів ліній електропередачі та номінальних параметрів захисної й комутаційної апаратури. Для прийняття раціональних типорозмірів обладнання системи електропостачання багатоквартирних будинків та забезпечення енергоефективних режимів його роботи запропоновано введення питомих норм електроопалення, які враховують клас енергетичної ефективності будівлі, рівні систем автоматизації управління енергоспоживанням та комплексно враховують узгодження температурного режиму будівлі з режимом системи електропостачання в умовах географічного розташування.

2. Спосіб визначення питомих навантажень систем електроопалення багатоквартирних будинків на основі врахування класів енергетичної ефективності, теплофізичних властивостей будівлі, типів систем кліматизації та

географічного розташування є універсальним і може застосовуватися для проєктування новобудов та модернізації будівель існуючого житлового фонду.

3. Переведення будівель на низькотемпературні системи кліматизації дозволяє впроваджувати теплові насоси типу повітря-вода в якості основного джерела теплової енергії із забезпеченням покриття теплового навантаження упродовж усього року з урахуванням можливості покриття пікових навантажень в режимах зовнішніх температур, що відповідають розрахунковим.

4. Створення енергоефективних житлових комплексів з даховими фотоелектричними станціями та тепловими насосами в якості основного джерела енергії для систем кліматизації дозволяє досягати показників повної або операційної кліматичної нейтральності, що може виступати додатковим стимулюючим чинником для залучення інвестицій на повоєнну відбудову України.

5. Результати дисертаційної роботи у вигляді удосконаленої методики визначення електричних навантажень багатоквартирних будинків для проєктування їх систем електропостачання та алгоритму врахування класу енергетичної ефективності, рівнів систем автоматизації управління енергоспоживанням, наявності об'єктів розподіленої генерації та теплових насосів в складі систем кліматизації впроваджено у ТОВ «Електал» та отримало підтримку Департаменту житлово-комунального господарства і будівництва Дніпропетровської ОВА.

6. Результати досліджень, розроблені заходи та підходи використовуються в освітньому процесі на кафедрі електроенергетики Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» в рамках дисциплін «Основи енергетичного менеджменту», «Енергетичні мережі будівель і споруд», «Електропостачання промислових підприємств та міст» при підготовці здобувачів за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Апробація результатів дисертації. Основні матеріали і результати, отримані в дисертаційній роботі, доповідались і були схвалені на науково-технічних конференціях:

- Енергетична трансформація вугледобувних громад: Наукова весна 2026: XVI Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених. Дніпро, 4-6 березня 2026 року, Дніпро.

- Методика оцінки впливу кліматичних змін на сталий енергетичний розвиток територіальних громад: Міжнародний форум: безпечна, комфортна та спроможна територіальна громада. III Науково-практична конференція. 15-17 жовтня 2025 року, Дніпро.

- Основні засади кліматичної нейтральності та зеленого переходу України: Наукова весна 2025: XV Міжнародна науково-технічна конференція аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 26–28 березня 2025 р.

- Основні аспекти створення раціональних структур систем електрозабезпечення муніципальних споживачів з використанням відновлюваних джерел енергії: Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність. 20 грудня 2024 р. – 2024, Дніпро.

- Вплив значення температури оточуючого середовища на показники енергетичної ефективності будівлі: Молодь: наука та інновації: XII Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених. Дніпро, 13-15 листопада 2024 року: у 3-х т.

- Вплив товщини шару теплоізоляції на теплове значення втрат : Міжнародна науково-практична конференція енергозбереження та енергоефективність – 2023, Дніпро.

- Заходи з підвищення стійкості децентралізованих систем електропостачання: Молодь: наука та інновації: XI Міжнародна науково-технічна конференція студентів, аспірантів та молодих вчених, Дніпро, 22-24 листопада 2023 р.

- The influence of complex building renovation on minimization of heat losses and reduction of greenhouse gas emissions: 6rd International Scientific and Technical

Internet Conference «Innovative development of resource-saving technologies and sustainable use of natural resources» 2023, Petroșani, Romania November 16, 2023.

- Аналіз впливу підвищення енергетичної ефективності на системи електропостачання: Наукова весна 2023: XIII Міжнародна науково-технічна конференція, 1-3 березня 2023 року, Дніпро.

- Розрахунок та проектування ліній електропередач з використанням онлайн сервісу SICAD: Молодь: наука та інновації: X Міжнародна науково-технічна конференція, 23-25 листопада 2022 року, Дніпро.

Публікації. Основні положення і результати роботи опубліковані у 14 друкованих працях, з них 5 – статті у фахових виданнях, 9 – матеріали наукових конференцій.

Особистий внесок здобувача полягає у формулюванні мети та основних завдань дослідження, зборі, обробці та аналізі інформації щодо режимів роботи систем енергозабезпечення багатоквартирних будинків. Автором досліджено енергоспоживання будівель різних класів енергетичної ефективності, запропоновано математичну модель переходу від граничного значення енергоспоживання систем кліматизації до середньої та розрахункової потужностей систем електроопалення з використанням температурних факторів. Автором досліджено типові графіки побутового енергоспоживання, створено модель графіка роботи системи електроопалення. Також запропоновано застосування інверсного до побутового енергоспоживання алгоритму управління системою електроопалення, що дозволяє зменшити розрахункову потужність системи електропостачання будівлі, а також лінеаризувати графік електричних навантажень житлових будівель з системою електроопалення. На основі моделювання режимів енергоспоживання систем кліматизації будівель з урахуванням місцевих кліматичних умов, а також очікуваних режимів генерації електричної енергії даховими фотоелектричними станціями, розміщеними на багатоквартирних житлових будинках, зроблено висновок про можливість досягнення показника операційної кліматичної нейтральності за рахунок комплексної термомодернізації та впровадження об'єктів сонячної генерації.

Автором також досліджено можливість переходу на низькотемпературні системи опалення багатоквартирних будинків та впровадження теплонасосних систем в якості основного джерела теплової енергії для багатоквартирних будинків. Встановлено, що теплові насоси класу повітря-вода можуть бути легко інтегровані в існуючі системи кліматизації будівель та забезпечувати покриття теплових навантажень упродовж усього опалювального сезону. При цьому досягається додаткове зниження потужності системи електропостачання порівняно з впровадженням системи електроопалення прямої дії.

Структура і обсяг дисертаційної роботи. Дисертація складається зі вступу, чотирьох розділів і висновків, викладених на 169 сторінках машинописного тексту, ілюстрованого 21 рисунком. Робота містить 35 таблиць, перелік посилань із 65 найменувань на 7 сторінках.

1 Аналіз стану проблеми та завдання дослідження

1.1 Аналіз методик визначення електричних навантажень об'єктів житлового сектора

Державні будівельні норми України В.2.5-23:2025 «Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення» [1] висувають окремі вимоги до системи електропостачання багатоквартирних житлових будинків:

1. У споруджуваних, а також тих будинках та спорудах, що підлягають реконструкції і капітальному ремонту, живлення струмоприймачів належить здійснювати від мережі 380/220 В із системою заземлення TN-S або TN-C-S.

В мережах із системою заземлення TN-C-S розділення PEN-провідника на РЕ- і N-провідники рекомендується виконувати у ВП, ВРП, ГРЩ на вводах у будинок (споруду).

У будинках та спорудах із вбудованими і прибудованими ТП перевагу треба віддавати мережам із системою заземлення TN-S відповідно до ДБН В.2.5-27 та глави 1.7 ПУЕ.

2. За ступенем надійності електропостачання струмоприймачі належать до категорій, вказаних у табл. 2.1 ДБН В.2.5-23:2025 [1].

3. Електропостачання приймачів II категорії надійності електропостачання рекомендується здійснювати від двох незалежних взаєморезервованих джерел. Допускається перерва в електропостачанні на час, необхідний для вмикання резервного живлення черговим персоналом чи виїзною оперативною бригадою.

4. Електропостачання приймачів III категорії надійності електропостачання може здійснюватися від одного джерела живлення за умови, що перерва в електропостачанні, яка необхідна для ремонту і заміни пошкодженого елемента системи електропостачання, не перевищує однієї доби.

5. Допускається, як виняток, поширювати вимоги до надійності електропостачання струмоприймачів більш високої категорії на струмоприймачі нижчої категорії будинку або споруди з ініціативи власника за узгодженням з електропередавальною організацією.

6. Живлення силових струмоприймачів і освітлення рекомендується здійснювати від спільних трансформаторів. При цьому допустимі відхилення і коливання напруги в освітлювальних приладах не повинні перевищувати вказаних у ДСТУ EN 50160:2023 «Характеристики напруги електропостачання в електричних мережах загальної призначеності».

Вимоги допустимих значень коливань напруги не відносяться до ліній живлення аварійного освітлення.

Допустимі відхилення напруги на затискачах силових струмоприймачів вказані в табл. 1.

Таблиця 1 – Відхилення від номінальної напруги на затискачах силових струмоприймачів [1].

Тип електроприймача та режим роботи	Відхилення від номінальної напруги, %	
	зниження	підвищення
Електродвигуни:		
а) тривала робота в сталому режимі – нормальна розрахункова величина;	5	5
б) тривала робота в сталому режимі – для окремих особливо віддалених електродвигунів:		
1) за номінальних умов	8-10	-
2) за аварійних умов;	10-12	-
в) короткочасна робота в сталому режимі (наприклад, під час пуску сусіднього великого двигуна);	20-30	-
г) на затискачах електродвигуна під час його пуску:		
1) за частих пусків;	10	
2) за рідких пусків	15 ¹	
Електроплити:		
тривала робота – нормальна розрахункова величина	5	5
Зварювальні апарати	8-10	-

Примітка: ¹ – Більше відхилення може бути допущено тільки після перевірки розрахунком можливості пуску електродвигунів.

Вимоги щодо надійності електропостачання обумовлюють конфігурацію системи електропостачання при використанні традиційних систем кліматизації багатоквартирних будинків, а також спричиняють додаткові витрати, пов'язані з реконструкцією систем електропостачання при переведенні на електроопалення.

Навантаження житлових будинків:

1. Розрахункове навантаження групових мереж освітлення загальнобудинкових приміщень житлових будинків (сходових кліток, вестибюлів, технічних поверхів, підвалів, горищ, колясочних), а також житлових приміщень гуртожитків визначається за світлотехнічним розрахунком з коефіцієнтом попиту K_{non} , що дорівнює 1.

2. Житла (квартири) щодо оснащеності побутовими електроприладами та їх розрахункових навантажень умовно поділяються на три види:

1 – житла (квартири) в будинках масового будівництва, споруджених чи споруджуваних із загальною площею від 35 м² до 95 м² включно та заявленою (встановленою) потужністю струмоприймачів до 30 кВт включно;

2 – житла (квартири) в багатоквартирних будинках, споруджених чи споруджуваних із загальною площею від 50 м² до 300 м² включно та заявленим замовником високим рівнем комфортності, що відповідає встановленій потужності струмоприймачів від 30 кВт до 60 кВт включно;

3 – житла (квартири) в котеджах, будинках, споруджених чи споруджуваних із розрахунку, як правило, на одну родину із загальною площею від 150 м² до 600 м² включно та заявленим замовником високим рівнем комфортності, що відповідає встановленій потужності струмоприймачів від 60 кВт до 140 кВт включно.

Для жител 1-го виду (квартир у багато- та малоквартирних будинках, будинках на одну родину і будиночках на ділянках садівничих товариств) встановлюються п'ять рівнів електрифікації та відповідні їм нормативні розрахункові питомі навантаження:

I – житла (квартири) з плитами на природному газі;

II – житла (квартири) з плитами на скрапленому газі та на твердому паливі;

III – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 8,5 кВт включно;

IV – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно;

V – будиночки на ділянках садівничих товариств.

Більшість помешкань (квартир) багатоквартирних будинків типової житлової забудови відносяться до жител 2-го виду. Для жител 2-го виду встановлюються два рівні електрифікації та відповідні їм нормативні розрахункові питомі навантаження:

I – житла (квартири) з плитами на природному газі;

II – житла (квартири) з електричними плитами потужністю до 10,5 кВт включно.

Встановлені нормативи питомих електричних розрахункових навантажень зведені в таблицю 2 і враховують застосування в житловому приміщенні побутових кондиціонерів повітря та комфортного електричного доопалення у межах 7-15 % від загальної потреби в теплі з розрахунку 60-120 Вт на 1 м² доопалюваної площі.

1.2 Вимоги до будівель з позицій енергоефективності

Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» [2], який вступив в дію з 01 липня 2019 року, зобов'язує проводити сертифікацію рівня енергетичної ефективності будівель. Вона є обов'язковою для:

1. Об'єктів будівництва (нового будівництва, реконструкції, капітального ремонту), що за класом наслідків (відповідальності) належать до об'єктів із середніми (СС2) та значними (СС3) наслідками, що визначаються відповідно до Закону України "Про регулювання містобудівної діяльності";

2. Будівель державної власності з опалюваною площею понад 250 квадратних метрів, які часто відвідують громадяни і у всіх приміщеннях яких розташовані органи державної влади;

3. Будівель з опалюваною площею понад 250 квадратних метрів, у всіх приміщеннях яких розташовані органи місцевого самоврядування (у разі здійснення ними термомодернізації таких будівель);

4. Будівель, в яких здійснюється термомодернізація, на яку надається державна підтримка та яка має наслідком досягнення класу енергетичної ефективності будівлі не нижче мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівлі.

Цей Закон визначає правові, соціально-економічні та організаційні засади діяльності у сфері забезпечення енергетичної ефективності будівель і спрямований на зменшення споживання енергії у будівлях [2].

Стимулювання та сприяння підвищенню рівня енергетичної ефективності будівель може забезпечуватися шляхом здійснення: обстеження інженерних систем та запровадження незалежного моніторингу звітів про результати таких обстежень; сертифікації енергетичної ефективності та запровадження незалежного моніторингу енергетичних сертифікатів (Закон України «Про енергетичну ефективність будівель», Стаття 12. п. 1) [2].

В Законі зазначено наступні основні заходи з підвищення рівня енергоефективності будівель (Стаття 12, п.3):

1. Підвищення теплотехнічних показників огорожувальних конструкцій будівель до мінімальних вимог, визначених ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція та енергоефективність будівель» [3];

2. Встановлення засобів обліку, у тому числі засобів диференційного (погодинного) обліку споживання електричної енергії, та засобів автоматичного регулювання споживання енергетичних ресурсів і води;

3. Впровадження автоматизованих систем моніторингу та управління інженерними системами; підвищення енергетичної ефективності інженерних систем; використання відновлюваних джерел енергії (з використанням інженерних систем будівлі);

4. Застосування систем акумуляції теплової та електричної енергії; здійснення інших енергоефективних заходів у будівлях.

Відповідно, після затвердження ЗУ були розроблені Мінімальні вимоги до енергетичної ефективності будівель. Вони встановлюють, що при новому будівництві, реконструкції, яка веде до зміни функціонального призначення будівлі, мінімальною вимогою щодо енергетичної ефективності будівлі є клас "С", але при реконструкції, капітальному ремонті будівель в цілому або їх відокремлених частин мінімальною вимогою є виконання умови [3]:

$$EP_{use} \leq 1,2EP_p,$$

де EP_{use} – загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні, кВт·год/м² (кВт·год/м³);

EP_p – граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових та громадських кВт·год/м² (кВт·год/м³), що наведене у табл.1.

Розрахункове значення EP_{use} для житлових будівель визначають за формулою [3]:

$$EP_{use} = \frac{Q_{H,use} + Q_{C,use}}{A_f},$$

де $Q_{H,use}$, $Q_{C,use}$ – річне енергоспоживання будівлі при опаленні та охолодженні, відповідно, кВт·год.

A_f – кондиціонована (опалювана) площа для житлової, м².

Таблиця 3 – Граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових будівель [3]

№ з/п	Вид будівлі (еталонні будівлі)	Граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні, EP_p , кВт·год/м ²	
		I	II
1	Будівлі житлові (поверховість):		
	від 1 до 3	120	110
	від 4 до 9	85	75
	від 10 до 16	75	70
	17 і більше	70	65

Окрім загальних показників енергетичної ефективності будівель, також нормуються вимоги й до теплотехнічних показників елементів теплоізоляційної оболонки будівель.

Для зовнішніх огорожувальних конструкцій будівель та споруд, що опалюються та/або охолоджуються, і внутрішніх конструкцій, що розділяють приміщення, температура повітря в яких відрізняється на 4 °С та більше, обов'язкове виконання умов [3]:

$$R_{\Sigma pr} \geq R_{q min};$$

$$\Delta T_{pr} \leq \Delta T_{cr};$$

$$T_{B min} > T_{min},$$

де $R_{\Sigma \text{пр}}$ – приведений опір теплопередачі непрозорої огорожувальної конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції (для термічно однорідних огорожувальних конструкцій визначається опір теплопередачі), приведений опір теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$R_{q \text{ min}}$ – мінімально допустиме значення опору теплопередачі непрозорої конструкції чи непрозорої частини огорожувальної конструкції, мінімальне значення опору теплопередачі світлопрозорої огорожувальної конструкції, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

$\Delta T_{\text{пр}}$ – температурний перепад між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$\Delta T_{\text{ст}}$ – допустима за санітарно-гігієнічними вимогами різниця між температурою внутрішнього повітря і приведеною температурою внутрішньої поверхні огорожувальної конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

$T_{\text{в min}}$ – мінімальне значення температури внутрішньої поверхні в зонах теплопровідних включень в огорожувальній конструкції, $^{\circ}\text{C}$;

T_{min} – мінімально допустиме значення температури внутрішньої поверхні при розрахункових значеннях температур внутрішнього й зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$.

До окремих огорожувальних конструкцій теплоізоляційної оболонки відносяться зовнішні стіни, внутрішні стіни та перекриття, що розмежовують опалювальні та неопалювальні об'єми, стіни нижче рівня ґрунту, підлоги по ґрунту, перекриття неопалювальних горищ, перекриття над проїздами та неопалювальними підвалами, покриття різних типів, світлопрозорі конструкції, зовнішні двері.

При розрахунках енергоефективних показників прийнято відповідне зонування міст та регіонів України, яке наведено на рис.1 [3].



Рисунок 1 – Карто-схема температурних зон України [3]

Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі непрозорих огорожувальних конструкцій і дверей житлових і громадських будівель R_{qmin} встановлюють відповідно до табл. 4 залежно від температурної зони експлуатації будинку [3].

За останні декілька років, вимоги до будівель та споруд було переглянуто та підвищено. Це сприяє зменшенню енергоспоживання та реалізації концепції «пасивних будинків» та «нульової енергії». Для порівняння та аналізу змін, відповідні значення наведено у таблицях.

Наразі, вимоги до опору теплопередачі огорожуючих конструкцій будівель та споруд близькі до мінімальних значень ЄС. В кожній країні вимоги варіюються в залежності від кліматичних умов, типу будівель та регіону.

Таблиця 4 – Мінімально допустиме значення приведенного опору теплопередачі огорожувальної конструкції житлових та громадських будівель [3].

	Вид огорожувальної конструкції	Значення R_{qmin} , $m^2 \cdot K/W$, для температурної зони	
		I	II
1	Зовнішні стінові огорожувальні конструкції	4,00 (3,3) ¹	3,50 (2,8) ¹
2	Суміщені покриття, що межують із зовнішнім повітрям	7,00 (6,0) ¹	6,00 (5,5) ¹
3	Покриття опалюваних горищ (технічних поверхів), мансард, горищні перекриття неопалюваних горищ	6,00 (4,95) ¹	5,50 (4,5) ¹
4	Перекриття, що межують із зовнішнім повітрям, та над неопалюваними підвалами	5,00 (3,75) ¹	4,00 (3,3) ¹
5	Світлопрозорі огорожувальні конструкції	0,90 (0,75) ¹	0,70 (0,6) ¹
6	Зовнішні двері	0,70 (0,6) ¹	0,60 (0,5) ¹

Примітка: ¹ – значення мінімально допустимого приведенного опору теплопередачі відповідної огорожувальної конструкції згідно з ДБН В.2.6-31:2016 «Теплова ізоляція будівель», що було дійсним до змін.

1.3 Аналіз характерних класів енергоефективності будівель

Енергетичні властивості будівель визначаються витратами енергії на їх експлуатацію для забезпечення комфортного режиму в приміщеннях з урахуванням [4]:

1. кількості енергії, яка необхідна для задоволення потреб споживача при забезпеченні комфортного теплового режиму при опаленні будівлі, охолодженні, освітленні, що встановлюється відповідно до існуючих методів розрахунку;

2. теплонадходжень до будівлі від сонця – пасивне опалення, охолодження, природна вентиляція;

3 – балансових енергетичних характеристик 1-ї та 2-ї складових з урахуванням теплоізоляційних властивостей будівлі;

4. підведеної до будівлі енергії, що зареєстрована для кожного виду енергоносія, включаючи електроенергію, енергію гарячого водопостачання, відновлювані джерела енергії, когенерацію тощо;

5. відновлюваної енергії, що вироблена на прилеглий до будівлі території;

6. енергії з відновлюваних джерел, що виробляється обладнанням, розташованим на даху, фасаді, прилеглої до будівлі території, та постачається до зовнішніх мереж;

7. кількості використаної первинної енергії на потреби будівлі або кількості викидів CO₂ .

Для раціоналізації споживання енергії інженерними системами будівель у нормах з теплової ізоляції та енергоефективності будівель встановлюють вимоги щодо загальної енергетичної ефективності будівлі, у нормах з інженерних систем будівель встановлюють вимоги до характеристик цих систем та їх контролю. Вимоги до інженерних систем повинні охоплювати, принаймні [4]:

- а) системи опалення;
- б) системи охолодження;
- в) системи гарячого водопостачання;
- г) системи кондиціонування повітря;
- д) системи механічної вентиляції;
- е) системи освітлення або поєднання цих систем, у тому числі систем технічного управління.

Показники енергетичної ефективності будівлі характеризують ефективність використання енергії, встановлюють граничні межі витрат енергії, і використовуються при проектуванні, будівництві, прийнятті в експлуатацію, а також в подальшій експлуатації з урахуванням категорії відповідальності будівлі і класу її енергетичної ефективності [4].

Згідно Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» (зі змінами № 2801-IX від 01.12.2022) енергетична ефективність будівлі визначається як властивість будівлі, що характеризується кількістю енергії, необхідної для створення належних умов проживання та/або життєдіяльності людей у такій будівлі. Базуючись на цьому параметрі визначено ряд характерних класів енергетичної ефективності. Це позначення (маркування) властивості будівлі, що відповідає розрахунковому рівню енергетичної ефективності будівлі, визначене за інтервалом значень загального показника енергетичної

ефективності, що встановлюється відповідно до вимог законодавства у сфері енергетичної ефективності будівель [2].

Для визначення показника енергетичної ефективності будівлі обов'язково враховуються наступні параметри:

1. місцеві кліматичні умови;
2. функціональне призначення, архітектурно-планувальне та конструктивне рішення будівлі;
3. геометричні (враховуючи розташування та орієнтацію огорожувальних конструкцій), теплотехнічні та енергетичні характеристики будівлі, а також енергетичний баланс будівлі;
4. нормативні санітарно-гігієнічні та мікрокліматичні умови приміщень будівлі;
5. технічні характеристики інженерних систем;
6. використання відновлюваних джерел енергії, пасивних сонячних систем та систем захисту від сонця, а також енергії, виробленої шляхом когенерації;
7. іншу інформацію, визначену порядком, передбаченим частиною першою статті 5 ЗУ «Про енергетичну ефективність» [5].

Сам показник енергетичної ефективності являє собою числове значення енергетичної характеристики будівлі, яке використовується для ранжування енергетичної ефективності, вимог до енергетичної ефективності та/або для сертифікації [6]. Для його визначення обов'язково розраховують наступні показники будівлі:

1. Питома енергопотреба на опалення, охолодження, постачання гарячої води;
2. Питоме енергоспоживання при опаленні;
3. Питоме енергоспоживання при охолодженні;
4. Питоме енергоспоживання при постачанні гарячої води;
5. Питоме енергоспоживання систем вентиляції;
6. Питоме енергоспоживання при освітленні;

7. Питоме енергоспоживання первинної енергії;

8. Питомі викиди парникових газів.

Також, обов'язковою є сертифікація енергетичної ефективності, що передбачає собою проведення енергетичного аудиту будівлі та визначає:

1. Вимоги до процедури збору та обробки інформації про характеристики огорожувальних конструкцій та інженерних систем;

2. Вимоги до процедури оцінки відповідності розрахункового рівня енергетичної ефективності встановленим мінімальним вимогам до енергетичної ефективності;

3. Вимоги до процедури розроблення рекомендацій щодо підвищення рівня енергетичної ефективності;

4. Форму та зміст енергетичного сертифіката;

5. Форму та зміст витягу з енергетичного сертифіката;

6. Порядок виготовлення енергетичного сертифіката;

7. Форму та перелік показників вихідних даних, що використовувалися для виготовлення енергетичного сертифіката;

8. Вимоги до процедури здійснення енергетичного аудиту будівель;

9. Вимоги до звіту про енергетичний аудит будівель та витягу із звіту про енергетичний аудит будівель;

10. Порядок виготовлення звіту та витягу із звіту про енергетичний аудит будівель;

11. Методику визначення енергетичної ефективності будівель;

12. Інші вимоги до сертифікації енергетичної ефективності, енергетичного аудиту будівель та їх результатів.

Після проведення сертифікації будівлі – встановлюється відповідний клас енергетичної ефективності. Для його визначення використовують формулу:

$$\Delta EP = \frac{EP_{use} - EP_p}{EP_p} \cdot 100,$$

де EP_{use} – загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні;

EP_p – граничне значення питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні житлових та громадських будівель, що встановлюється згідно з мінімальними вимогами до енергетичної ефективності будівель з урахуванням вимог частини другої статті 6 Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» [2].

Загальний показник питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні розраховується за формулою:

$$EP_{use} = EP_{H,use} + EP_{C,use},$$

де $EP_{H,use}$ – питома енергоспоживання при опаленні, кВт·год/м² (кВт·год/м³);

$EP_{C,use}$ – питома енергоспоживання при охолодженні, кВт·год/м² (кВт·год/м³).

Клас енергетичної ефективності будівель встановлюється відповідно даним, наведеним у табл. 5, залежно від показника ΔEP , %, який є відсотковою різницею між загальним показником питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні, EP_{use} , кВт·год/м² (кВт·год/м³), та граничним значенням питомого енергоспоживання при опаленні та охолодженні, EP_p , кВт·год/м² (кВт·год/м³) [6].

Таблиця 5 – Клас енергетичної ефективності будівлі [6]

Клас енергетичної ефективності будівлі	Відсоткові показники, ΔEP
A	$\Delta EP < -50$
B	$-50 \leq \Delta EP < -20$
C	$-20 \leq \Delta EP \leq 0$
D	$0 < \Delta EP \leq 20$
E	$20 < \Delta EP \leq 35$
F	$35 < \Delta EP \leq 50$
G	$50 \Delta EP$

1.4 Аналіз поточного стану систем енергозабезпечення будівель

За різними експертними оцінками, житловий сектор України налічує близько 180 тис. багатоквартирних та 6,5 млн. приватних будинків. З них, майже 3/4 – збудовано ще у 1946-1990 роках. У ті роки стандарти з енергоефективності були значно нижчі в порівнянні з сьогоденням. Більшість будівель перевершили нормативний термін експлуатації і вже визнано аварійними.

Залежно від кількості використаної енергії сформувалась низка визначень будинків. Найпоширенішими в Україні є [7]:

- «Старі будинки» (будівлі збудовані до 1970-х років) – потребують для свого опалення до 300 кВт·год/(м²·рік);
- «Нові будинки» (ті, що були збудовані до 2000 року) – потребують для свого опалення близько 150 кВт·год/(м²·рік);
- «Будинки з низькими енергопотребами» – річні енерговитрати на опалення до 70 кВт·год/(м²·рік);
- «Будинок низького споживання енергії» (впроваджено з 2002 р.) – потребують для свого опалення 60 кВт·год/(м²·рік).

Відповідно, зазначені споруди потребують реконструкції та термомодернізації. У зв'язку з цим на побутові потреби в Україні витрачається у 2-3 рази більше енергії на 1 м², ніж у країнах ЄС. Це призводить до додаткового вироблення та імпорту енергоресурсів для потреб населення.

Станом на 2023 рік, близько 20% житлових будинків та громадських будівель отримали енергетичні сертифікати, які містять рекомендації щодо покращення показників енергоспоживання.

Близько 70% житлового фонду України складається зі старих будівель, які були збудовані ще в радянські часи. Більшість з них не відповідають сучасним вимогам енергоефективності.

За даними Державного агентства з енергоефективності та енергозбереження України, до 50% теплової енергії втрачається через недостатньо ізольовані стіни, вікна, дахи та підвали старих будівель.

Близько 80% багатоквартирних будинків в Україні потребують термомодернізації, яка включає утеплення фасадів, заміну вікон, модернізацію систем опалення та вентиляції.

У нових житлових комплексах, побудованих після 2010 року, середній показник енергоефективності значно вищий, хоча понад 20% новобудов все ще потребують покращення показників енергоефективності.

Станом на 01.12.2020 до Баз даних енергетичних сертифікатів, яку формувало Держенергоефективності внесено 4661 енергетичний сертифікат, з них:

- 2491 – для житлових будинків;
- 535 – для громадських будівель;
- 732 – для навчальних закладів;
- 373 – для лікарень;
- 282 – для дитячих садочків;
- 22 – для підприємств торгівлі;
- 226 – для готелів.

Після повномасштабного військового вторгнення, відбувся перехід на базу E-construction. Наразі, вона має обмежений функціонал і не надає інформацію про структуру розподілу сертифікатів за типами будівель. Загальна кількість зареєстрованих сертифікатів на початок липня 2026 року становила понад 25 тисяч.

Ще до початку повномасштабного вторгнення Росії в Україну, Кабінетом Міністрів було схвалено проєкт «Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року».

Національний план аналізує поточні дії та встановлює нові секторальні та міжсекторальні заходи, щоб забезпечити виконання цілей з енергоефективності на період до 2030 року. Для досягнення цілей енергоефективності було визначено два альтернативні підходи. Підраховано, що ці заходи дозволять заощадити 54 тис. т н.е. кінцевої енергії на рік до 2021 року та збільшать цей показник до 474 тис. т н.е. заощаджень кінцевої енергії в 2025 році, що більше цільової економії в 326 тис. т н.е. щорічно – в основному за рахунок економії, отриманої в результаті роботи Фонду енергоефективності. Підраховано, що ці заходи дозволять досягти 26307 тис. т н.е. економії первинної енергії та 10 440 тис. т н.е. економії кінцевої енергії [8].

Після розпаду Радянського Союзу Україна успадкувала енергоємну економіку, застарілі системи централізованого опалення та неякісні будівлі. Історично Україна була залежною від імпорту російського природного газу. З 1991 по 2008 роки Україна імпортувала близько 80% спожитого природного газу. Історично природний газ був найважливішим паливом в енергопостачанні України. Після економічного спаду в 2009 і 2010 роках та різкого підвищення цін на природний газ Україна почала займатися питанням своєї енергетичної залежності від російського газу. Частка імпорту в споживанні природного газу зменшилася з 60% у 2012 році до 33% у 2018 році, однак в 2019 році знову зросла – до 48% [8].

З огляду на моделювання первинне споживання енергії в Україні у 2030 році не повинне перевищувати 91 468 тис. т н.е., а кінцеве споживання енергії – 50 446 тис. т н.е. [8].

Таблиця 6 – Оцінка ключових показників виробництва та споживання енергії у 2017 та 2030 рр., тис. т н.е. [8].

Оцінка енергоспоживання	2017	2019	2030
Загальне споживання первинної енергії	86 947	86 275	91 468
Використання палива (теплова генерація)	34 298	33 698	32 784
Виробництво електроенергії (теплова генерація)	12 299	11 606	11 079
Використання палива на ТЕЦ	6 043	5 589	8 474
Виробництво тепла на ТЕЦ	3 419	2 759	3 597
Виробництво електроенергії на ТЕЦ	1 032	1 231	1 836
Втрати при розподілі (всі види палива)	3 150	3 652	2 667
Загальне кінцеве споживання енергії	47 396	46 563	50 446
Кінцеве споживання енергії - Промисловість	15 098	16 126	19 799
Кінцеве споживання енергії – Транспорт	9 624	10 064	10 294
Кінцеве споживання енергії – Домогосподарства	16 487	14 004	13 385
Кінцеве споживання енергії – Послуги	4 337	4 475	4 801
Кінцеве споживання енергії – Інші сектори	1 850	1 894	2 167

Джерело: дані за 2017 та а 2019 роки розраховано на основі енергетичних балансів України, що публікуються Держстатом; прогнозні дані на 2030 рік отримані за результатами моделювання з використанням моделі TIMES-Україна.

Очікуване скорочення споживання первинної та кінцевої енергії до 2021, 2025 і 2030 рр. наведене в табл. 7. Тобто, у 2030 році за енергоефективним

сценарієм передбачається скорочення споживання енергії відносно Базового сценарію на 22,3% (первинна енергія) та 17,1% (кінцева енергія).

Таблиця 7 – Споживання первинної та кінцевої енергії [8].

Рік	2019		2021		2025		2030	
Категорія	Первинна енергія (тис. т н.е.)	Кінцева енергія (тис. т н.е.)	Первинна енергія (тис. т н.е.)	Кінцева енергія (тис. т н.е.)	Первинна енергія (тис. т н.е.)	Кінцева енергія (тис. т н.е.)	Первинна енергія (тис. т н.е.)	Кінцева енергія (тис. т н.е.)
Споживання енергії за Базовим сценарієм (BAU)	86275	46563	102658	53411	110456	57099	117775	60887
Скорочення споживання внаслідок реалізації заходів	-	-	-13675	-4158	-19636	-6581	-26307	-10441
Споживання енергії з урахуванням реалізації заходів	86275	46563	88983	49253	90820	50518	91468	50446
% скорочення споживання енергії відносно BAU	0%	0%	13,3%	7,8%	17,8%	11,5%	22,3%	17,1%

Очікувані ключові показники споживання енергії за секторами та джерелами за умови повної реалізації заходів з енергоефективності наведені в табл. 8.

Таблиця 8 – Оцінки ключових показників виробництва та споживання енергії у 2021, 2025 та 2030 роках, тис. т н.е. [8].

Оцінка енергоспоживання	2021	2025	2030
Загальне споживання первинної енергії	88983	90820	91468
Використання палива (теплова генерація)	31489	32517	32784
Виробництво електроенергії (теплова генерація)	10591	10905	11079
Використання палива на ТЕЦ	5205	6888	8474
Виробництво тепла на ТЕЦ	2430	3108	3597
Виробництво електроенергії на ТЕЦ	1137	1498	1836
Втрати при трансформації енергії	20211	20042	20188
Втрати при розподілі та передачі електроенергії	2995	2840	2667
Загальне кінцеве споживання енергії	49253	50517	50446

Продовження таблиці 8

Кінцеве споживання енергії - Послуги	4784	4463	4801
Кінцеве споживання енергії - Домогосподарства	16195	15252	13385
Кінцеве споживання енергії - Промисловість	16023	17903	19799
Кінцеве споживання енергії - Транспорт	10376	10872	10294
Кінцеве споживання енергії - Інші сектори	1875	2027	2167

1.5 Технічний стан та режими роботи систем електропостачання

Більшість мережевих ліній напругою 0,4-6-10 кВ в Україні були побудовані ще в радянський період і значно зношені. До 60% розподільчих мереж потребують модернізації або заміни через високий рівень зносу обладнання, що призводить до зростання ризику аварій та перебоїв в електропостачанні.

Більшість трансформаторних підстанцій напругою 0,4-6-10 кВ також потребують модернізації. Основними проблемами є знос трансформаторів, недостатній запас для збільшення навантаження, відсутність автоматизації та дистанційного керування.

Режими роботи розподільчих мереж залежать від характеру навантаження. Промислові об'єкти можуть створювати нерівномірне навантаження з піками споживання, що вимагає спеціальних рішень для підтримки стабільної роботи мережі. Для житлових і комерційних об'єктів характерні більш рівномірні режими споживання, однак сезонні коливання можуть призводити до перевантаження мереж.

У системах напругою 0,4-6-10 кВ часто виникають втрати напруги на довгих лініях, що призводить до неефективного використання енергії. Це може потребувати встановлення додаткових підстанцій або реконструкції існуючих ліній для зменшення втрат.

Важливими аспектами роботи систем електропостачання є підтримка стабільних параметрів напруги та частоти, уникнення гармонійних спотворень та забезпечення захисту від аварійних та ненормальних режимів. Погіршення

якості електроенергії може призводити до пошкодження обладнання, збоїв у роботі техніки та збільшення витрат на експлуатацію.

Для підвищення ефективності та надійності роботи мереж все частіше застосовуються системи автоматизації та моніторингу, які дозволяють оперативно реагувати на аварії, контролювати режими роботи мереж та оптимізувати енергоспоживання.

Характерними проблемами функціонування ЛЕП та їх обслуговування операторами системи розподілу визначено наступні [9]:

- недостатня уніфікація обладнання і необхідність утримання значного складського резерву;
- застарілість, низька надійність і підвищена ймовірність відмов обладнання.

Одним із елементів підвищення енергетичної ефективності та надійності електропостачання – адаптація внутрішньобудинкових мереж до сучасних вимог. Це передбачає наступні аспекти: зростання енергоспоживання, перехід на інші перерізи кабелів, використання оновлених середньостатистичних даних про навантаження на трансформаторні підстанції (ТП) при їх проектуванні.

За останні роки можна помітити, що відбулось значне зростання енергоспоживання в житлових будинках. Це пов'язано з:

- зростанням кількості електроприладів – сучасний будинок складно уявити без пральної машини, холодильника, кондиціонера, посудомийної машини, наразі, вони є основними струмоприймачами;
- розвиток техніки – також зросла кількість сучасних гаджетів та приладів таких як: телевізори, комп'ютери, мобільні телефони тощо;
- електрифікація опалення, що є не менш важливим, так це перехід споживачів на електричне опалення та інші системи, що значно впливає на внутрішньобудинкові мережі;
- зарядка електромобілів – тренд на електромобілі стає все більш популярнішим, тому очікується зростання електроспоживання через їх масове використання.

Зважаючи на вище згадані фактори, електричні мережі вимагатимуть збільшення пропускної здатності, які вже застаріли та можуть не впоратись з таким навантаженням.

Більша частина споживачів має застарілу електричну мережу, яка була виконана ще за старими стандартами, коли електрична оснащеність осель була не такою потужною. Сучасні стандарти рекомендують використовувати кабелі перерізом 2,5 мм² для розеткових груп. Для потужних електроприладів рекомендується використовувати мінімум переріз 4 мм². Що стосується заряджання електромобіля, необхідно забезпечити ще більший переріз КЛ, з метою забезпечення надійного електропостачання при використанні зарядних станцій великої потужності.

Можна сказати, що внутрішньобудинкові мережі необхідно модернізувати, щоб вони відповідали сучасним вимогам та потребам задля забезпечення надійності електропостачання.

Якщо розглядати будинок в цілому, то можна побачити значне підвищення електроспоживання в порівнянні з попередніми роками. Це призводить до підвищення споживаної потужності, а більшість трансформаторних підстанцій працюють вже понад 30 років та мають високий рівень зношеності і мають великі втрати електричної енергії. Ці фактори призводять до перевантаження обладнання ТП та нестачі потужності.

За сучасних умов, такі підстанції потребують реконструкції або заміни. При цьому необхідно врахувати, що середньостатистичне навантаження на ТП:

- у старих районах завантаження ТП може скласти 60-80%;
- у нових районах із сучасною забудовою завантаження ТП може бути вищою, через впровадження нових струмоприймачів.

Завдяки модернізації застарілих мереж і ТП можна досягти збільшення енергоефективності за рахунок зменшення втрат електроенергії та збільшити запас потужності, що дозволить повною мірою покривати пікові навантаження. За рахунок впровадження сучасних систем забезпечується надійність та безперебійність електропостачання. Враховуючи розвиток технологій, заміна

елементів електричних мереж дозволить підготуватись до подальшого зростання навантаження.

1.6 Висновки і постановка задач дослідження

Аналіз сучасних підходів до проєктування систем електропостачання багатоквартирних будинків дозволив встановити, що діючі норми проєктування не враховують фактичний стан будівель, показники енергоспоживання систем кліматизації, клас енергетичної ефективності будівлі, наявність власних джерел енергії тощо.

Разом із тим, введення в дію Закону України «Про енергетичну ефективність будівель» та впровадження методики проведення сертифікації енергетичної ефективності будівель дозволяє максимально детально врахувати поточний стан будівлі та місцеві кліматичні показники для визначення розрахункового енергоспоживання. При цьому не встановлені взаємозв'язки між показниками енергоспоживання, визначеними при сертифікації енергетичної ефективності будівель, та питомими електричними навантаженнями, що використовуються при проєктуванні систем електропостачання будівель.

Тому основною задачею дослідження є визначення закономірностей формування режиму електричних навантажень будівель різних класів енергетичної ефективності з урахуванням місцевих кліматичних умов.

Для вирішення поставленої задачі необхідно:

- дослідити показники енергоспоживання типових будівель;
- змодельовати режим електроспоживання будівель з електроопаленням в місцевих кліматичних умовах обласних центрів;
- встановити закономірності переходу від розрахункового енергоспоживання систем кліматизації будівлі, що використовується під час сертифікації енергетичної ефективності будівель, до питомих електричних навантажень;
- дослідити режими енергоспоживання будівель з тепловими насосами в якості основних джерел систем кліматизації;

- дослідити показники енергетичної та екологічної ефективності розміщення дахових фотоелектричних станцій на типових багатоквартирних житлових будинках;
- обґрунтувати алгоритм проектування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків з урахуванням встановлених закономірностей і особливостей формування режиму роботи систем електрозабезпечення;
- оцінити переваги запропонованого уточненого підходу проектування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків.

2 Побудова моделі багатоквартирної будівлі для аналізу режимів енергоспоживання

2.1 Теплофізичні властивості зовнішніх оболонок

При формуванні значення енергоспоживання системою кліматизації, теплофізичні характеристики будівлі безпосередньо впливають на рівень споживання системою енергозабезпечення [3, 10, 11]. Розрахунок значення втрат через теплопередачу регламентується ДСТУ 9190:2022 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання».

Сумарна теплопередача для будівлі визначається помісячно для кожної розрахункової зони за формулою [10]:

$$Q_{ht} = Q_{tr} + Q_{ve},$$

де Q_{tr} – сумарна теплопередача трансмісією, Вт·год;

Q_{ve} – сумарна теплопередача вентиляцією, Вт·год.

Сумарну теплопередачу трансмісією розраховують для кожного місяця та для кожної зони за формулою [10]:

$$Q_{tr} = H_{tr,adj}(\theta_{int,set,H} - \theta_e)t,$$

де $H_{tr,adj}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі трансмісією зони, Вт/К, встановлений для різниці температур всередині-ззовні;

$\theta_{int,set,H}$ – розрахункова (задана) внутрішня температура зони будівлі під час опалення, °С;

θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °С, визначена згідно з додатком А [10];

t – тривалість місяця, для якого проводять розрахунок, год, визначена згідно з додатком А [10].

З наведеної залежності видно, що значення втрат прямопропорційно залежить від тривалості розрахункового періоду та різниці внутрішніх та зовнішніх температур. Зважаючи на зміни у кліматі, врахування фактору фактичних температур та тривалості періоду опалення, може значно вплинути на значення енергоспоживання.

Значення теплових втрат через огорожувальні конструкції є одним із визначальних факторів формування річного споживання енергії системою опалення. Зменшення коефіцієнтів теплопередачі зовнішніх стін, покриття, підлоги та світлопрозорих конструкцій забезпечує не лише скорочення теплового навантаження, а й створює передумови для використання низькотемпературних систем теплопостачання та теплових насосів із вищими значеннями коефіцієнта перетворення (COP). Саме тому рівень теплоізоляції будівлі безпосередньо впливає на електричне навантаження систем електропостачання при переведенні будівель на електроопалення.

Сумарне значення узагальненого коефіцієнта теплопередачі трансмісією розраховують за формулою [10]:

$$H_{tr,adj} = H_D + H_g + H_U + H_A,$$

де H_D – безпосередній узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до зовнішнього середовища, Вт/К;

H_g – стаціонарний узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до ґрунту, Вт/К;

H_U – узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією через некондиціоновані об'єми, Вт/К;

H_A – узагальнений коефіцієнт теплопередачі трансмісією до суміжних будівель, Вт/К.

Аналіз складових узагальненого коефіцієнта теплопередачі показує, що найбільший вплив на загальні теплові втрати багатоквартирних житлових будівель мають зовнішні стіни, віконні конструкції та покриття. Для більшості житлових будинків, збудованих до впровадження сучасних вимог з енергоефективності, саме ці конструкції формують понад 70 % сумарних трансмісійних тепловтрат, що підтверджує доцільність їх комплексної термомодернізації [3, 10].

У загальному випадку H_x , що відображає H_D , H_g , H_U або H_A , сформований з трьох співмножників та його розраховують за формулою [10]:

$$H_x = b_{tr,x} \sum_i A_i U_i,$$

де A_i – площа i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі виміряна за внутрішніми розмірами, включно з площею внутрішніх дверних та віконних укосів, m^2 ;

U_i – приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента теплоізоляційної оболонки будівлі, $W/(m^2 \cdot K)$;

$b_{tr,x}$ – поправковий коефіцієнт, що становить:

$b_{tr,x} = 1$ – під час розрахунків H_D та H_g ;

$b_{tr,x} \neq 1$ – під час розрахунків H_U , H_A , значення потрібно визначати згідно з п. 8.2.2 [10].

Приведений коефіцієнт теплопередачі i -го елемента оболонки будівлі для непрозорих конструкцій розраховують за формулою [10]:

$$U_i = \frac{1}{R_{\Sigma пр}},$$

де $R_{\Sigma пр}$ – приведений опір теплопередачі, що визначають згідно з формулою (1) [10], $m^2 \cdot K/W$, з урахуванням положень ДБН В.2.6-31 [3].

Зниження коефіцієнта теплопередачі дозволяє прямо пропорційно зменшити значення трансмісійних теплових втрат, що є основним напрямком підвищення класу енергетичної ефективності будівель відповідно до чинних нормативних документів України.

Для будівель, за відсутності інформації щодо теплопровідних включень у конструкції чи її недостатній кількості, необхідно використовувати коригувальну поправку до коефіцієнта теплопередачі для врахування впливу теплопровідних включень, і коефіцієнт теплопередачі розраховувати за формулою [10]:

$$U_i = U_{i,corr} = U_{op} + \Delta U_{tb},$$

де U_{op} – коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини конструкції Вт/(м² · К), по основному полю;

ΔU_{tb} – додаткова складова до коефіцієнта теплопередачі непрозорих конструкцій U_{op} , що враховує вплив теплопровідних включень, Вт/(м² · К), розрахункові значення якої наведені в таблиці 4 [10].

Коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини конструкції визначається як [10]:

$$U_{op} = \frac{1}{R_{\Sigma}},$$

де R_{Σ} – опір теплопередачі, що визначають згідно з ДСТУ 9191 [11], м² · К/Вт.

Приведений опір теплопередачі зовнішньої стінової огорожувальної конструкції чи термічно неоднорідної непрозорої огорожувальної конструкції розраховують за формулою [11]:

$$R_{\Sigma пр} = \frac{A_{\Sigma}}{\sum_i (A_i / R_{\Sigma i}) + \sum_m (I_m \cdot \psi_m) + \sum_j (N_j \chi_j)},$$

де A_{Σ} – загальна площа огорожувальної конструкції, обчислена за внутрішнім виміром із додаванням площ внутрішніх укосів прорізів та відніманням площ прорізів, м²;

A_i – площа i -ої термічно однорідної частини непрозорої конструкції, що не містить площі внутрішніх укосів прорізів та площі ділянок зовнішніх огорожень будівлі, які контактують з іншими теплопровідними включеннями, м²;

$R_{\Sigma i}$ – опір теплопередачі i -ої термічно однорідної частини конструкції, м²· К/Вт, визначають за формулою [11]:

$$R_{\Sigma i} = \frac{1}{h_{si}} + \sum \frac{\delta_i}{\lambda_{ip}} + \frac{1}{h_{se}},$$

де h_{si}, h_{se} – коефіцієнти теплообміну внутрішньої і зовнішньої поверхонь огорожувальної конструкції, Вт/(м²·К), які приймають згідно з додатком Б [11];

δ_i – товщина i -го шару конструкції, м;

λ_{ip} – теплопровідність матеріалу i -го шару конструкції за розрахункових умов експлуатації (розрахункова теплопровідність), Вт/(м·К), приймають згідно з додатком А [11];

ψ_m – лінійний коефіцієнт теплопередачі m -го лінійного теплопровідного включення (враховують теплопровідні включення, визначені за примітками 1 та 2 підрозділу 5.5 [11]), Вт/(м·К);

I_m – лінійний розмір (проекція) m -го лінійного теплопровідного включення, м;

χ_j – точковий коефіцієнт теплопередачі j -го точкового теплопровідного включення, Вт/К, розраховують за тримірним температурним полем або приймають згідно з додатком Д [11];

N_j – загальна кількість j -их точкових теплопровідних включень, що розташовані на загальній площі огорожувальної конструкції без урахування площ внутрішніх укосів прорізів, шт.

Від значення приведенного опору теплопередачі безпосередньо залежить рівень теплового навантаження системи опалення, а отже і необхідна встановлена потужність джерела тепlopостачання. Зменшення коефіцієнта теплопередачі огорожувальних конструкцій призводить до пропорційного скорочення трансмісійних теплових втрат, що особливо важливо при переході будівель на електричне опалення, коли тепла енергія виробляється за рахунок електричної.

Для багатоквартирних житлових будинків найбільшу частку сумарних теплових втрат формують зовнішні стіни, покриття, підвальні перекриття та світлопрозорі конструкції. У будівлях старого житлового фонду, споруджених до введення сучасних вимог щодо енергетичної ефективності, значення питомих тепловтрат через зовнішні стіни може перевищувати аналогічний показник сучасних будівель у 2-3 рази. Саме тому комплексна термомодернізація огорожувальних конструкцій є одним із найбільш ефективних заходів зі зниження енергоспоживання.

Покращення теплоізоляційних властивостей будівлі має комплексний вплив на режими роботи систем електропостачання. По-перше, зменшується необхідна встановлена потужність електроопалення або теплового насоса. По-друге, знижується максимальне електричне навантаження у години найбільшого споживання електроенергії. По-третє, збільшується тривалість роботи обладнання у режимах часткового навантаження, що позитивно впливає на коефіцієнт перетворення теплових насосів, ресурс обладнання та рівномірність добового графіка електроспоживання.

Крім того, підвищення теплозахисних характеристик зовнішньої оболонки забезпечує збільшення теплової інерційності будівлі. Це дозволяє ефективніше використовувати алгоритми погодозалежного регулювання, прогнозного керування та акумулювання теплової енергії, що є одним із ключових елементів сучасних автоматизованих систем керування будівлями. Таким чином, рівень теплоізоляції необхідно розглядати не лише як показник енергоефективності

будівлі, але і як один із визначальних факторів формування режимів роботи систем електропостачання.

Сумарні теплові надходження для кожної зони будівлі для кожного місяця визначають за формулою [10]:

$$Q_{gn} = Q_{int} + Q_{sol},$$

де Q_{int} – сума внутрішніх теплонадходжень протягом кожного місяця, Вт·год;

Q_{sol} – сума сонячних теплонадходжень протягом кожного місяця, Вт·год.

Внутрішні теплонадходження містять:

- метаболічну теплоту від людей та розсіяну теплоту від обладнання;
- теплоту, розсіяну від освітлювальних приладів;
- теплоту, розсіяну від або поглинуту системами гарячої і водопровідної води та каналізації;
- теплоту, розсіяну від або поглинуту системами опалення, охолодження та вентиляції;
- теплоту від або до процесів та продукції.

Для сучасних житлових будівель внесок внутрішніх теплонадходжень може становити 10-30 % від загального теплового навантаження залежно від кількості мешканців, режимів експлуатації побутового обладнання та використання енергоефективного освітлення. У добре утеплених будівлях частка внутрішніх теплонадходжень істотно зростає, що необхідно враховувати під час моделювання режимів роботи систем електроопалення.

Теплонадходження від внутрішніх теплових джерел у зоні будівлі розраховують для кожного місяця за формулою [10]:

$$Q_{int} = \frac{N}{168} \cdot \frac{N_m - N_{m, noc}}{N_m} \left(\sum_k \Phi_{int, mn, k} A_{f, k} \right) t + Q_{W, dis, rbl, m},$$

де N – графік використання, залежно від призначення будівлі, може бути прийнятий згідно з таблицею 6, год/тиждень;

N_m – кількість діб у відповідному місяці;

$N_{m,noc}$ – кількість діб невикористання, залежно від призначення будівлі у відповідному місяці, може бути прийнято згідно з таблицею 7 [10];

$\Phi_{int,mn,k}$ – усереднена за часом щільність теплового потоку від k -го внутрішнього джерела залежно від призначення будівлі, що може бути прийнята згідно з таблицею 6 як сума метаболічної теплоти, освітлення та обладнання, Вт/м²;

$A_{f,k}$ – кондиціонована площа k -ї зони будівлі, м² ;

t – тривалість місяця, для якого проводять розраховування, год, визначена згідно з додатком А [10];

$Q_{w,dis,rbl,m}$ – утилізаційні регулярні тепловтрати, Вт·год, у підсистемі розподілення ГВП з трубопроводів, що містяться в опалюваних приміщеннях за відповідний місяць, визначають для кожного місяця відповідно до п. 16.2.1.10.3 [10].

Внутрішні та сонячні теплонадходження є складовими теплового балансу будівлі, які частково компенсують втрати через огорожувальні конструкції. Їх значення змінюється залежно від режиму експлуатації будівлі, щільності проживання населення, використання побутового обладнання, типу освітлення, орієнтації фасадів, площі світлопрозорих конструкцій та кліматичних умов.

Для сучасних житлових будівель із підвищеними теплозахисними характеристиками внесок внутрішніх теплонадходжень у загальний тепловий баланс значно зростає. Це пояснюється тим, що зі зменшенням трансмісійних втрат відносна частка теплоти, яка виділяється людьми та електроприладами, стає більш суттєвою. У результаті під час моделювання режимів роботи систем електроопалення необхідно враховувати реальні графіки заселеності будівлі та використання електроприладів, оскільки саме вони визначають фактичне теплове навантаження впродовж доби.

Не менш важливими є сонячні теплонадходження, які мають виражену сезонну та добову нерівномірність. Для будівель із великими площами застління вони можуть забезпечувати суттєве скорочення потреби в тепловій енергії у весняний та осінній періоди. Разом із тим у літній період надлишкові сонячні теплонадходження можуть призводити до збільшення навантаження на системи кондиціонування. Таким чином, під час енергетичного моделювання необхідно комплексно враховувати як позитивний, так і негативний вплив сонячної радіації на режими роботи інженерних систем будівлі.

Теплонадходження від сонця до зони будівлі для кожного місяця розраховують за формулою [10]:

$$Q_{sol} = \left(\sum_k \Phi_{sol,mn,k} \right) t,$$

де $\Phi_{sol,mn,k}$ – усереднений за часом тепловий потік від k -го джерела сонячного випромінювання, Вт;

t – тривалість місяця, що розглядають, год, приймають згідно з додатком А [10].

Сонячні теплонадходження через k -ий елемент будівлі визначають за формулою [10]:

$$\Phi_{sol,k} = F_{sh,ob,k} A_{sol,k} I_{sol,k} - F_{r,k} \Phi_{r,k},$$

де $F_{sh,ob,k}$ – знижувальний коефіцієнт затінення перешкодами для еквівалентної площі інсоляції k -ої поверхні [10];

$A_{sol,k}$ – еквівалентна площа інсоляції k -ої поверхні з даною орієнтацією та кутом нахилу у визначеній зоні чи об'ємі, м²;

$I_{sol,k}$ – сонячна радіація, значення середньомісячної дози сонячної радіації, осередненої для однієї години для сприймальної площі k -ої поверхні з даною орієнтацією та кутом нахилу за середніх умов хмарності, Вт/м², для горизонтальних та вертикальних поверхонь різної орієнтації визначають згідно з А.4 [10];

$F_{r,k}$ – коефіцієнт форми між елементом будівлі та небосхилом, який приймають:
 $F_r = 1$ – для незатіненого горизонтального даху, $F_r = 0,5$ – для незатіненої вертикальної стіни;

$\Phi_{r,k}$ – додатковий тепловий потік внаслідок теплового випромінювання в атмосферу від k -го елемента будівлі, Вт.

Сонячні теплонадходження суттєво залежать від орієнтації фасадів, площі світлопрозорих конструкцій, кліматичних умов та сезонності. Для будівель із високими теплоізоляційними характеристиками їх вплив може бути співставним із внутрішніми теплонадходженнями, що дозволяє додатково зменшити потребу в тепловій енергії у перехідні періоди року.

Еквівалентну площу інсоляції заскленого елемента оболонки (наприклад, вікна) розраховують за формулою [10]:

$$A_{sol} = F_{sh,gl} g_{gl} (1 - F_F) A_{w,p},$$

де $F_{sh,gl}$ – знижувальний коефіцієнт затінення для рухомих засобів, визначений згідно з п. 11.4.1 [10]. У разі відсутності засобів рухомого затінення $F_{sh,gl} = 1$;

g_{gl} – загальний коефіцієнт пропускання сонячної енергії світлопрозорої частини елемента;

F_F – частка площі обрамлення, відношення площі проекції обрамлення до загальної площі проекції заскленого елемента;

$A_{w,p}$ – загальна площа проекції заскленого елемента (наприклад, площа вікна, вітражу або світлопрозорого фасаду тощо), м².

Для зашкленних елементів оболонки з нерозсіювальним склінням коефіцієнт пропускання сонячної енергії для випромінювання, перпендикулярного до скління g_n необхідно розраховувати з урахуванням оптичних властивостей багат шарового скління або приймати згідно з даними таблиці 8 [10]. Через те, що осереднений за часом загальний коефіцієнт пропускання сонячної енергії –

це параметр, значення якого дещо нижче за g_n , то для його обчислення використовують поправковий коефіцієнт F_w , як наведено у формулі [10]:

$$g_{gl} = F_w g_n,$$

де F_w – поправковий коефіцієнт для нерозсіювального скління, приймають $F_w = 0,90$.

Еквівалентну площу інсоляції непрозорої частини оболонки будівлі розраховують за формулою [10]:

$$A_{sol} = \alpha_{s,c} R_{se} U_c A_c,$$

де $\alpha_{s,c}$ – безрозмірний коефіцієнт поглинання сонячної радіації непрозорою частиною, приймають згідно з даними таблиці 10 [10];

R_{se} – тепловий зовнішній поверхневий опір непрозорої частини, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, приймають $0,043 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

U_c – коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини, $\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{К})$; для фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком, вентильованих покриттів та горищних перекриттів значення U_c необхідно помножити на коефіцієнт $0,04$;

A_c – площа непрозорої частини, м^2 .

Додатковий тепловий потік за рахунок теплового випромінювання в атмосферу для відповідного елемента оболонки будівлі Fr , Вт , визначають за формулою [10]:

$$\Phi_r = R_{se} U_c A_c h_r \Delta \theta_{er},$$

де R_{se} – тепловий зовнішній поверхневий опір непрозорої частини, $\text{м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$, приймають $0,043 \text{ м}^2 \cdot \text{К}/\text{Вт}$;

U_c – коефіцієнт теплопередачі непрозорої частини, Вт/(м²·К); для фасадної теплоізоляції з вентильованим повітряним прошарком, вентильованих покриттів та горищних перекриттів значення U_c необхідно помножити на коефіцієнт 0,04;

A_c – площа проекції елемента, м².

h_r – коефіцієнт теплопередачі випромінюванням зовнішньої поверхні, Вт/(м² · К);

$\Delta\theta_{er}$ – середня різниця між температурою зовнішнього повітря та уявною температурою атмосфери, оС, для помірних широт приймають $\Delta\theta_{er} = 11$ К.

Коефіцієнт теплопередачі випромінюванням зовнішньої поверхні h_r , Вт/(м²·К), може бути наближено розрахований за формулою [10]:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma(\theta_{ss} + 273)^3,$$

де ε – коефіцієнт теплового випромінювання зовнішньою поверхнею огороження приймають згідно з даними таблиці 10 [10] або за довідковими даними залежно від її типу;

σ – стала Стефана-Больцмана: $\sigma = 5,67 \cdot 10^{-8}$ Вт/(м² · К⁴);

θ_{ss} – середньоарифметичне значення поверхневої температури та температури атмосфери, °С.

Таким чином, теплофізичні характеристики огорожувальних конструкцій формують базові параметри теплового балансу будівлі та визначають рівень енергоспоживання систем кліматизації. Саме тому під час моделювання режимів електропостачання житлових будинків доцільно враховувати не лише нормативні значення опору теплопередачі, а й фактичний технічний стан огорожувальних конструкцій, рівень їх термомодернізації та кліматичні особливості регіону експлуатації. Це дозволяє суттєво підвищити достовірність прогнозування електричних навантажень систем електроопалення.

2.2 Врахування стану інженерних мереж

Найбільшим споживачем енергетичних ресурсів є житловий сектор. Саме на систему кліматизації, яка включає опалення й охолодження, припадає найбільша частка споживання енергетичних ресурсів в річному балансі будівлі (рис. 2). При цьому доля охолодження в загальному енергетичному балансі житлових будівель, як правило, становить 1-5% залежно від місцевих кліматичних умов. Це пояснюється відсутністю систем централізованого охолодження, короткою тривалістю режиму охолодження, а також незначним перевищенням середніх температур оточуючого повітря над встановленою температурою охолодження, прийнятою $+26^{\circ}\text{C}$. З метою виконання зобов'язань енергетичних пакетів євроінтеграційних процедур впроваджуються вимоги, досягнення яких сприяє підвищенню ефективності використання енергетичних ресурсів та зменшенню викидів парникових газів.

Під час модернізації житлового фонду основну увагу традиційно приділяють підвищенню теплозахисних характеристик зовнішньої оболонки будівлі. Разом із тим, практика експлуатації багатоквартирних житлових будинків показує, що фактичний рівень енергоспоживання значною мірою визначається технічним станом внутрішніх інженерних мереж. Навіть після виконання комплексної термомодернізації неефективна робота систем опалення, вентиляції, гарячого водопостачання та автоматичного регулювання здатна призвести до суттєвого збільшення питомого енергоспоживання. Саме тому оцінювання технічного стану інженерних мереж необхідно розглядати як невід'ємний елемент визначення енергетичної ефективності будівель [3, 10 – 14].

Діаграма річного енергоспоживання будівлі



Рисунок 2 – Річний енергетичний баланс будівель

На основі проведеного аналізу методики визначення електричних навантажень [1] встановлено, що при визначенні питомих електричних навантажень системою опалення не враховується клас енергетичної ефективності будинку. Для уточнення значень пропонується до розгляду методика визначення енергоспоживання системою опалення згідно ДСТУ 9190 «Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції, освітлення та гарячого водопостачання».

Споживання теплової енергії під час опалення будівлі визначають за формулою [10]:

$$Q_{H,use,i} = Q_{H,gen,out,i} + Q_{H,gen,ls,i},$$

де $Q_{H,gen,out,i}$ – енергія виходу з підсистеми виробництва/генерування та акумулювання теплоти упродовж i -го місяця, Вт·год;

$Q_{H,gen,ls,i}$ – загальні тепловтрати підсистем виробництва/генерування та акумулювання теплоти упродовж i -го місяця, Вт·год.

Аналіз наведеної залежності свідчить, що сумарне споживання теплової енергії визначається не лише тепловими втратами будівлі, а й ефективністю роботи всіх складових системи тепlopостачання. В умовах експлуатації багатоквартирних житлових будинків втрати можуть виникати на кожному етапі передачі теплової енергії – від джерела теплоти до кінцевого опалювального приладу. Внаслідок цього навіть за однакової теплової характеристики будівлі фактичне споживання енергії може суттєво відрізнятися залежно від технічного стану інженерних мереж.

Загальні тепловтрати підсистем виробництва/генерування та акумулювання теплоти упродовж i -го місяця розраховують за формулою [10]:

$$Q_{H,gen,ls,i} = \frac{Q_{H,gen,out,i}(1 - \eta_{H,gen})}{\eta_{H,gen}},$$

де $\eta_{H,gen}$ – коефіцієнт ефективності підсистем виробництва/генерування та акумулювання теплоти;

$Q_{H,gen,out,i}$ – енергія виходу з підсистем виробництва/генерування та акумулювання теплоти упродовж i -го місяця, Вт·год.

Енергія виходу від підсистем виробництва/генерування та акумулювання теплоти прийнято, що загальна енергія виходу з підсистеми виробництва/генерування та акумулювання теплоти дорівнює енергії входу в підсистему розподілення [10]:

$$Q_{H,gen,out,i} = Q_{H,dis,in,i},$$

де $Q_{H,dis,in,i}$ – енергія входу в підсистему розподілення упродовж i -го місяця, Вт·год

Енергію входу, необхідну для підсистеми розподілення визначають за формулою [10]:

$$Q_{H,dis,in,i} = Q_{H,dis,out,i} + Q_{H,dis,ls,nrvd,i},$$

де $Q_{H,dis,out,i}$ – енергія виходу з підсистеми виробництва/генерування та акумулювання теплоти упродовж i -го місяця, Вт·год;

$Q_{H,dis,ls,nrvd,i}$ – енергія входу в підсистему розподілення упродовж i -го місяця, Вт·год.

Для більшості житлових будинків, що були введені в експлуатацію до 2000 року, характерними є значні теплові втрати в системах розподілу теплоносія. Основними причинами є відсутність або незадовільний стан теплової ізоляції трубопроводів, гідравлічна розбалансованість стояків, замулення трубопроводів, зношеність запірної арматури та відсутність погодозалежного регулювання. У результаті частина виробленої теплової енергії не використовується для підтримання нормативної температури повітря в приміщеннях, а безповоротно втрачається під час транспортування теплоносія.

Для систем електроопалення зазначені фактори мають ще більше значення, оскільки кожна додаткова кіловат-година теплових втрат безпосередньо збільшує електричне навантаження будівлі та потребує встановлення джерела теплопостачання більшої потужності.

Неутилізовані тепловтрати – це сума неутилізаційних тепловтрат системи розподілення в неопалюваних об'ємах та різниці між утилізаційними та утилізованими тепловтратами в опалюваних (кондиціонованих) об'ємах, що розраховують за формулою [10]:

$$Q_{H,dis,ls,nrvd,i} = Q_{H,dis,ls,nrbl,i} + (Q_{H,dis,ls,rbl,i} - Q_{H,dis,ls,rvd,i}),$$

де $Q_{H,dis,ls,nrbl,i}$ – неутилізаційні тепловтрати;

$Q_{H,dis,ls,rbl,i}$ – утилізаційні тепловтрати;

$Q_{H,dis,ls,rvd,i}$ – утилізовані тепловтрати визначаються за формулою [10]:

$$Q_{H,dis,ls,rvd,i} = Q_{H,dis,ls,rbl,i} \cdot 0,9 \cdot \eta_{H,gn,i},$$

де $Q_{H,dis,ls,rbl,i}$ – утилізаційні тепловтрати;

$\eta_{H,gn,i}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень для опалення впродовж i -го місяця.

Безрозмірний коефіцієнт використання надходжень для опалення – це функція співвідношення надходжень і втрат теплоти, та числового параметра a_H , який залежить від інерції будівлі [10]:

$$\eta_{H,gn,i} = \frac{1 - \gamma_H^{a_H}}{1 - \gamma_H^{1+a_H}},$$

де $\gamma_H = \frac{Q_{H,gn}}{Q_{H,ht}}$ – безрозмірне співвідношення надходжень і втрат теплоти для

режиму опалення;

$Q_{H,gn}$ – сумарна теплопередача для режиму опалення, Вт·год;

$Q_{H,ht}$ – сумарні теплонадходження для режиму опалення, Вт·год;

a_H – безрозмірний числовий параметр, що залежить від часової константи будівлі, t_H , визначений за формулою [10]:

$$a_H = a_{H,0} + \frac{\tau_H}{\tau_{C,0}},$$

де $a_{H,0}$ – довідковий безрозмірний числовий параметр, що приймають рівним 1,0;

τ – часова константа зони будівлі, год;

$\tau_{C,0}$ – довідкова часова константа, що приймають рівною 15 год.

Часова константа зони будівлі t , год, характеризує внутрішню теплову інерцію кондиціонованої зони. Її розраховують за формулою для періоду опалення [10]:

$$\tau_H = \frac{C_m}{H_{tr,adj,H} + H_{ve,adj,H}},$$

де C_m – внутрішня теплоємність будівлі або зони будівлі, Вт·год/К;

$H_{tr,adj,H}$ – значення загального коефіцієнта теплопередачі трансмісією, Вт/К;

$H_{ve,adj,H}$ – значення загального коефіцієнта теплопередачі вентиляцією, Вт/К.

Внутрішню теплоємність будівлі або зони будівлі розраховують за формулою [10]:

$$C_m = C \cdot A_f,$$

де C – внутрішня теплоємність будівлі або зони будівлі на одиницю площі, Вт·год/(м²·К), приймають згідно з таблицею 15 [10];

A_f – кондиціонована площа будівлі або зони будівлі, м².

Тепловтрати підсистем розподілення впродовж і-го місяця розраховують за формулою [10]:

$$Q_{H,dis,ls,i} = \sum \psi_{L,j} (\theta_{m,i} - \theta_{i,j}) \cdot L_j \cdot t_{op,an,i},$$

де $\psi_{L,j}$ – лінійний коефіцієнт теплопередачі j-го трубопроводу, Вт/(м·К), табл. 24 [10];

$\theta_{m,i}$ – середня температура теплоносія в зоні упродовж і-го місяця, °С, визначають за температурним графіком регулювання теплоносія за погодними умовами за середньомісячної температури зовнішнього середовища відповідного місяця табл. А.2 додатка А [10];

$\theta_{i,j}$ – температура навколишнього середовища, °С;

L_j – довжина трубопроводу, м;

j – індекс, що позначає трубопроводи з однаковими граничними умовами;

$t_{op,an,i}$ – години опалення упродовж і-го місяця, год.

Енергію входу, що необхідна для підсистеми тепловіддачі/виділення, розраховують за формулою[10]:

$$Q_{H,dis,out,i} = Q_{H,em,in,i} = Q_{H,em,out,i} + (1 - 0,8 \cdot \eta_{H,gn,i}) \cdot Q_{H,em,ls,i},$$

де $Q_{H,em,in,i}$ – енергія входу, що необхідна для підсистеми тепловіддавання впродовж і-го місяця, Вт·год;

$Q_{H,em,out,i}$ – енергія виходу підсистеми тепловіддачі за і-й місяць, дорівнює енергопотребі $Q_{H,nd,i}$ для визначеного комбінування зон, що обслуговує ця підсистема тепловіддачі, Вт·год;

$\eta_{H,gn,i}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень для опалення впродовж і-го місяця;

$Q_{H,em,ls,i}$ – загальні тепловтрати підсистем тепловіддачі впродовж і-го місяця, які вважають 100 % придатними для утилізування, Вт·год.

Розраховування загальних тепловтрат підсистем тепловіддачі/виділення виконують щомісяця [10]:

$$Q_{H,em,ls} = \left(\frac{f_{hydr} \cdot f_{im} \cdot f_{rad}}{\eta_{em}} - 1 \right) \cdot Q_{H,em,out},$$

де $Q_{H,em,out} = Q_{H,nd}$ – енергія виходу від підсистеми тепловіддавання/ виділення за конкретний місяць, Вт·год, є енергопотребою в опаленні за конкретний місяць $Q_{H,nd}$;

f_{hydr} – коефіцієнт, що враховує гідравлічне налагодження системи табл. 18 [10];

f_{im} – коефіцієнт, що враховує застосування періодичного теплового режиму приміщення; $f_{im} = 1$ – для постійного теплового режиму; $f_{im} = 0,98$ – для періодичного теплового режиму з регулюванням без інтегрованого зворотного зв'язку; $f_{im} = 0,97$ – для періодичного теплового режиму з регулюванням, що має інтегрований зворотний зв'язок (з оптимізованим пуском);

f_{rad} – коефіцієнт, що враховує променеву складову теплового потоку (лише для променевих систем опалення);

η_{em} – загальний рівень ефективності для тепловіддавальної складової системи у приміщенні, що визначають за формулою:

$$\eta_{em} = \frac{1}{4 - (\eta_{str} + \eta_{ctr} + \eta_{emb})},$$

де η_{str} – складова загального рівня ефективності, яка враховує вертикальний профіль температури повітря приміщення;

η_{ctr} – складова загального рівня ефективності, яка враховує регулювання температури приміщення табл. 17 [10];

η_{emb} – складова загального рівня ефективності, яка враховує питомі втрати зовнішніх огорожень (для вбудованих систем) табл. 17 [10].

Складову загального рівня ефективності, яка враховує вертикальний профіль температури повітря приміщення, розраховують як середнє значення «температурного напору» та «питомих тепловтрат зовнішніх огорожувальних конструкцій» за формулою [10]:

$$\eta_{str} = \frac{\eta_{str1} + \eta_{str2}}{2},$$

де η_{str1}, η_{str2} – приймають згідно з даними табл. 17 [10].

Значення коефіцієнтів ефективності окремих підсистем характеризує технічний стан інженерних мереж та якість їх експлуатації. При цьому найбільший потенціал підвищення енергетичної ефективності мають заходи, спрямовані на автоматичне регулювання тепловіддачі, балансування систем опалення, застосування сучасної запірно-регулювальної арматури та погодозалежного керування. Використання таких рішень дозволяє суттєво зменшити втрати енергії без зміни теплофізичних характеристик самої будівлі.

Для кожної зони будівлі та для кожного місяця енергопотребу для опалення за умови постійного опалення, розраховують за формулою [10]:

$$Q_{H,nd} = Q_{H,nd,cont} = Q_{H,ht} - \eta_{H,gn} Q_{H,gn} - Q_{ve,pre-heat},$$

де $Q_{H,nd,cont}$ – енергопотреба для постійного опалення будівлі, Вт·год, має бути більше чи дорівнювати 0;

$Q_{H,ht}$ – сумарна теплопередача в режимі опалення, Вт·год;

$Q_{H,gn}$ – сумарні теплонадходження в режимі опалення, Вт·год;

$\eta_{H,gn}$ – безрозмірний коефіцієнт використання надходжень;

$Q_{ve,pre-heat}$ – енергопотреба для центрального попереднього підігрівання вентиляційного повітря, Вт·год, визначена згідно з п. 9.4 [10].

Сумарна теплопередача вентиляцією розраховують для кожного місяця та для кожної z-ої зони за формулою [10]:

$$Q_{ve,H} = H_{ve,adj,H} (\theta_{int,set,H} - \theta_e) t,$$

де $H_{ve,adj,H}$ – загальний коефіцієнт теплопередачі вентиляцією для опалення та для охолодження відповідно, Вт/К, визначений згідно з 9.2;

$\theta_{int,set,H}$ – задана температура зони будівлі для опалення та для охолодження відповідно, °С, визначена згідно з розділом 13;

θ_e – середньомісячна температура зовнішнього середовища, °С, визначена згідно з додатком А [10];

t – тривалість місяця, для якого проводять розрахунок, год, визначена згідно з додатком А [10].

Суттєвий вплив на загальне енергоспоживання має також режим роботи систем вентиляції. У сучасних енергоефективних будівлях після виконання термомодернізації частка вентиляційних втрат поступово зростає, оскільки трансмісійні втрати через огорожувальні конструкції істотно зменшуються. За

таких умов застосування механічної припливно-витяжної вентиляції з рекуперацією теплоти дозволяє скоротити вентиляційні тепловтрати на 50-80 % залежно від ефективності теплообмінника.

Для житлових будівель із тепловими насосами це має подвійний позитивний ефект. З одного боку, зменшується теплова потужність, необхідна для компенсації вентиляційних втрат, а з іншого – підвищується сезонний коефіцієнт перетворення теплового насоса завдяки роботі за нижчих теплових навантажень. У результаті одночасно зменшується річне споживання електроенергії системою кліматизації та максимальні навантаження на систему електропостачання будівлі.

Значення загального коефіцієнта теплопередачі вентиляцією розраховують за формулою:

$$H_{ve,adj,H} = \rho_a C_a (q_{ve,mn,H} b_{ve,H} + q_{inf,mn,H}),$$

де $\rho_a C_a$ – теплоємність одиниці об'єму повітря, дорівнює 0,336 Вт·год/(м·К);

$q_{ve,mn,H}$ – усереднена за часом витрата повітря для вентиляції для опалення та для охолодження відповідно, м³ /год, визначена згідно з 9.2.1 [10];

$q_{inf,mn,H}$ – усереднена за часом витрата повітря для інфільтрації для опалення та для охолодження відповідно, м³ /год, визначена згідно з 9.2.3 [10];

$b_{ve,H}$ – температурний поправковий коефіцієнт, що коригує коефіцієнт теплопередачі вентиляцією замість різниці температур у випадках, коли температура припливного повітря не дорівнює температурі зовнішнього середовища (а саме за наявності утилізування теплоти), значення необхідно визначати згідно з 9.2.4 [10].

Усереднену за часом витрату повітря розраховують для кожної зони (чи вентиляційної підзони) та для періоду опалення [10]:

$$q_{ve,mn,H} = q_{ve,H} t_{ve,H} / 168,$$

де $q_{ve,H}$ – нормативна витрата вентиляційного повітря для опалення та для охолодження відповідно, м³ /год, визначена згідно з 9.2.2 [10];

$t_{ve,H}$ – період використання нормативної витрати вентиляційного повітря для опалення та для охолодження відповідно, год/тиждень. Визначають згідно з проєктними даними. За відсутності точних даних та для цілей енергетичної сертифікації приймають за графіком опалення/охолодження згідно з таблицею 16 [10].

У випадку природної вентиляції в зоні (підзоні), якщо $q_{ve} < n_{inf}V_{ve}v_v$, то нормативну витрату повітря потрібно приймати рівною витраті для інфільтрації – $q_{ve} = n_{inf}V_{ve}v_v$, для відповідного періоду (опалення чи охолодження), де $n_{inf}V_{ve}$ та v_v приймають відповідно до 9.2.3 [10].

Усереднену за часом витрату повітря за рахунок інфільтрації, м³ /год, розраховують для кожної зони (чи вентиляційної підзони) та для періоду опалення [10]:

$$q_{inf,mn,H} = n_{inf,H}V_{ve}v_v t_{inf,H}/168,$$

де $n_{inf,H}$ – кратність повітрообміну за рахунок інфільтрації, год⁻¹, визначена згідно з 9.2.3.1 [10];

V_{ve} – об'єм зони (чи вентиляційної підзони), призначений для вентиляції. Для однозонного розраховування та якщо весь об'єм будівлі призначений для вентиляції, то дорівнює кондиціонованому об'єму будівлі, визначеному згідно з 3.6 [10];

v_v – коефіцієнт зниження об'єму повітря в будівлі, яким враховують наявність внутрішніх огорожувальних конструкцій, за відсутності точних даних приймають 0,85;

$t_{inf,H}$ – період використання витрати повітря для інфільтрації для періодів опалення та для охолодження відповідно, год. Для різних типів вентиляції потрібно приймати такі значення:

$(168 - t_{ve})$ – за природної та механічної вентиляції;

168 – за механічної витяжної вентиляції та механічної припливно-витяжної збалансованої вентиляції;

Таким чином, результати проведеного аналізу свідчать, що технічний стан інженерних мереж є одним із ключових факторів формування енергетичної ефективності житлових будівель. Врахування ефективності роботи підсистем виробництва теплоти, її розподілення, тепловіддачі, вентиляції та автоматичного регулювання дозволяє істотно підвищити точність визначення фактичного енергоспоживання будівлі. На відміну від традиційних методик визначення електричних навантажень, запропонований підхід враховує реальний технічний стан інженерних систем та дозволяє оцінити вплив комплексної модернізації будівлі на режими роботи систем електропостачання. Це створює передумови для більш обгрунтованого вибору встановленої потужності систем електроопалення, теплових насосів та іншого електротехнічного обладнання.

2.3 Моделювання графіків теплових навантажень

Моделювання графіків теплових навантажень дозволяє оцінити потреби будівлі в тепловій енергії протягом опалювального періоду та режими роботи інженерних систем [15, 16]. Основним фактором, що визначає зміну теплового навантаження, є температура зовнішнього повітря, яка змінюється відповідно до кліматичних умов конкретного регіону. При зниженні температури зовнішнього повітря тепловтрати будівлі збільшуються, що обумовлює необхідність збільшення теплової потужності системи опалення. І навпаки, при підвищенні температури зовнішнього середовища потреба в тепловій енергії поступово зменшується.

Графік зміни температури навколишнього середовища визначається за наступними формулами [17]:

$$t_{\text{год}} = \frac{A}{2} \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2x - 3T_{\min} - 9}{9 + T_{\min}} \right] + t \text{ при } 0 \leq x < T_{\min};$$

$$t_{\text{год}} = \frac{A}{2} \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2x - 15 - T_{\min}}{15 - T_{\min}} \right] + t \text{ при } T_{\min} \leq x < 15;$$

$$t_{\text{год}} = \frac{A}{2} \sin \left[\frac{\pi}{2} \cdot \frac{2x - 21 + T_{\min}}{9 + T_{\min}} \right] + t \text{ при } 15 \leq x < 24;$$

де A – середня добова амплітуда середньої місячної температури повітря, °С;

t – середня місячна температура повітря, °С;

$T_{\min}$ – час мінімальної температури повітря протягом доби, який приймається як час, що настає через 15 хв після сходу Сонця, год;

x – потоковий час, год.

Оскільки температурні процеси є інерційними і температура зовнішнього повітря упродовж доби не змінюється раптово, то принципи моделювання середніх температур упродовж доби навколо середніх температур можуть бути перенесені для моделювання середніх температур упродовж доби навколо розрахункової температури. Таким чином, для формування середнього профілю зміни температури упродовж доби можна скористатися аналогічною розрахунковою моделлю, замінивши t на $t_{\text{розр}}$ для різних міст України, що дозволить змодельовати очікувані режими роботи систем електроопалення багатоквартирних будинків в різних температурних умовах з урахуванням кліматичних особливостей.

Тому, за зазначеними залежностями було промодельовано зміну температури для найхолоднішої доби для кожного обласного центру України. Використання аналітичної моделі добової зміни температури дозволяє уникнути дискретності, характерної для використання лише середньомісячних або нормативних значень температури. Завдяки цьому формується безперервний

часовий профіль теплового навантаження, який більш точно відображає реальні умови експлуатації систем електроопалення. Особливо важливим це є при дослідженні режимів роботи теплових насосів, ефективність яких визначається саме миттєвими значеннями температури зовнішнього повітря, а не середньомісячними показниками.

Для кожної години або доби опалювального сезону визначається необхідна теплова потужність, яка забезпечує підтримання нормативної температури внутрішнього повітря. Отримані значення формують часовий графік теплового навантаження, який характеризує зміну потреби будівлі в тепловій енергії протягом найхолоднішої доби.

Отримані графіки теплових навантажень використовуються для вибору раціональної встановленої потужності теплогенеруючого обладнання, розрахунку режимів роботи теплових насосів, визначення необхідної ємності акумуляторів теплоти, аналізу добових та сезонних коливань споживання енергії, а також оцінювання ефективності інтеграції відновлюваних джерел енергії.

При оцінці показників енергетичної ефективності будівлі значення температури навколишнього середовища має доволі вагомий вплив на кінцевий результат. Порівняємо нормативні значення температур з усередненими фактичними даними за останні 5 років. Дані наведено для Дніпропетровської області [18, 19].

Таблиця 9 – Значення температур для розрахункового періоду опалення

	Січень	Лютий	Березень	Квітень	Жовтень	Листопад	Грудень
$T_{\text{норм.}}$ [17], °C	-4,4	-3,8	1,1	9,6	8,6	2,2	-2,5
$T_{\text{факт.}}$, °C	-1,3	0,2	5,8	11,6	12,1	5,5	1,0
Δ , °C	3,1	4,0	4,7	2,0	3,5	3,3	3,5

Отримані результати підтверджують стійку тенденцію підвищення середніх температур повітря протягом опалювального сезону. При цьому найбільші відхилення спостерігаються у перехідні місяці (березень та жовтень),

коли різниця між нормативними та фактичними температурами досягає 4-5 °С. Саме у ці періоди традиційні методики визначення теплових навантажень забезпечують найбільшу похибку при визначенні необхідної потужності систем теплопостачання.

Отримані результати узгоджуються із сучасними кліматичними тенденціями, що характеризуються поступовим підвищенням середньорічної температури повітря на території України. Це свідчить про необхідність адаптації існуючих методик визначення теплових навантажень до сучасних кліматичних умов.

Таблиця 10 – Фактичні температурні показники

		2023	2024	2025	2026
січень	min	-13,0	-14,5	-5,9	-15,0
	max	11,4	7,7	10,4	9,1
лютий	min	-11,0	-5,7	-7,7	-16,1
	max	7,7	13,0	11,1	6,6
березень	min	-3,2	-4,7	-3,2	-0,6
	max	18,2	23,3	18,2	20,4
квітень	min	4,0	4,9	-2,1	0,3
	max	21,1	27,2	26,5	20,4
жовтень	min	0,1	3,9	1,7	-
	max	25,4	25,7	21,5	-
листопад	min	-7,2	-3,8	1,3	-
	max	17,5	14,6	15,6	-
грудень	min	-3,7	-7,7	-9,9	-
	max	11,1	7,5	8,5	-

Як видно з табл. 9, різниця між нормативним та фактичним значеннями температури в середньому становить 3,35 °С, що свідчить про зміну клімату та необхідність перегляду нормативних значень.

Розглянемо вплив цієї різниці на прикладі визначення енергопотреб для опалення для 5-ти та 9-ти поверхових житлових будівель, що були обрані для моделювання. При розрахунку враховують наступні значення параметрів:

- сумарну теплопередачу трансмісією та вентиляцією;
- сумарні внутрішні та зовнішні теплонадходження.

Відповідно до методики розрахунку [10], різниця температур внутрішнього та зовнішнього повітря прямопропорційно впливає на кінцеве значення параметру енергопотребі в частині визначення трансмісійних та вентиляційних втрат. Порівняємо розрахункові значення показників трансмісійних та вентиляційних втрат для будівлі при розрахунку за нормативними та фактичними значеннями температур:

Таблиця 11 – Розрахункові значення показників трансмісійних та вентиляційних втрат при розрахунку за нормативними значеннями температур для 5-ти поверхової будівлі

Місяць року	$Q_{H.tr}$, кВт·год	$Q_{H.ve}$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr} + Q_{H.ve})$, кВт·год	Середня потужність трансмісійних та вентиляційних втрат, кВт
Січень	87639	11566,4	99205,4	133,3
Лютий	76273,5	29957,9	106231,4	158,1
Березень	67059,8	26339,1	93398,9	125,5
Квітень	11903,4	4675,3	16578,7	69,1
Жовтень	14352,8	5637,3	19990,1	75,7
Листопад	61119,5	24005,9	85125,4	118,2
Грудень	79833,1	31356	111189,1	149,4
Всього за рік	398181,1	133537,9	531719	128,8

Таблиця 12 – Розрахункові значення показників трансмісійних та вентиляційних втрат при розрахунку за фактичними значеннями температур для 5-ти поверхової будівлі

Місяць року	$Q_{H.tr}$, кВт·год	$Q_{H.ve}$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr} + Q_{H.ve})$, кВт·год	Середня потужність трансмісійних та вентиляційних втрат, кВт
Січень	75575,3	9974,2	85549,5	115,0
Лютий	63454,4	24923	88377,4	131,5
Березень	50383,5	19789,1	70172,6	94,3
Квітень	9614,3	3776,2	13390,5	55,8
Жовтень	9946,2	3906,6	13852,8	52,5
Листопад	49788,4	19555,4	69343,8	96,3
Грудень	67414,6	26478,4	93893	126,2
Всього за рік	326176,7	108402,9	434579,6	105,3

Таблиця 13 – Розрахункові значення показників трансмісійних та вентиляційних втрат при розрахунку за нормативними значеннями температур для 9-ти поверхової будівлі

Місяць року	$Q_{H.tr}$, кВт·год	$Q_{H.ve}$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr} + Q_{H.ve})$, кВт·год	Середня потужність трансмісійних та вентиляційних втрат, кВт
Січень	196393	112724	309117	415,5
Лютий	170924	98105,4	269029,4	400,3
Березень	150276	86254,4	236530,4	317,9
Квітень	26674,8	15310,6	41985,4	174,9
Жовтень	32163,6	18461	50624,6	191,8
Листопад	136965	78613,9	215578,9	299,4
Грудень	178900	102684	281584	378,5
Всього за рік	892296	512153	1404449,7	340,2

Таблиця 14 – Розрахункові значення показників трансмісійних та вентиляційних втрат при розрахунку за фактичними значеннями температур для 9-ти поверхової будівлі

Місяць року	$Q_{H.tr}$, кВт·год	$Q_{H.ve}$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr} + Q_{H.ve})$, кВт·год	Середня потужність трансмісійних та вентиляційних втрат, кВт
Січень	169359	97207,4	266566,4	358,3
Лютий	142197	81617,1	223814,1	333,1
Березень	112906	64804,9	177710,9	238,9
Квітень	21545	12366,2	33911,2	141,3
Жовтень	22288,8	12793,2	35082	132,9
Листопад	111572	64039,4	175611,4	243,9
Грудень	151071	86710,8	237781,8	319,6
Всього за рік	730939	419539	1150477,8	278,7

Порівняння результатів розрахунків показує, що використання фактичних кліматичних даних призводить до систематичного зменшення як трансмісійних, так і вентиляційних втрат для всіх місяців опалювального періоду. При цьому абсолютне скорочення теплового навантаження збільшується зі зростанням площі та опалювального об'єму будівлі, що пояснюється пропорційним збільшенням площі зовнішніх огорожувальних конструкцій.

Водночас відносне скорочення енергоспоживання практично не залежить від поверховості будівлі та визначається переважно зміною температурних умов.

Це свідчить про універсальність отриманих закономірностей та можливість їх застосування для будівель різної поверховості.

Середня потужність трансмісійних та вентиляційних втрат, $P_{\text{сер}}$, кВт, визначається з урахуванням тривалості розрахункового місяця [17]:

$$P_{\text{сер}} = \frac{\sum(Q_{\text{H.tr}} + Q_{\text{H.ve}})}{24 \cdot n},$$

де $Q_{\text{H.tr}}$ – сумарна теплопередача трансмісією, Вт·год;

$Q_{\text{H.ve}}$ – сумарна теплопередача вентиляцією, Вт·год;

n – тривалість опалюваного періоду у поточному місяці, діб.

Визначення середньої теплової потужності має важливе практичне значення під час вибору встановленої потужності основного джерела теплоти. На відміну від традиційного підходу, орієнтованого виключно на максимальні теплові навантаження, використання середньої потужності дозволяє більш обґрунтовано визначити номінальну потужність теплового насоса або іншого високоефективного джерела теплової енергії у тому випадку, якщо передбачається встановлення дублюючого джерела теплової енергії для покриття пікових навантажень, наприклад, трубчастих електронагрівачів (ТЕНів). Покриття короткочасних пікових навантажень допоміжним електричним котлом або ТЕНами забезпечує істотне зниження капітальних витрат без погіршення надійності тепlopостачання [10, 18].

При організації комбінованих систем опалення середня потужність втрат через зовнішню оболонку будівлі та з вентиляцією разом з потужностями внутрішніх та зовнішніх теплонадходжень, з урахуванням певних допущень та коефіцієнтів покриття теплового навантаження, можуть визначати потужність основного джерела енергії, наприклад, теплового насоса. Внутрішні та зовнішні теплонадходження не залежать від зміни зовнішньої температури, а визначаються призначенням, режимом експлуатації та конфігурацією зовнішніх оболонок будівлі, тому при аналізі впливу врахування фактичних змін зовнішньої

температури на потужність джерела теплової енергії не наводяться і вважаються умовно сталими. При цьому в комбінованій системі енергозабезпечення будівлі розрахункове теплове навантаження може покриватися додатковим джерелом енергії, наприклад, електричним котлом, який працюватиме нетривало лише при значному зниженні зовнішньої температури. Оскільки створення теплонасосних систем характеризується значними капіталовкладеннями, а електродіодли мають значно меншу вартість, то реалізація такого підходу дозволяє значно зменшити вартість системи опалення будівлі, і в основному для покриття теплового навантаження використовувати високоефективну теплонасосну систему опалення.

Оцінка очікуваного зменшення споживання енергії за рахунок врахування фактичних температур оточуючого повітря порівняно з розрахунковим енергоспоживанням, а також очікуване зменшення сумарної потужності трансмісійних та вентиляційних втрат наведені у табл. 15.

Таблиця 15 – Зміна енергетичних показників, при врахуванні фактичних значень температур для 5-ти поверхової будівлі

Місяць року	$\Sigma(Q_{H.tr,n} + Q_{H.ve,n})$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr,\phi} + Q_{H.ve,\phi})$, кВт·год	Зменшення споживання енергії, кВт·год	Δ , кВт	Економія, %
1	2	3	4	5	6
Січень	99205,4	85549,5	13655,9	18,4	13,77
Лютий	106231,4	88377,4	17854	26,6	16,81
Березень	93398,9	70172,6	23226,3	31,2	24,87
Квітень	16578,7	13390,5	3188,2	13,3	19,23
Жовтень	19990,1	13852,8	6137,3	23,2	30,70
Листопад	85125,4	69343,8	15781,6	21,9	18,54
Грудень	111189,1	93893	17296,1	23,2	15,56
Всього за рік	531719	434579,6	97139,4	23,5	18,27

Таблиця 16 – Економія енергетичних показників, при врахуванні фактичних значень температур для 9-ти поверхової будівлі

Місяць року	$\Sigma(Q_{H.tr,n} + Q_{H.ve,n})$, кВт·год	$\Sigma(Q_{H.tr,\phi} + Q_{H.ve,\phi})$, кВт·год	Зменшення споживання енергії, кВт·год	Δ , кВт	Економія, %
1	2	3	4	5	6
Січень	309117	266566,4	42550,6	57,2	13,77
Лютий	269029,4	223814,1	45215,3	67,3	16,81
Березень	236530,4	177710,9	58819,5	79,1	24,87
Квітень	41985,4	33911,2	8074,2	33,6	19,23
Жовтень	50624,6	35082	15542,6	58,9	30,70
Листопад	215578,9	175611,4	39967,5	55,5	18,54
Грудень	281584	237781,8	43802,2	58,9	15,56
Всього за рік	1404449,7	1150477,8	253971,9	61,5	18,08

Аналіз результатів показує, що врахування фактичних температур дозволяє зменшити розрахункову потребу у тепловій енергії приблизно на 18 % для 5-ти та 9-ти поверхових будівель. Отримане значення є достатньо стабільним, що підтверджує можливість використання запропонованого підходу під час визначення раціональної встановленої потужності систем електроопалення.

Особливу практичну цінність становить той факт, що зменшення теплового навантаження автоматично призводить до зниження необхідної електричної потужності теплового насоса та інших джерел опалення, які використовують електричну енергію. Це, у свою чергу, дозволяє зменшити встановлену потужність трансформаторних підстанцій, кабельних мереж та іншого електротехнічного обладнання систем електропостачання житлових будинків [10, 18].

Графічне представлення результатів моделювання дозволяє наочно оцінити характер зміни теплових втрат залежно від температури навколишнього середовища. Отримані залежності мають практично лінійний характер у межах досліджуваного діапазону температур, що підтверджує коректність використаної математичної моделі та можливість її застосування для прогнозування теплових навантажень при різних кліматичних сценаріях.

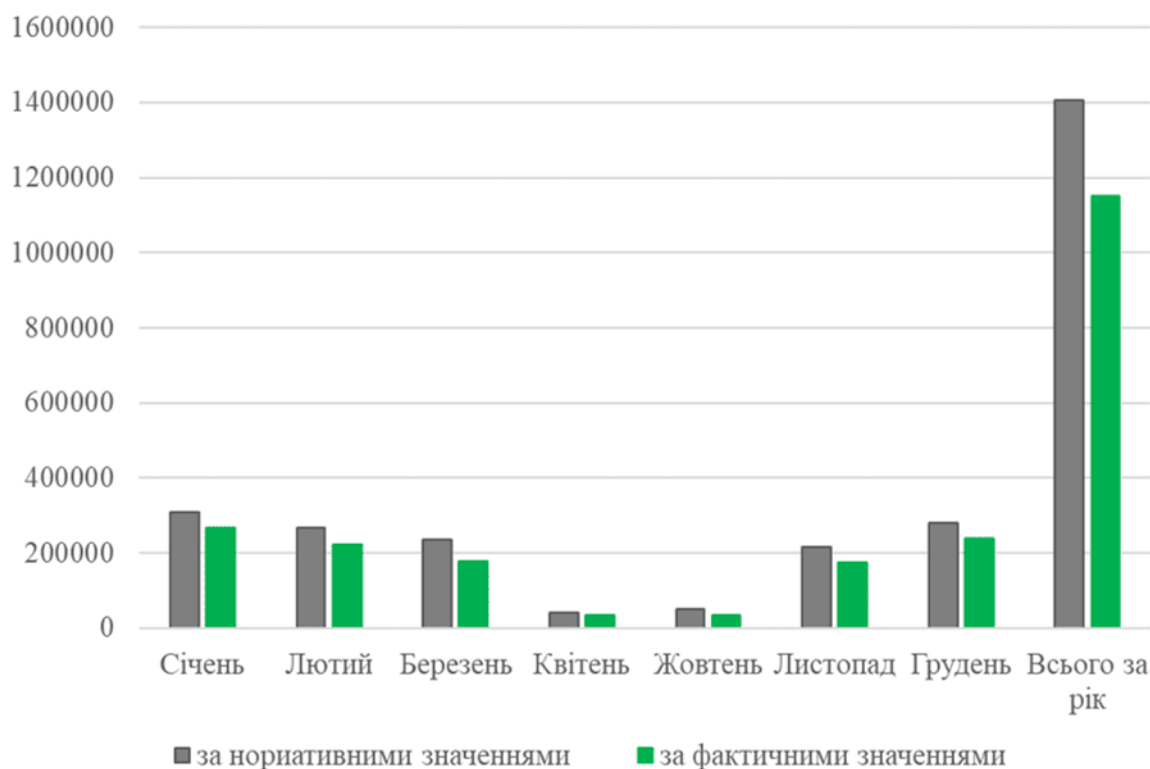


Рисунок 3 – Аналіз зміни теплових втрат в залежності від значення температури

Проведене моделювання підтвердило, що використання фактичних кліматичних даних суттєво впливає на результати визначення теплових навантажень житлових будівель. Для досліджених об'єктів врахування реальних температурних умов забезпечує зменшення річної потреби у тепловій енергії приблизно на 18 %, а середньої потужності трансмісійних і вентиляційних втрат – на 14-15 %. Це свідчить про завищення результатів, отриманих за традиційними нормативними методиками, які базуються на багаторічних кліматичних характеристиках.

Отримані закономірності мають важливе практичне значення для проєктування комбінованих систем теплопостачання з тепловими насосами. Використання фактичних кліматичних параметрів дозволяє обґрунтовано зменшити встановлену потужність основного теплогенеруючого обладнання без погіршення надійності теплозабезпечення. При цьому покриття нетривалих пікових навантажень доцільно здійснювати допоміжними електричними

котлами, що забезпечує мінімізацію капітальних витрат та підвищення економічної ефективності систем електропостачання житлових будинків.

2.4 Обґрунтування підходів визначення потужності систем електроопалення

Для визначення питомих середніх навантажень систем кліматизації, широко використовується підхід, за якого значення мінімально допустимих питомих показників множаться на середню площу одного житлового приміщення. Відповідно до підходів проектування внутрішньобудинкових систем електропостачання, покладених в основу ДБН В.2.5-23:2025, за репрезентативне значення середньої площі житла приймається 70 м^2 . Отже, при виконанні розрахунків параметрів у перерахунку на одне житло використовується зазначена нормативна площа, що забезпечує уніфікацію та порівнюваність отриманих результатів.

Використання єдиної нормативної площі житла дозволяє виключити вплив геометричних параметрів окремих квартир на результати дослідження та забезпечує можливість безпосереднього порівняння електричних навантажень для будівель різних типів. Такий підхід особливо важливий під час аналізу впливу класу енергетичної ефективності на параметри систем електропостачання, оскільки основним фактором зміни навантаження виступають теплофізичні характеристики будівлі та кліматичні умови експлуатації, а не площа окремих квартир.

В умовах селищ, невеликих та великих міст поверховість будинків змінюється від приватних забудов (малоповерхові будівлі) до 5-ти, 9-ти, 16-ти та вище поверхових будинків. Основний період будівництва припадає на післявоєнні радянські часи, коли масово зводили 5-ти та 9-ти поверхові будівлі. При моделюванні розглядаються будівлі найпоширеніших типів від 4-х до 9-ти поверхів, що відносяться до однієї групи житлових будівель при визначенні

класів енергетичної ефективності відповідно до Наказу Мінрегіонбуду №260 від 27.10.2020 [20].

У відповідності до мінімальних вимог для енергоспоживання системою кліматизації будівель 5-ти та 9-ти поверхів пропонується визначати питомі середні навантаження для кожного класу енергетичної ефективності з урахуванням температурних зон та тривалості періоду опалення в обраному регіоні країни (табл. 17).

Таблиця 17 – Питоме середнє навантаження системи кліматизації

Клас ЕЕ	Мінімальні вимоги до енергоспоживання системою кліматизації, кВт·год/ м ² ·рік		Питоме середнє навантаження системи кліматизації (середня площа житла 70 м ²):			
	I	II	I		II	
			кВт·год/ житло	кВт/ житло	кВт·год/ житло	кВт/ житло
A	42,5	37,5	2975	2975/T _{оп}	2625	2625/T _{оп}
B	68	60	4760	4760/T _{оп}	4200	4200/T _{оп}
C	85	75	5950	5950/T _{оп}	5250	5250/T _{оп}
D	102	90	7140	7140/T _{оп}	6300	6300/T _{оп}
E	114,75	101,25	8032,5	8032,5/T _{оп}	7087,5	7085,5/T _{оп}
F	127,5	112,5	8925	8925/T _{оп}	7875	7875/T _{оп}
G	127,5	112,5	8925	8925/T _{оп}	7875	371,88/T _{оп}

T_{оп} – тривалість періоду опалення, год.

Для визначення середнього та розрахункового навантаження згідно з [17] визначаємо розрахункові значення температур та тривалості періодів опалення. Всі обрані значення для подальшого аналізу та оцінки наведені у табл. 18.

Таблиця 18 – Розрахункові параметри для визначення питомих розрахункових навантажень системи кліматизації

Кліматична зона	Місто	Температура, °C:			Тривалість періоду опалення протягом сезону	
		внутрішня	зовнішня розрахункова	зовнішня середня	год	діб
І	Вінниця	20	-21	-0,2	4368	182
	Луцьк	20	-20	0,3	4320	180
	Дніпро	20	-24	-0,2	4128	172
	Донецьк	20	-22	-0,5	4224	176
	Житомир	20	-22	-0,2	4416	184
	Івано-Франківськ	20	-20	0,4	4296	179
	Київ	20	-22	-0,1	4224	176
	Кропивницький	20	-22	-0,3	4200	175
	Луганськ	20	-25	-0,4	4128	172
	Львів	20	-19	0,4	4296	179
	Полтава	20	-23	-0,8	4272	178
	Рівне	20	-21	0,1	4368	182
	Суми	20	-25	-1,4	4488	187
	Тернопіль	20	-20	-0,2	4416	184
	Харків	20	-23	-1	4296	179
	Хмельницький	20	-21	-0,1	4392	183
	Черкаси	20	-21	-0,3	4272	178
	Чернівці	20	-20	0,5	4200	175
	Чернігів	20	-23	-0,9	4488	187
II	Сімферополь	20	-15	2,6	3696	154
	Ужгород	20	-18	1,4	3696	154
	Запоріжжя	20	-21	0,6	3984	166
	Миколаїв	20	-20	1,1	3864	161
	Одеса	20	-18	2	3792	158
	Херсон	20	-19	1,3	3912	163

Представлені кліматичні параметри охоплюють усі обласні центри України та дозволяють врахувати як температурні відмінності між кліматичними зонами, так і різну тривалість опалювального періоду. Це створює можливість визначення питомих навантажень не лише для окремих міст, а й для будь-якого населеного пункту шляхом вибору відповідної температурної зони.

З урахуванням тривалості періоду опалення визначено питоме середнє розрахункове навантаження системи кліматизації для всіх регіонів країни (табл. 19).

Таблиця 19 – Питоме середнє розрахункове навантаження системи кліматизації для I та II температурних зон, кВт/житло

Кліматична зона	Місто\Клас ЕЕ	A	B	C	D	E	F	G
I	Вінниця	0,68	1,09	1,36	1,63	1,84	2,04	2,04
	Луцьк	0,69	1,10	1,38	1,65	1,86	2,07	2,07
	Дніпро	0,72	1,15	1,44	1,73	1,95	2,16	2,16
	Донецьк	0,70	1,13	1,41	1,69	1,90	2,11	2,11
	Житомир	0,67	1,08	1,35	1,62	1,82	2,02	2,02
	Івано-Франківськ	0,69	1,11	1,39	1,66	1,87	2,08	2,08
	Київ	0,70	1,13	1,41	1,69	1,90	2,11	2,11
	Кропивницький	0,71	1,13	1,42	1,70	1,91	2,13	2,13
	Луганськ	0,72	1,15	1,44	1,73	1,95	2,16	2,16
	Львів	0,69	1,11	1,39	1,66	1,87	2,08	2,08
	Полтава	0,70	1,11	1,39	1,67	1,88	2,09	2,09
	Рівне	0,68	1,09	1,36	1,63	1,84	2,04	2,04
	Суми	0,66	1,06	1,33	1,59	1,79	1,99	1,99
	Тернопіль	0,67	1,08	1,35	1,62	1,82	2,02	2,02
	Харків	0,69	1,11	1,39	1,66	1,87	2,08	2,08
	Хмельницький	0,68	1,08	1,35	1,63	1,83	2,03	2,03
	Черкаси	0,70	1,11	1,39	1,67	1,88	2,09	2,09
	Чернівці	0,71	1,13	1,42	1,70	1,91	2,13	2,13
	Чернігів	0,66	1,06	1,33	1,59	1,79	1,99	1,99
II	Сімферополь	0,71	1,14	1,42	1,70	1,92	2,13	2,13
	Ужгород	0,71	1,14	1,42	1,70	1,92	2,13	2,13
	Запоріжжя	0,66	1,05	1,32	1,58	1,78	1,98	1,98
	Миколаїв	0,68	1,09	1,36	1,63	1,83	2,04	2,04
	Одеса	0,69	1,11	1,38	1,66	1,87	2,08	2,08
	Херсон	0,67	1,07	1,34	1,61	1,81	2,01	2,01

Отримані результати показують, що середнє навантаження систем кліматизації змінюється у відносно вузькому діапазоні залежно від кліматичних умов регіону, однак різниця між класами енергетичної ефективності є значно більшою. Це свідчить про те, що основним фактором, який визначає потребу будівлі в тепловій енергії, є рівень її теплозахисту, тоді як кліматичні умови здійснюють коригувальний вплив.

Практичне значення отриманих залежностей полягає у можливості визначення середнього електричного навантаження систем електроопалення ще на початкових стадіях проєктування без виконання детального теплотехнічного розрахунку будівлі.

При проєктуванні систем опалення, варто використовувати розрахункові значення питомого навантаження – вони встановлюють максимальне навантаження системи при екстремальних кліматичних умовах у регіоні. Для встановлених значень, скористуємось формулою перерахунку середніх значень навантажень на розрахункові значення:

$$S_{\text{розр.}} = s_{\text{сер.}} \cdot \frac{(t_{\text{внутр.}} - t_{\text{зовн.}})}{(t_{\text{внутр.}} - t_{\text{сер.}})T_{\text{оп.}}},$$

де $s_{\text{сер.}}$ – питоме середнє навантаження системи кліматизації, кВт·год/житло;

$t_{\text{внутр.}}$ – внутрішня температура будівлі, °С;

$t_{\text{зовн.}}$ – зовнішня температура найхолоднішої п'ятиденки, °С;

$t_{\text{сер.}}$ – середньодобова температура за період опалення, °С;

$T_{\text{оп.}}$ – тривалість періоду опалення, год.

Запропонована залежність дозволяє перейти від середнього енергоспоживання за опалювальний сезон до максимального розрахункового навантаження, яке використовується під час вибору встановленої потужності джерела теплопостачання. На відміну від чинного нормативного підходу, запропонований метод враховує не лише температуру найхолоднішої п'ятиденки,

продовження табл. 21

Клас ЕЕ	Місто I температурної зони								
	Полтава	Рівне	Суми	Тернопіль	Харків	Хмельницький	Черкаси	Чернівці	Чернігів
A	0,021	0,020	0,020	0,019	0,020	0,020	0,020	0,021	0,019
B	0,033	0,032	0,032	0,030	0,032	0,032	0,032	0,033	0,031
C	0,041	0,040	0,040	0,038	0,041	0,039	0,040	0,042	0,039
D	0,049	0,048	0,048	0,046	0,049	0,047	0,048	0,050	0,047
E	0,056	0,054	0,054	0,051	0,055	0,053	0,054	0,056	0,053
F	0,062	0,060	0,060	0,057	0,061	0,059	0,060	0,062	0,058
G	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105

продовження табл. 21

Клас ЕЕ	Місто II температурної зони					
	Сімферополь	Запоріжжя	Ужгород	Миколаїв	Одеса	Херсон
A	0,020	0,020	0,021	0,021	0,021	0,020
B	0,033	0,032	0,033	0,033	0,033	0,032
C	0,041	0,040	0,041	0,041	0,042	0,040
D	0,049	0,048	0,050	0,049	0,050	0,048
E	0,055	0,054	0,056	0,055	0,056	0,054
F	0,061	0,060	0,062	0,062	0,063	0,060
G	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105	0,105

Порівняння розрахункових навантажень для двох температурних зон підтверджує, що максимальні значення спостерігаються у регіонах із найбільш низькими розрахунковими температурами зовнішнього повітря, тоді як для південних областей необхідна встановлена потужність є меншою. Водночас, навіть для найсуворіших кліматичних умов розраховані значення залишаються істотно нижчими за нормативні величини, які встановлені чинними методиками визначення електричних навантажень.

Для оцінювання практичної доцільності запропонованого підходу виконано його порівняння з чинною нормативною методикою визначення електричних навантажень, наведеною у ДБН В.2.5-23:2025. Таке порівняння дозволяє оцінити ступінь завищення встановленої потужності систем електроопалення при використанні традиційних нормативних підходів.

Таблиця 22 – Розрахункові навантаження жител 1-го виду із застосуванням повного електроопалення (середня площа квартири 70 м² з електроплитою 8,5 кВт) [1]

Споживачі електроенергії	Значення показника, кВт/житло, за кількості жител						
	12	24	40	60	100	200	400
Електроопалення прямої дії (ЕОПД)							
Житло 1-го виду за поз. 1.3 табл. 3.1	3,76	2,72	2,35	2,10	1,73	1,38	1,31
Електроопалення прямої дії (ЕОПД)	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37	7,37
Разом з ЕОПД	11,13	10,09	9,72	9,47	9,1	8,75	8,68

З аналізу даних, наведених у табл. 22 встановлено, що методика розрахунку, яка наведена у ДБН В.2.5-23:2025, не передбачає визначення нормативних питомих електричних навантажень для побутових споживачів будівель I та II рівня електрифікації. Зокрема, розрахунок електричного опалення у межах зазначеного нормативного документа передбачено виключно для квартир із III рівнем електрифікації та вище, тобто таких, що оснащені електричними плитами встановленою потужністю 8,5 кВт.

Водночас, враховуючи, що переважна частка житлового фонду України представлена будівлями I та II рівнів електрифікації, відсутність нормативно визначених питомих показників для оцінки електричного навантаження систем електроопалення у цих будівлях призводить до суттєвого викривлення оцінок сумарного рівня електроспоживання в житловому секторі.

Для найнижчого класу енергетичної ефективності мінімальні значення питомого розрахункового навантаження змінюється у межах від 4,00 до 4,77 кВт/житло залежно від регіону. У методиці розрахунку електричних

навантажень, що визначена ДБН В.2.5-23:2025 для системи електроопалення прямої дії розрахункові навантаження на житло площею 70 м² завищені, становлять 7,37 кВт/житло, що обумовлено застарілими нормами проектування енергоспоживання систем опалення – 100 Вт/м² опалюваної площі і враховує втрати енергії в розподільних мережах. Це значення відповідає найнижчому класу енергетичної ефективності і водночас є суттєво завищеним для більшості будівель житлового фонду, що призводить до нераціонального використання електрообладнання будівель, а також здорожчання проєктів реконструкції та модернізації інженерних систем будівель. При задоволенні мінімальних вимог і досягненні класу енергетичної ефективності «С» залежно від місцезнаходження отримано мінімальні розрахункові значення потужності електроопалення прямої дії у 1,8-5,54 разів менші для будівель класів А-Е, розташованих у І температурній зоні, та у 1,76-5,3 разів менші для будівель класів А-Е, розташованих у ІІ температурній зоні. Оскільки клас енергетичної ефективності будівель G має нижню межу розрахункового енергоспоживання і необмежений зверху (невизначене максимальне енергоспоживання для класу), то прийнято рішення для усіх будівель класу G залишити питоми розрахункові електропоживання систем опалення на рівні 7,37 кВт/житло, що відповідає діючій нормативній методиці.

Отримані результати свідчать, що чинні нормативні підходи до визначення електричних навантажень систем електроопалення не враховують сучасний рівень енергетичної ефективності житлових будівель, регіональні кліматичні особливості та результати комплексної термомодернізації. Унаслідок цього під час проектування відбувається систематичне завищення встановленої потужності електроопалення, що призводить до вибору обладнання із надлишковою продуктивністю, збільшення перерізів кабельних ліній, встановленої потужності трансформаторних підстанцій та вартості реконструкції систем електропостачання.

Запропонований підхід, заснований на використанні класів енергетичної ефективності будівель, нормативних показників енергоспоживання системою

кліматизації та фактичних кліматичних параметрів регіону, дозволяє визначати розрахункові електричні навантаження з урахуванням реальних умов експлуатації будівель. Це забезпечує більш обґрунтований вибір потужності систем електроопалення, підвищує ефективність використання електротехнічного обладнання та створює передумови для зменшення капітальних витрат під час модернізації житлового фонду.

2.5 Запровадження низькотемпературних систем опалення

Поточна політика ЄС щодо енергоефективності активно просуває перехід на низькотемпературні системи опалення. Таке рішення дозволяє зменшити втрати в мережах та спрощує інтеграцію теплових насосів (ТН), як вискоелективних джерел енергії. При введенні такого рішення необхідно переводити будинок на незалежну або комбіновану схему теплопостачання з ІТП [21-23].

В Україні нормативно затверджені високотемпературні графіки 95/70, 90/70, 80/60 (табл. 23), але поступово впроваджуються низькотемпературні графіки, такі як 60/40 та 55/45 (табл. 24), що передбачає концепція 4th Generation District Heating (4GDH). Концепція 4GDH вже реалізовується в трьох містах України за трьома різними проектами:

- Київ (Троещина) – проект у співпраці з ЄС. Він передбачає модернізацію теплових мереж з переходом на низькотемпературні режими;
- Львів – пілотні системи з тепловими насосами та біопаливом;
- Дніпро – проекти в рамках USAID та Nordic Environment Finance Corporation щодо зниження температур у мережах.

Таблиця 23 – Високотемпературні графіки для системи опалення

Температурний графік 95/70 [24]											
T _з	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
T ₁	43	45	47	48	50	52	54	55	57	59	60
T ₂	37	38	39	41	42	43	44	45	46	47	49
T _з	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
T ₁	62	64	65	67	69	70	72	74	75	77	78
T ₂	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60
T _з	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22
T ₁	80	81	83	84	86	87	89	91	92	94	95
T ₂	61	62	63	64	65	65	66	67	68	69	70
Температурний графік 90/70 [25]											
T _з	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
T ₁	45	47	48	50	51	53	54	56	57	59	60
T ₂	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50
T _з	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
T ₁	62	63	65	66	67	69	70	72	73	74	76
T ₂	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61
T _з	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22
T ₁	77	78	80	81	82	84	85	86	87	89	90
T ₂	61	62	63	64	65	66	67	67	68	69	70
Температурний графік 80/60 [26]											
T _з	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
T ₁	42	43	44	46	47	48	50	51	52	53	55
T ₂	36	37	38	39	40	41	41	42	43	44	45
T _з	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
T ₁	56	57	58	59	61	62	63	64	65	66	68
T ₂	45	46	47	48	48	49	50	51	51	52	53
T _з	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22
T ₁	69	70	71	72	73	74	76	77	78	79	80
T ₂	53	54	55	55	56	57	57	58	59	59	60

T_з – температура зовнішнього повітря, T₁ – температура теплоносія у подавальній магістралі, T₂ – температура теплоносія у зворотній магістралі.

Таблиця 24 – Низькотемпературні графіки для системи опалення

Температурний графік 60/40											
T_z	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
T_1	39,9	40,7	41,4	42,2	42,9	43,6	44,3	45	45,6	46,3	47
T_2	19,9	20,7	21,4	22,2	22,9	23,6	24,3	25	25,6	26,3	27
T_z	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
T_1	47,6	48,2	48,9	49,5	50,1	50,7	51,4	52	52,6	53,2	53,8
T_2	27,6	28,2	28,9	29,5	30,1	30,7	31,4	32	32,6	33,2	33,8
T_z	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22
T_1	54,3	54,9	55,5	56,1	56,6	57,2	57,8	58,3	58,9	59,4	60
T_2	34,3	34,9	35,5	36,1	36,6	37,2	37,8	38,3	38,9	39,4	40
Температурний графік 55/45											
T_z	10	9	8	7	6	5	4	3	2	1	0
T_1	34,9	35,7	36,4	37,2	37,9	38,6	39,3	40	40,6	41,3	42
T_2	24,9	25,7	26,4	27,2	27,9	28,6	29,3	30	30,6	31,3	32
T_z	-1	-2	-3	-4	-5	-6	-7	-8	-9	-10	-11
T_1	42,6	43,2	43,9	44,5	45,1	45,7	46,4	47	47,6	48,2	48,8
T_2	32,6	33,2	33,9	34,5	35,1	35,7	36,4	37	37,6	38,2	38,8
T_z	-12	-13	-14	-15	-16	-17	-18	-19	-20	-21	-22
T_1	49,3	49,9	50,5	51,1	51,6	52,2	52,8	53,3	53,9	54,4	55
T_2	39,3	39,9	40,5	41,1	41,6	42,2	42,8	43,3	43,9	44,4	45

T_z – температура зовнішнього повітря, T_1 – температура теплоносія у подавальній магістралі, T_2 – температура теплоносія у зворотній магістралі.

У більшості населених пунктів України для опалення житлових масивів використовуються графіки 95/70 або 90/70, але ДБН В.2.5-39:2008 рекомендує до використання більш економний графік 80/60 [26, 27]. При цьому, використання графіків 60/40 та 55/45 – не заборонено. Їх значною перевагою є зменшення теплових втрат у магістральних і розподільних мережах. Також, перехід на низькотемпературні системи і графіки опалення створює передумови до ефективної інтеграції теплових насосів до систем енергозабезпечення житлових будівель. У майбутній перспективі може розглядатися перехід на низькотемпературні графіки до 45/30. Але, такі графіки можуть використовуватися в енергоефективних будинках та при максимальному наближенні джерела енергії до споживачів.

Графіки 95/70, 90/70 та 80/60 затверджуються на місцевому рівні, в той час як графіки 60/40 та 55/45 необхідно розраховувати самостійно з урахуванням розрахункових тепловтрат опалюваних будівель. Наведені в табл. 24 дані були отримані розрахунковим методом.

За умови, що тепловтрати в будівлі дорівнюють тепловіддачі опалювальних приладів, отримаємо [23]:

$$\begin{aligned} Q_{loss}(t_e) &= H \cdot (t_i - t_e); \\ Q_{rad} &= K \cdot (\Delta T_m)^{n_r} = K \cdot (T_m - t_i)^{n_r}; \\ H \cdot (t_i - t_e) &= K \cdot (T_m(t_e) - t_i)^{n_r}, \end{aligned}$$

де H – тепловтрати будівлі, Вт/°C – розраховують за затвердженими стандартами;

t_i – внутрішня температура повітря, °C;

t_e – зовнішня температура повітря, °C;

K – константа, що визначається з умови розрахункової точки температурного графіку;

n_r – показник нелінійності радіаторів змінюється в межах від 1,1...1,5;

$T_m = (T_s + T_r)/2$ – значення розрахункової точки температурного графіку, °C;

T_s – максимальна температура подавального трубопроводу, °C;

T_r – максимальна температура зворотнього трубопроводу, °C

Виходячи з вище наведених формул, для будь-якого значення t_e отримаємо:

$$T_m(t_e) = t_i + \left(\frac{H \cdot (t_i - t_e)}{K} \right)^{1/n_r} = t_i + (T_m - t_i) \cdot \left(\frac{t_i - t_e}{t_i - t_{i,min}} \right)^{\frac{1}{n_r}},$$

де $t_{i,min}$ – найнижча температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °C.

Щоб розкласти отримані значення для подавального та зворотнього трубопроводів, використано наступні вирази відповідно:

$$T_s = T_m + \frac{\Delta T}{2} \text{ та } T_r = T_m - \frac{\Delta T}{2},$$

де $\Delta T = T_s - T_r$ – різниця температур між максимальними значеннями подавального та зворотнього трубопроводів, °С.

2.6 Переведення на теплонасосне обладнання

Теплопостачання населених пунктів України забезпечують 7712 підприємств усіх форм власності, на яких експлуатується 31312 котелень сумарною потужністю 133311,7 Гкал/год, 24% з яких обладнані котлоагрегатами, що експлуатується понад 20 років і мають коефіцієнт корисної дії нижче 82%.

Загальна кількість установлених котлів становить 72298 одиниць, з них 16468 котлів (22,8%) з терміном експлуатації більше 20 років.

Протяжність теплових мереж у двотрубному обчисленні становить 35834,2 км, з них старих та аварійних – 5620,7 км, що становить 15,7% від загальної протяжності мереж.

Втрати теплової енергії в інженерних мережах за рік становлять 12,9% від загальної кількості реалізованої теплової енергії, у Дніпропетровській області – 17,5%, Чернігівській – 16,9%, Сумській – 16,8%, Херсонській – 15,6%, Закарпатській – 14,8%, Черкаській – 13,1%, у місті Києві – 18,2%.

Наведені статистичні дані свідчать про критичний рівень фізичного та морального зношення систем централізованого теплопостачання України. Значна частина котельного обладнання експлуатується понад нормативний термін служби, що супроводжується зниженням коефіцієнта корисної дії, збільшенням витрат палива та підвищенням експлуатаційних витрат. Одночасно суттєві втрати теплової енергії в магістральних мережах призводять до зростання питомого енергоспоживання та погіршення економічної ефективності централізованого теплопостачання. У таких умовах модернізація лише джерел теплоти не

забезпечує необхідного ефекту без комплексного оновлення внутрішньобудинкових систем теплопостачання.

Саме тому одним із перспективних напрямків модернізації житлового фонду є поступовий перехід від централізованих високотемпературних систем до децентралізованих низькотемпературних систем із використанням теплових насосів та автоматизованих індивідуальних теплових пунктів [18, 27-29].

Розрізняють різні системи опалення житлових будівель в залежності від схеми приєднання труб – однотрубні та двотрубні системи. В однотрубних системах теплоносії протікає послідовно через усі радіатори, а потім поступає в котел. Перевагою такої системи є економічність та простота монтажу. Недоліком – нерівномірний прогрів у зв'язку зі складністю регулювання температури окремого радіатора без впливу на інші.

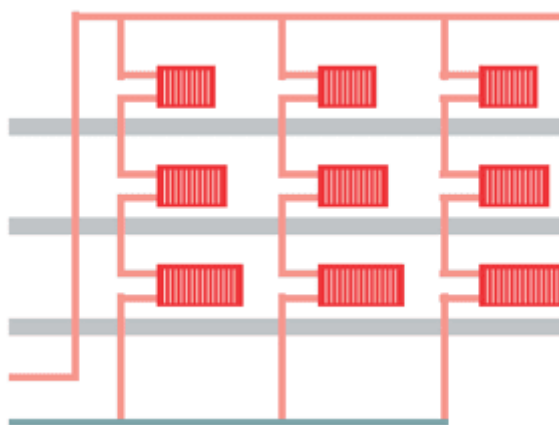


Рисунок 4 – Однотрубна система опалення [30]

В двотрубних системах теплопостачання теплоносії протікає через кожен радіатор незалежно від інших. Перевагою такої схеми є точність регулювання температури теплоносія та висока ефективність. Недоліком такої системи є більша вартість та складніший монтаж.

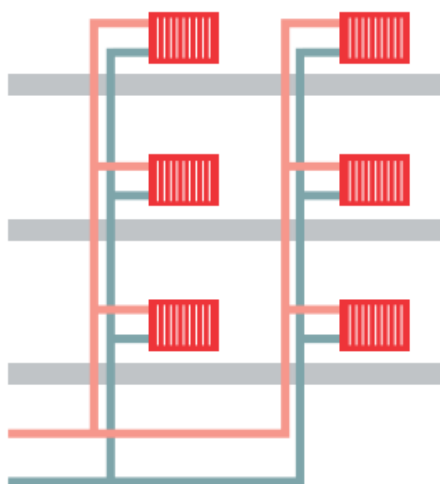


Рисунок 5 – Двотрубна система опалення [30]

З точки зору впровадження теплових насосів найбільш придатними є двотрубні системи опалення, оскільки вони забезпечують рівномірний розподіл теплоносія між усіма опалювальними приладами та дозволяють здійснювати індивідуальне регулювання тепловіддачі кожного радіатора. Це особливо важливо при експлуатації теплових насосів, ефективність яких істотно залежить від стабільності температурного режиму системи опалення.

Однотрубні системи, навпаки, характеризуються значною нерівномірністю температурного режиму та складністю гідравлічного балансування, що ускладнює їх використання з низькотемпературними джерелами теплоти. Тому під час комплексної термомодернізації житлових будинків доцільно одночасно виконувати модернізацію внутрішньобудинкових систем опалення.

За розташуванням магістральних трубопроводів системи опалення поділяють на системи з верхньою і нижньою (П-подібні системи) подачею теплоносія.

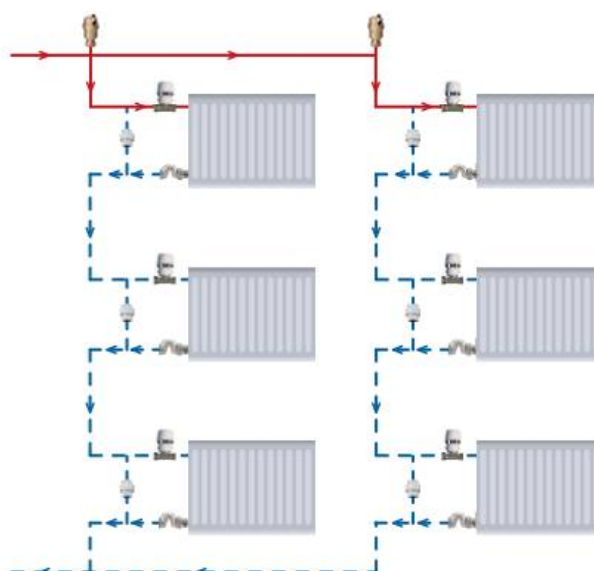


Рисунок 6 – Однотрубна система з верхньою подачею теплоносія [30]

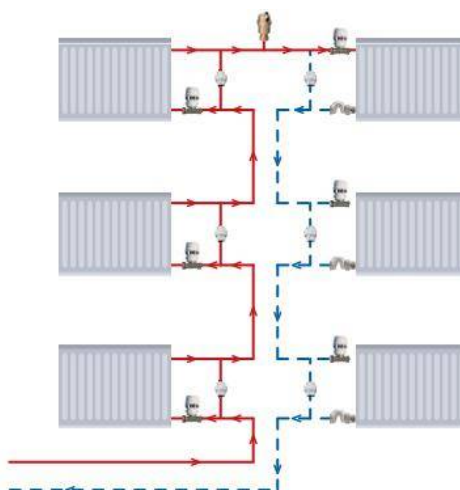


Рисунок 7 – Однотрубна система з нижньою подачею теплоносія [30]

За гідравлічним приєднанням відомо дві основні схеми приєднання багатоквартирних житлових будинків до теплової мережі: залежна (центральний тепловий пункт) та незалежна (індивідуальний тепловий пункт). При залежній схемі приєднання системи опалення, будинкова система безпосередньо з'єднується з магістраллю тепломережі через елеваторний вузол, в той час як незалежна схема передбачає встановлення пластичного теплообмінника між мережею та будинком, що в свою чергу розділяє контури. При залежному підключенні внутрішньобудинкових мереж температурні режими їх експлуатації

напрямку залежать від прийнятих у даному населеному пункті теплових графіків, стану зовнішніх магістралей, способів підключення інших об'єктів уздовж подавальної магістралі та багатьох інших чинників. Незалежна схема підключення із облаштуванням індивідуального теплового пункту дозволяє розглядати зміну температурного режиму теплоносія всередині будинка, а також створює передумови до впровадження додаткових будинкових джерел теплової енергії без істотного впливу на зовнішню мережу [27, 28, 31, 32].

Головною перевагою використання центрального теплового пункту (ЦТП) є мінімальна вартість та простота встановлення вузлів. Їх рекомендують встановлювати для стабільних високотемпературних мереж і будинків, які не потребують локального регулювання режимів роботи енергетичного обладнання в широкому діапазоні [23].

У той же час, індивідуальний тепловий пункт (ІТП) попри високу вартість має значно більшу кількість переваг, а саме:

- більш точний контроль температури і тиску в будинку;
- зменшення додаткових втрат енергії;
- сумісність з низькотемпературними графіками та 4-м поколінням систем централізованого теплопостачання.

У зв'язку з великою зношеністю центральних теплових магістралей, доцільно переводити будинки з ЦТП на ІТП. Таке рішення сприяє економії теплової енергії за рахунок зменшення втрат у мережах, підвищенню ефективності регулювання теплопостачання та адаптації режимів роботи систем до фактичних потреб споживачів.

Встановлення індивідуального теплового пункту є одним із ключових етапів переходу будівлі до сучасних систем теплозабезпечення. На відміну від центрального теплового пункту, ІТП забезпечує повну автономність регулювання температури теплоносія відповідно до фактичних погодних умов, режимів експлуатації будівлі та вимог мешканців. Використання погодозалежного регулювання дозволяє автоматично змінювати температуру теплоносія залежно

від температури зовнішнього повітря, що сприяє скороченню споживання теплової енергії без погіршення умов теплового комфорту.

Крім цього, ІТП створює необхідні технічні передумови для інтеграції локальних джерел теплової енергії, зокрема теплових насосів, сонячних теплових колекторів, дахових фотоелектричних станцій та акумуляторів теплової енергії. Саме тому сучасні концепції декарбонізації житлового сектору передбачають широке впровадження індивідуальних теплових пунктів як базового елементу модернізації існуючих будівель (рис. 8).

Серед усіх типів теплових насосів найбільшого поширення при модернізації багатоквартирних житлових будинків набули теплові насоси типу «повітря-вода» [33]. Це обумовлено відсутністю необхідності виконання дорогих земляних робіт, буріння свердловин або облаштування відкритих водойм, що суттєво зменшує капітальні витрати та скорочує строки впровадження.

Принцип роботи такого обладнання базується на відборі низькопотенційної теплоти атмосферного повітря з її подальшим перетворенням у теплову енергію, придатну для систем опалення та гарячого водопостачання. Основною характеристикою теплового насоса є коефіцієнт перетворення COP, який визначає відношення виробленої теплової енергії до спожитої електричної. Для сучасних повітряних теплових насосів значення COP упродовж більшої частини опалювального сезону становить 3-5, тобто на виробництво 1 кВт·год теплової енергії витрачається лише 0,2-0,33 кВт·год електроенергії.

Разом із тим ефективність теплового насоса істотно залежить від температурного графіка системи опалення [34, 35]. При зниженні температури теплоносія з традиційних графіків 80/60 °C до низькотемпературних режимів 55/45 °C або 45/35 °C сезонний коефіцієнт ефективності збільшується на 20-35 %. Саме тому впровадження теплових насосів доцільно поєднувати із комплексною термомодернізацією будівлі та встановленням погодозалежного автоматичного регулювання.

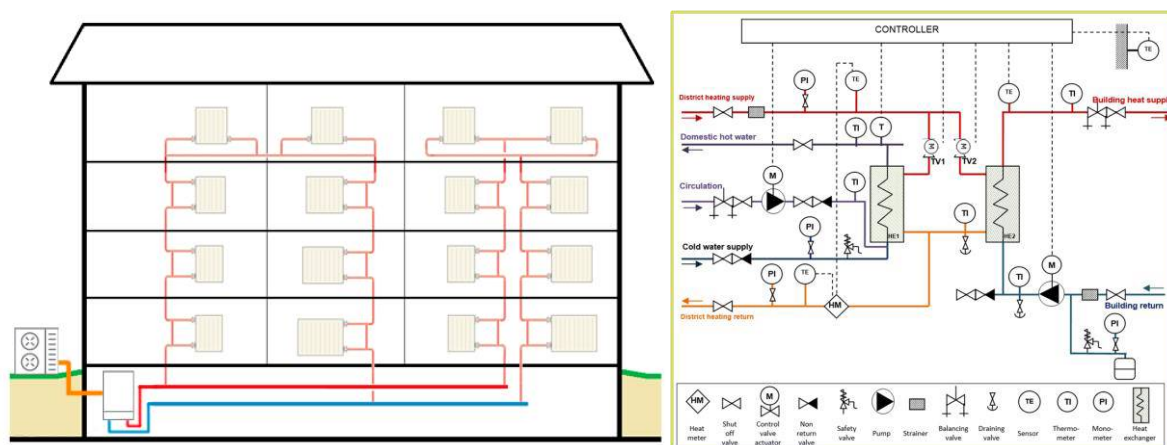


Рисунок 8 – Схема організації опалення багатоквартирних будинків з ТН повітря-вода

Представлена схема інтеграції теплового насоса демонструє можливість використання існуючої системи опалення після її часткової модернізації. При цьому основним завданням є забезпечення необхідної температури теплоносія за мінімального електроспоживання компресора теплового насоса. Для цього доцільно використовувати буферні теплоаккумулятори, погодозалежне регулювання та каскадне підключення резервного електричного котла, який працює лише під час екстремально низьких температур зовнішнього повітря.

Такий підхід дозволяє зменшити встановлену потужність теплового насоса приблизно на 15-20% порівняно з його вибором за максимальною розрахунковою тепловою потужністю, що забезпечує суттєве скорочення капітальних витрат та підвищує економічну ефективність систем електропостачання.

Одним із визначальних факторів ефективності роботи теплових насосів є температура теплоносія у системі опалення. Чим нижчою є температура подачі, тим менший перепад температур забезпечує холодильний цикл компресора, а відповідно зростає коефіцієнт перетворення теплового насоса. Саме тому сучасні системи тепlopостачання четвертого покоління (4GDH) базуються на використанні низькотемпературних режимів 55/45 °C, 50/40 °C або 45/35 °C [34, 35].

Для існуючих багатоквартирних житлових будинків перехід на такі температурні графіки можливий лише після комплексної термомодернізації огорожувальних конструкцій та балансування внутрішньобудинкових систем опалення. У цьому випадку зменшення теплового навантаження компенсує нижчу температуру теплоносія, що забезпечує підтримання нормативної температури повітря в приміщеннях навіть за використання низькотемпературних джерел теплоти [18, 21, 28].

Проведений аналіз показав, що існуючі централізовані системи теплопостачання характеризуються значним фізичним зношенням обладнання, високими втратами теплової енергії та обмеженими можливостями регулювання режимів роботи. Перехід до індивідуальних теплових пунктів створює технічні передумови для інтеграції теплових насосів, використання низькотемпературних температурних графіків та впровадження сучасних автоматизованих систем керування. Використання теплових насосів типу «повітря–вода» є найбільш доцільним для модернізації багатоквартирних житлових будинків завдяки високій енергетичній ефективності, відносно невисоким капітальним витратам та можливості інтеграції з існуючими системами опалення. Це є підґрунтям для подальшого обґрунтування раціональної потужності джерел електроопалення, виконаного в наступних підрозділах дисертації.

При модернізації систем теплопостачання багатоквартирних житлових будинків найбільш доцільним є використання теплових насосів типу «повітря–вода». Це обумовлено технічними, економічними та містобудівними особливостями їх впровадження. На відміну від теплових насосів типу «грунт–вода» та «вода–вода», повітряні теплові насоси не потребують використання природного низькопотенційного джерела теплоти, доступ до якого в умовах щільної міської забудови є суттєво обмеженим або економічно недоцільним.

Застосування теплових насосів типу «грунт–вода» потребує облаштування вертикальних або горизонтальних ґрунтових теплообмінників. Горизонтальні колектори вимагають значних площ земельних ділянок, що у декілька разів перевищують площу забудови будинку, тоді як у міських умовах вільні території

практично відсутні. Використання вертикальних геотермальних зондів дозволяє зменшити необхідну площу, проте потребує буріння свердловин глибиною 80-200 м, що суттєво збільшує капітальні витрати. Крім того, виконання бурових робіт у межах сформованої міської забудови супроводжується необхідністю отримання дозвільної документації, проведення інженерно-геологічних досліджень, погодження із власниками підземних комунікацій та дотримання санітарних і будівельних обмежень. У районах із високою щільністю підземних мереж або складними геологічними умовами реалізація таких проєктів може бути взагалі неможливою.

Теплові насоси типу «вода-вода» характеризуються найвищими показниками енергетичної ефективності завдяки практично сталим температурам підземних або поверхневих вод протягом року. Проте їх застосування потребує наявності водоносних горизонтів із достатнім дебітом або відкритих водойм поблизу будівлі. Для більшості міських територій такі умови відсутні. Крім того, система передбачає буріння щонайменше двох свердловин (видобувної та нагнітальної), що значно підвищує вартість будівництва. Додатковими ризиками є зниження дебіту свердловин у процесі експлуатації, замулення теплообмінників, відкладення солей жорсткості, корозія обладнання, а також необхідність отримання дозволів на спеціальне водокористування. У разі порушення гідрогеологічних умов можливе зниження ефективності системи або виникнення негативного впливу на підземні водні горизонти.

На відміну від зазначених технологій, теплові насоси типу «повітря-вода» використовують атмосферне повітря як невичерпне джерело низькопотенційної теплоти, що не потребує виконання земляних робіт, буріння свердловин або будівництва водозабірних споруд. Монтаж такого обладнання може здійснюватися на покрівлі будинку, технічному поверсі, прибудинковій території або фасаді без істотного втручання у конструкції будівлі. Це дозволяє скоротити тривалість монтажу та мінімізувати вплив будівельних робіт на експлуатацію житлового будинку.

Економічні переваги повітряних теплових насосів також є суттєвими. За даними сучасних техніко-економічних досліджень, капітальні витрати на впровадження систем типу «повітря-вода» становлять приблизно 600-1200 євро на 1 кВт теплової потужності. Для теплових насосів типу «грунт-вода» цей показник збільшується до 1200-2000 євро/кВт, а для систем «вода-вода» може перевищувати 1500-2500 євро/кВт залежно від геологічних умов та складності облаштування свердловин. Таким чином, використання повітряних теплових насосів дозволяє зменшити початкові інвестиції приблизно на 30-50 % порівняно із геотермальними системами.

Незважаючи на те, що сезонний коефіцієнт перетворення (SCOP) теплових насосів типу «повітря-вода» зазвичай становить 3,0-4,5 і є дещо нижчим, ніж у систем «грунт-вода» (4,0-5,5) та «вода-вода» (4,5-6,0), різниця в експлуатаційних витратах, як правило, не компенсує значно більших капітальних вкладень у геотермальні системи. Для багатоквартирних житлових будинків термін окупності повітряних теплових насосів зазвичай становить 5-8 років, тоді як для систем «грунт-вода» він може досягати 10-15 років, а для систем «вода-вода» - понад 12 років залежно від вартості бурових робіт та місцевих геологічних умов.

Додатковою перевагою теплових насосів типу «повітря-вода» є можливість їх поєднання з даховими фотоелектричними станціями та акумуляторами електричної енергії. У цьому випадку частина електроенергії, необхідної для роботи компресора, виробляється безпосередньо на об'єкті, що дозволяє зменшити навантаження на систему електропостачання та скоротити експлуатаційні витрати. Саме така конфігурація відповідає сучасним концепціям декарбонізації житлового сектору, розвитку будівель із майже нульовим споживанням енергії (nZEB) та систем централізованого теплопостачання четвертого покоління.

Отже, з урахуванням технічних обмежень щільної міської забудови, значно менших капітальних витрат, відсутності потреби у бурінні свердловин і виконанні масштабних земляних робіт, нижчих проєктних ризиків, простоти інтеграції з існуючими інженерними мережами та можливості використання

відновлюваних джерел електроенергії, теплові насоси типу «повітря-вода» є найбільш раціональним рішенням для модернізації систем теплопостачання багатоквартирних житлових будинків у міських умовах. Саме тому вони розглядаються в дисертаційній роботі як базова технологія під час дослідження енергоефективних режимів роботи систем електропостачання житлових будівель.

2.7 Визначення SCOP

Для оцінки та аналізу доцільності застосування низькотемпературних графіків промодельємо їх використання у комбінованих системах енергозабезпечення будівель з тепловими насосами. Ефективність ТН обумовлена особливостями термодинамічного циклу, що визначаються, передусім, типом холодоагенту та компресора. Найбільш ефективним, на сьогодні, вважаються спіральні компресори. В системі опалення з відбором енергії з зовнішнього повітря використовують холодоагенти R410A і R290, які дозволяють отримати високі значення COP в широкому діапазоні робочих температур. Водночас, ці холодоагенти мають високі значення COP в діапазоні температур зовнішнього повітря 0 – -5°C, який є найбільш тривалим упродовж опалювального сезону з урахуванням фактичних кліматичних змін.

Опалювальний сезон у м. Дніпро характеризується розмахом середньодобових зовнішніх температур від 8°C до -24°C відповідно до [17, 31]. Розглянемо типові енергетичні характеристики теплових насосів зі спіральними компресорами та холодоагентами R410A і R290 типу повітря-вода (рис. 9).

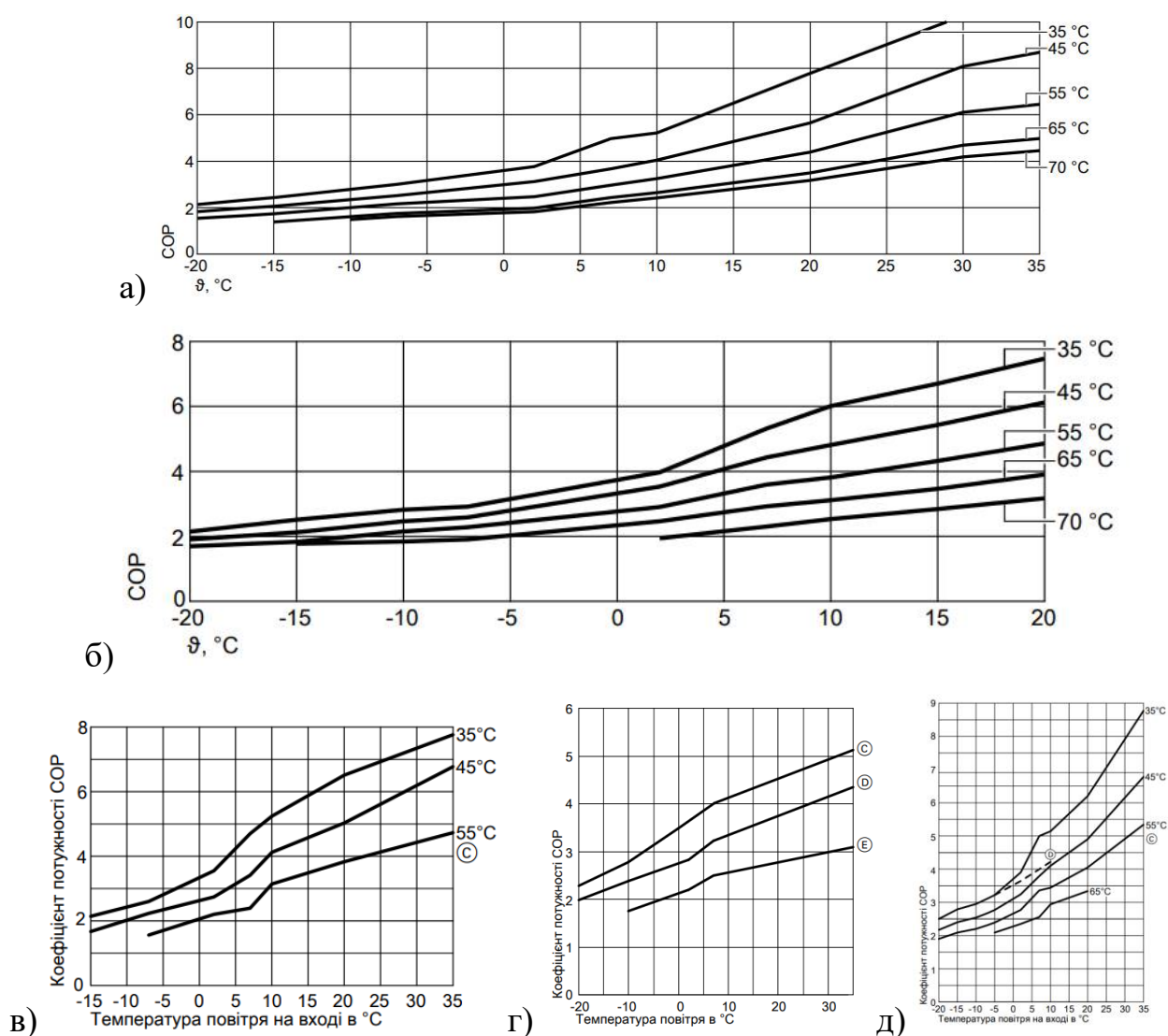


Рисунок 9 – Характеристики теплових насосів типу повітря-вода:

- а) Vitocal 150-A типу AWO-M-E-AC 151.A04 [36];
- б) Vitocal 250-A типу AWO-AC-AF 251.A40 [37];
- в) Vitocal 200-A типу AWCI-AC 201.A10 [38];
- г) Vitocal 350-A типу AWHI/AWHO-AC 351.A14 [39];
- д) Vitocal 300-A типу AWO-AC 301.B11 [40].

Виходячи з наведених на рис. 9 характеристик бачимо, що робочий температурний діапазон ТН лежить у межах від -20°C до 35°C , а температура подаючої магістралі змінюється від 35°C до 70°C . Тому доцільно використовувати низькотемпературні графіки подачі теплоносія для ефективної роботи ТН.

Промодельюємо режими роботи теплових насосів для різних температурних графіків. Спершу розглянемо високотемпературний графік 80/60, який рекомендує використовувати ДБН В.2.5-39:2008. Користуючись кривими, які характеризують ТН, будемо залежності COP від зовнішньої температури з врахуванням змін температури теплоносія подаючої магістралі відповідно до температурних графіків роботи систем опалення (рис. 10) [23].

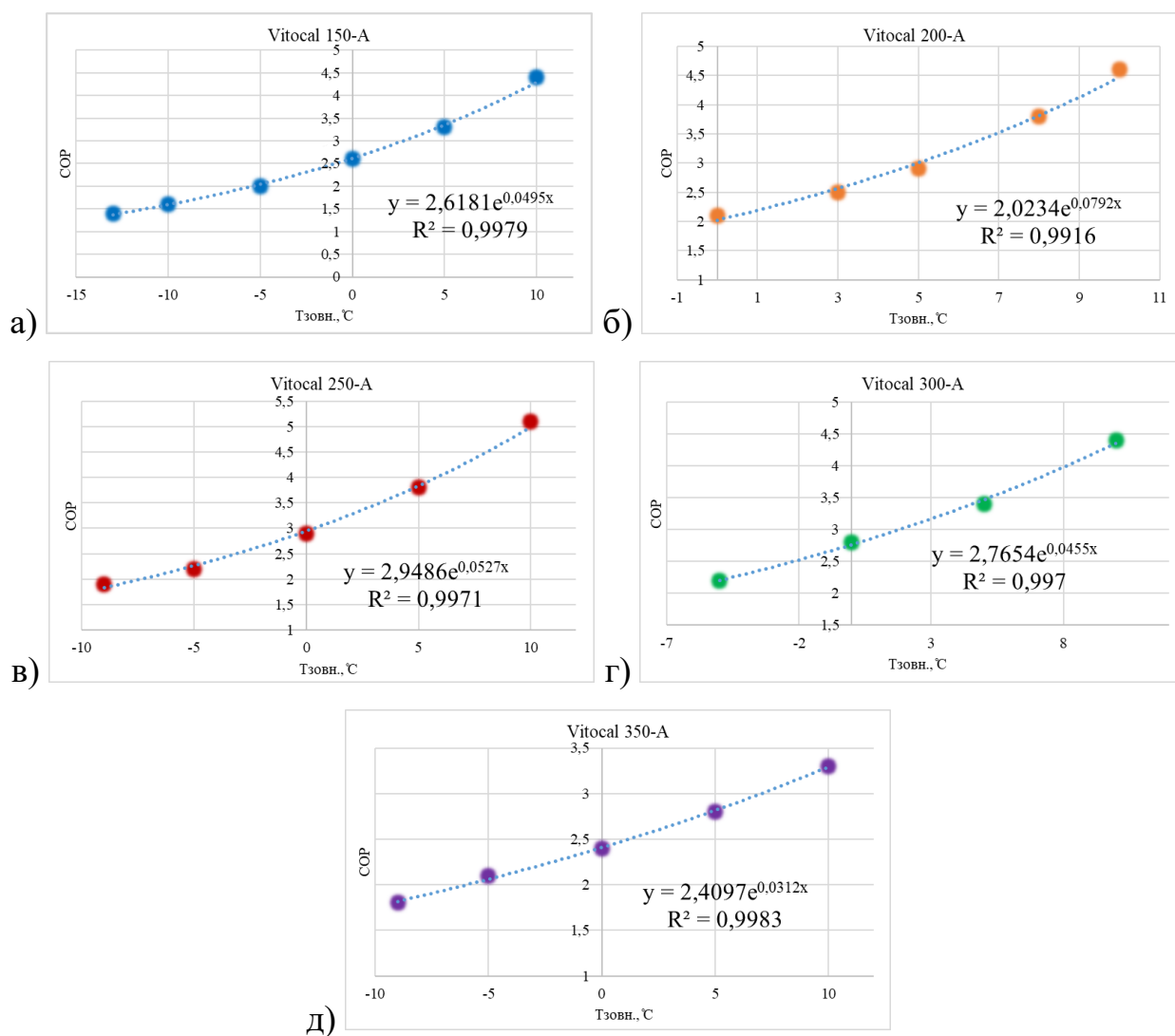


Рисунок 10 – Залежності COP від зовнішньої температури для високотемпературного графіку 80/60 різними видами ТН:

- а) Vitocal 150-A типу AWO-M-E-AC 151.A04;
- б) Vitocal 200-A типу AWC1-AC 201.A10;
- в) Vitocal 250-A типу AWO-AC-AF 251.A40;
- г) Vitocal 300-A типу AWO-AC 301.B11;
- д) Vitocal 350-A типу AWH1/AWHO-AC 351.A14.

Аналогічно виконуємо моделювання для низькотемпературних графіків 60/40 (рис. 11) та 55/45 (рис. 12).

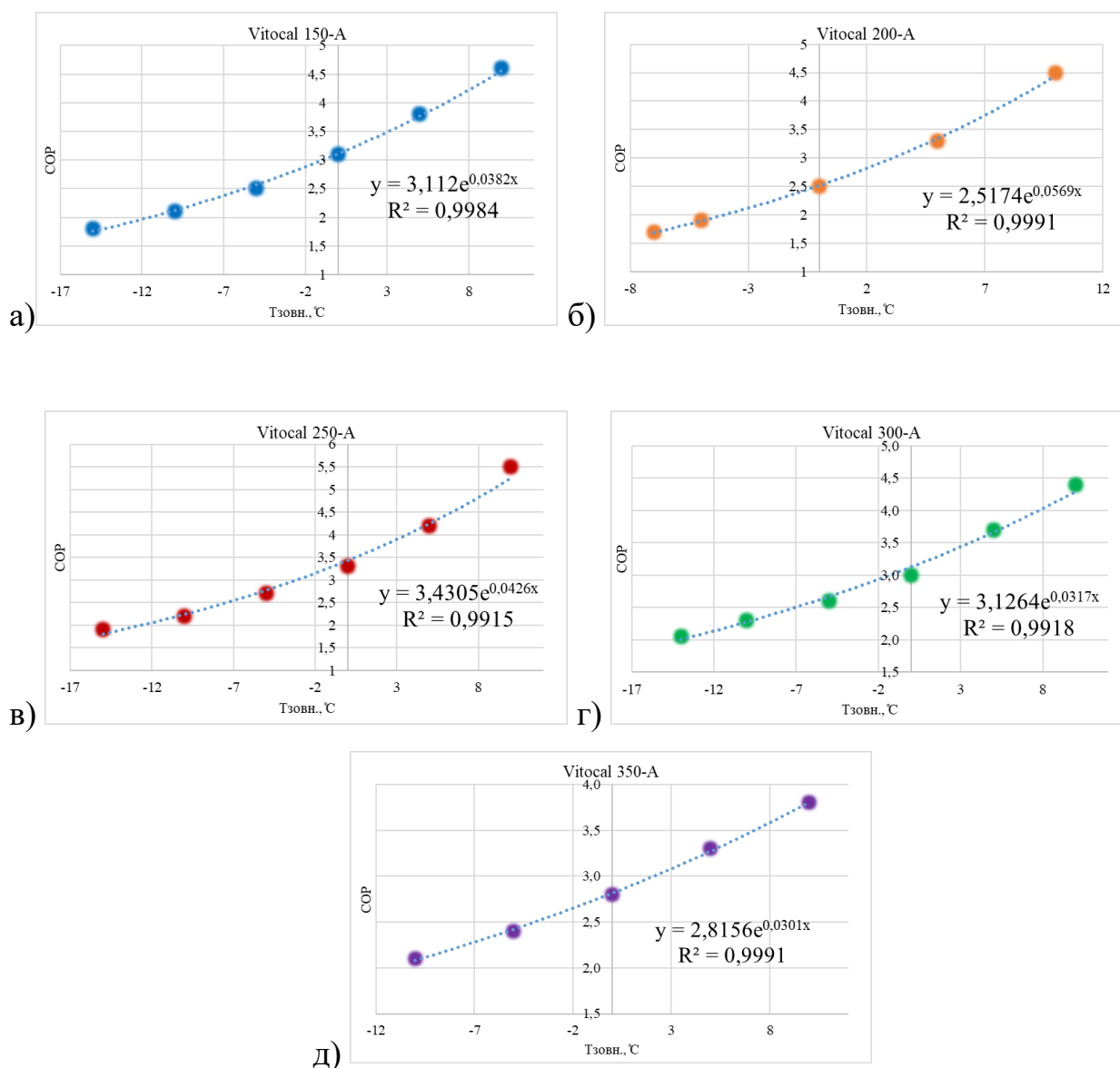


Рисунок 11 – Залежності COP від зовнішньої температури для низькотемпературного графіку 60/40 різними видами ТН:

- а) Vitocal 150-A типу AWO-M-E-AC 151.A04;
- б) Vitocal 200-A типу AWCi-AC 201.A10;
- в) Vitocal 250-A типу AWO-AC-AF 251.A40;
- г) Vitocal 300-A типу AWO-AC 301.B11;
- д) Vitocal 350-A типу AWHI/AWHO-AC 351.A14.

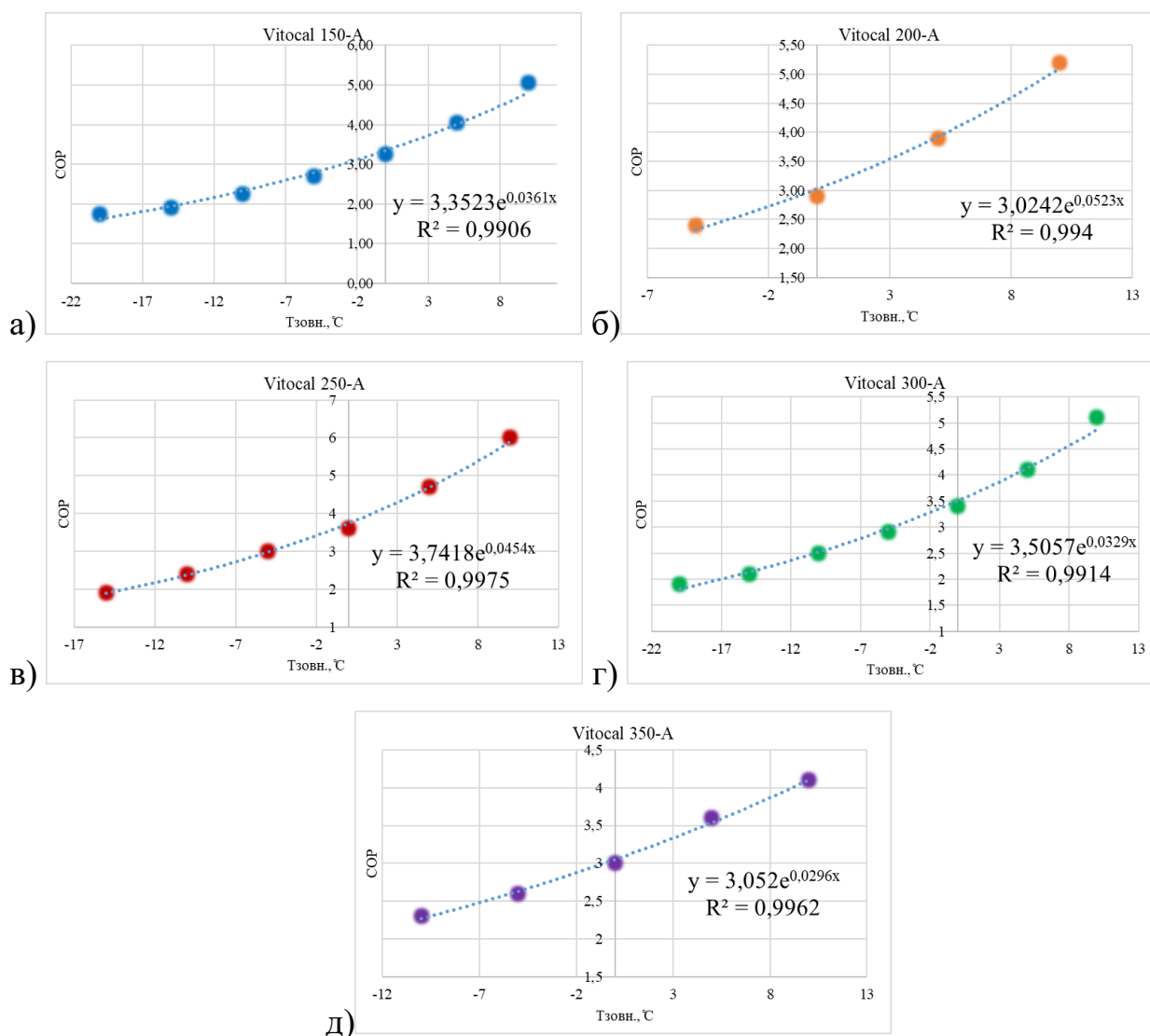


Рисунок 12 – Залежності COP від зовнішньої температури для низькотемпературного графіку 55/45 різними видами ТН:

- а) Vitocal 150-A типу AWO-M-E-AC 151.A04;
- б) Vitocal 200-A типу AWCi-AC 201.A10;
- в) Vitocal 250-A типу AWO-AC-AF 251.A40;
- г) Vitocal 300-A типу AWO-AC 301.B11;
- д) Vitocal 350-A типу AWHI/AWHO-AC 351.A14.

Отримані графіки залежностей коефіцієнта ефективності претворення енергії (COP) наочно демонструють, що при роботі теплових насосів у складі високотемпературних систем опалення (температурний графік 80/60) робочий діапазон зовнішніх температур обмежений значеннями від -13°C до 10°C . При

зовнішніх температурах нижчих за -13°C температура теплоносія в подавальній магістралі системи опалення, відповідно до температурного графіка, має бути вищою, ніж здатний забезпечувати тепловий насос, тому постає задача догрівання теплоносія за допомогою допоміжного джерела енергії. В такому випадку найдешевшим інженерним рішенням є пряме догрівання теплоносія електричними ТЕНами в тепловому пункті будівлі. При переході на низькотемпературний графік $55/45^{\circ}\text{C}$ діапазон зовнішніх температур, в якому тепловий насос здатний забезпечити енергоспоживання будівлі, розширюється до $-20^{\circ}\text{C} \dots +10^{\circ}\text{C}$. Цей діапазон повною мірою відповідає фактичним температурам, які спостерігаються у м.Дніпро упродовж останніх років відповідно до даних архіву погодних умов [23, 41, 42]. Водночас, при зниженні зовнішньої температури поза -20°C , можна також розглядати перехід на пряме електроопалення електричними ТЕНами.

Таблиця 25 – Споживання енергії системою кліматизації 9-ти поверхової будівлі

	ЦТП		ТЕН		ТН	
	розрахунковий	фактичний	розрахунковий	фактичний	розрахунковий	фактичний
січень	123,58	104,43	102,14	85,92	44,21	37,35
лютий	132,40	107,35	109,97	88,77	47,36	38,40
березень	108,26	75,70	89,61	62,04	38,73	27,08
квітень	14,51	14,51	11,88	11,88	5,19	5,19
жовтень	20,56	11,99	16,94	9,68	7,36	4,29
листопад	104,19	82,04	86,36	67,62	37,27	29,35
грудень	141,67	117,41	117,67	97,13	50,68	41,99
Всього	645,19	513,44	534,57	423,04	230,78	183,65

Таблиця 26 – Споживання енергії системою кліматизації 5-ти поверхової будівлі

	ЦТП		ТЕН		ТН	
	розрахунковий	фактичний	розрахунковий	фактичний	розрахунковий	фактичний
січень	121,50	101,60	99,41	82,56	43,46	36,34
лютий	98,75	77,65	80,69	62,81	35,32	27,78
березень	73,33	46,36	59,26	36,28	26,23	16,58
квітень	6,56	6,56	4,88	4,88	2,35	2,35
жовтень	11,60	5,38	9,17	3,71	4,15	1,92
листопад	77,83	59,18	63,40	47,60	27,84	21,17
грудень	111,27	90,78	91,08	73,74	39,80	32,47
Всього	500,83	387,50	407,88	311,59	179,14	138,61

Для оцінки енергетичної ефективності переходу на системи енергозабезпечення будівель з використанням теплових насосів у якості основного джерела енергії та електричних ТЕНів у якості допоміжного джерела, проаналізуємо сезонний коефіцієнт перетворення енергії в системі енергозабезпечення будівлі. При цьому електричну енергію, яка споживається електричними ТЕНами, що працюють в якості допоміжного джерела енергії, будемо додавати до електроенергії, яка споживається тепловим насосом. Таким чином, сезонний коефіцієнт перетворення енергії для системи енергозабезпечення будівлі визначатимемо за співвідношенням:

$$SCOP_{\text{сист}} = \frac{E_{\text{тепл}}}{E_{\text{ее,ТН}} + E_{\text{ее,ТЕН}}},$$

де $E_{\text{тепл}}$ – споживана теплова енергія будівлею за опалювальний період, кВт·год;

$E_{\text{ее,ТН}}$ – теплова енергія, що виробляється ТН, кВт·год;

$E_{\text{ее,ТЕН}}$ – теплова енергія, що виробляється системою прямого догріву, кВт·год.

Моделювання роботи теплового насоса з електричними ТЕНами в системі енергозабезпечення будівлі виконано для фактичних температур зовнішнього повітря для м. Дніпро упродовж опалювального сезону 2023/2024 р.р. Опалювальний сезон за фактичними значеннями температур, як правило, розпочинається з 1 листопада і триває до 31 березня, тож отримані результати визначені для вказаного опалювального періоду. Встановлено, що при роботі

системи з високотемпературним графіком 80/60 сезонний коефіцієнт перетворення енергії $SCOP_{\text{сист}(80/60)} = 2,68$. При переході на низькотемпературний графік роботи системи опалення сезонний коефіцієнт перетворення енергії очікується на рівні $SCOP_{\text{сист}(55/45)} = 3,54$. Різниця формується одночасно за рахунок підвищення загальної ефективності використання теплового насоса при забезпеченні нижчої температури в подавальному трубопроводі, а також за рахунок розширення робочого діапазону температур теплового насоса і зменшення тривалості роботи системи прямого електроопалення за допомогою ТЕНів.

2.8 Визначення розрахункових навантажень СЕП багатоквартирних будинків із системою електроопалення

Розрахунок електричних навантажень багатоквартирних житлових будинків виконується згідно [1]. Розрахункове навантаження групи жител з однаковим питомим електричним навантаженням, приведене до лінії живлення, вводу в житловий будинок, шин напругою 0,4 кВ ТП, $P_{жN}$ визначається за формулою [1]:

$$P_{жN} = P_{жП} \cdot N,$$

де $P_{жП}$ – питоме розрахункове електричне навантаження одного житла (квартири), яке вибирається за таблицею 3.1 [1] залежно від прийнятого рівня електрифікації та кількості квартир, приєднаних до даної ланки електромережі, кВт/житло;

N – кількість жител (квартир), приєднаних до вводу, лінії, ТП.

Розглянемо розрахунок електричних навантажень для 5-ти та 9-ти поверхових будівель з кількістю жител (квартир) 70 та 216 – відповідно, як представників типової забудови житлових кварталів країни. Згідно табл. 3.1 [1] питомі електричні навантаження основних електроспоживачів, що складаються

переважно побутовими електроприладами та освітленням, становлять 1,1 та 1,37 кВт/житло відповідно. До зазначених питомих електричних навантажень згідно ДБН В.2.5-23:2025 [1] не включено електричні водонагрівачі, варильні, нагрівальні поверхні, електроопалення та інші потужні приймачі, які широко впроваджуються упродовж останніх років у зв'язку з дестабілізацією роботи систем централізованого енергозабезпечення будівель житлового сектора, зокрема, опалення, гарячого водопостачання, газопостачання тощо. Таким чином, розрахункове навантаження групи жител для досліджуваних типів будівель складатиме 77 кВт (будівля 5 поверхів, 70 квартир), та 295,92 кВт (будівля 9 поверхів, 216 квартир).

Електроспоживання дрібною побутовою технікою визначається переважно середнім добробутом домогосподарств, побутовими звичками та традиціями і згідно даних [30] при аналізі електричних навантажень значної кількості будівель житлової забудови відповідають нормативним значенням, визначеним ДБН В.2.5-23:2025.

Водночас, спостерігається пошкодження й руйнування теплоелектроцентралей, теплових електростанцій та великих котельних системи централізованого опалення і гарячого водопостачання внаслідок застарілості обладнання й значного зносу, а також внаслідок ворожих атак на енергетичну інфраструктуру. Це призводить до вимушеного запровадження місцевого приготування гарячої води у проточних та об'ємних водонагрівачах з електричними ТЕНами, а також переходу на електроопалення. При цьому системи електроопалення можуть бути представлені електричними конвекторами, підлоговими та настінними електричними радіаторами з заповненням водою або іншими рідинами, системами електрична «тепла підлога» прямого нагрівання та з рідинним теплоносієм. Споживання електричної енергії в системах електроопалення прямо пов'язане з рівнем енергетичної ефективності будівель та рівнем автоматизації систем моніторингу та управління будівель (АСМУБ).

Чинна методика однозначно визначає питомі електричні навантаження. Для систем електроопалення прямої дії (ЕОПД), згідно з табл. Д.2 [1] питоме розрахункове навантаження складає 7,37 кВт/житло, і не враховує рівні ЕЕБ та АСМУБ. Для досліджуваних типів будівель навантаження ЕОПД становить 515,9 кВт для 5-поверхової будівлі (70 квартир), 1591,92 кВт для 9-поверхової будівлі (216 квартир).

Сумарне розрахункове навантаження освітлення загальнобудинкових приміщень визначається за формулою:

$$P_{\text{ос.заг.}} = (P_{\text{сх.кл.}} + P_{\text{л.хол.}} + P_{\text{кор.}} + P_{\text{вес.}}) + 0,5P_{\text{ін.}}$$

де $P_{\text{сх.кл.}}$, $P_{\text{л.хол.}}$, $P_{\text{кор.}}$, $P_{\text{вес.}}$ – розрахункові навантаження освітлення відповідно сходових кліток, ліфтових холів, коридорів, вестибулів, кВт;

$P_{\text{ін.}}$ – розрахункові навантаження освітлення сміттєвих камер, горищ, технічних просторів під підлогою, підвалів, колясочних тощо, кВт.

Потужність сучасних світлодіодних ламп, які встановлюються у МЗК становить 8-10 Вт. Для 5-ти поверхових будівель приймаємо, що потужність, яка припадає на 1 поверх становить 10 Вт/поверх, а для 9-ти поверхової будівлі – 25-30 Вт/поверх, враховуючи, що в типових 9-поверхівках передбачено не тільки сходові клітки, але ще й приквартирні тамбури, які переважно відокремлені в окремий освітлювальний простір. Також передбачено освітлення при вході до під'їзду ззовні та зсередини на рівні 20 Вт/під'їзд.

Тож сумарне розрахункове навантаження освітлення загальнобудинкових приміщень для 5-ти поверхових будівель (4 під'їзди) становить 0,28 кВт, а для 9-ти поверхової (2-під'їзний блок) – 1,74 кВт.

Іншими навантаженнями для зазначених будівель можна знехтувати, оскільки будівлі старої забудови проєктувались без ліфтових холів, коридорів, вестибулів, тощо. Для деяких будівель, розміщених у віддалених мікрорайонах та на узвишшях, характерним є розміщення насосного підкачувального

устаткування для створення необхідних рівнів тиску у гідравлічних мережах різного призначення. Проте, таке енергоспоживання не є визначальним при проектуванні житлових кварталів і мікрорайонів. Основні гідравлічні мережі проектуються, як правило, із забезпеченням необхідних рівнів тиску в гідравлічних мережах 5-ти та 9-поверхової житлової забудови без додаткового підкачування або з підвищувальними насосними станціями для подолання гідростатичного тиску, обумовленого перепадами висот рельєфу. Потужні підвищувальні насосні станції забезпечують підтримання тиску одразу в кількох будівлях або навіть кварталах, а прибудинкові підкачувальні насосні станції є характерними для житлових будівель понад 10 поверхів, які не входять до досліджуваної групи будівель.

Розрахункове навантаження силових електроприймачів житлового будинку, приведене до вводу кабельної лінії живлення будинку або шин розподільного пристрою КТП напругою 0,4 кВ, визначається за формулою [1]:

$$P_{\text{сил}} = \sum_1^n P_{\text{л}} K_{\text{поп}_{\text{л}}} + \sum_1^n P_{\text{сан}} K_{\text{поп}_{\text{сан}}},$$

де $P_{\text{л}}$ – встановлена потужність електродвигуна кожного з ліфтів за паспортом, кВт;

$K_{\text{поп}_{\text{л}}}$ – коефіцієнт попиту для будинків з ліфтами, що визначається за таблицею 3.5 [3] залежно від кількості ліфтових установок та кількості поверхів будинку;

$P_{\text{сан}}$ – встановлена потужність кожного електродвигуна сантехнічних установок за їх паспортами, кВт;

$K_{\text{поп}_{\text{сан}}}$ – коефіцієнт попиту для електродвигунів сантехнічних установок, що визначається за таблицею 3.11 [1].

Потужність електродвигуна ліфтової установки для 9-поверхового житлового будинку старої забудови на 6 під'їздів зазвичай становить близько 5,5 кВт. Коефіцієнт попиту згідно табл. 3.5 [1] становить 0,9. Розрахункове

навантаження силових струмоприймачів 9-ти поверхового житлового будинку становить 29,7 кВт.

Для 5-ти поверхової будівлі встановлення ліфтових установок не передбачається проектами, тому це навантаження не враховується для даного типу будинків.

Для визначення сумарного навантаження будівлі достатньо просумувати усі значення навантажень.

$$P_{\Sigma} = P_{жН(буд.ж)} + P_{сил} + P_{оп} + P_{ГВП} + P_{ос.заг},$$

де $P_{жН(буд.ж)}$ – споживана потужність квартирами (житлами), кВт;

$S_{сил}$ – споживана потужність силовими струмоприймачами, кВА;

$S_{оп}$ – споживана потужність системою опалення, згідно додатку Д [1], кВА;

$S_{ГВП}$ – споживана потужність системою гарячого водопостачання (ГВП), згідно додатку Д [1], кВА;

$S_{ос.заг}$ – споживана потужність системою освітлення місць загального користування (МЗК), кВА.

Отже, навантаження для 5-ти поверхової будівлі становить 593,18 кВт, для 9-ти поверхової – 1919,28 кВт.

Врахування класу ЕЕБ, рівнів АСМУБ та типу джерела енергії дозволяє відійти від єдиного для всіх будівель значення питомих електричних навантажень ЕОПД. Так, вимоги до енергетичної ефективності будівель різних класів, визначені Наказом Міністерства розвитку громад і територій №260 від 27.10.2020 [14], встановлюють граничні максимальні значення енергоспоживання систем опалення та охолодження будівель. З урахуванням того, що для більшості областей України доля енергоспоживання систем охолодження в загальному річному енергоспоживанні становить 1-3%, можемо ним знехтувати і вважати, що все річне енергоспоживання (в контексті розрахункової величини для визначення класу ЕЕБ) припадає на опалення. Таке допущення призводить

пропорційного до збільшення питомих електричних навантажень системи ЕОПД на 1-3%, сприяє підвищенню надійності роботи системи електропостачання житлової будівлі і в більшості випадків не призведе до зміни типорозмірів захисних апаратів та кабельно-провідникової продукції.

Підхід визначення питомих електричних навантажень системи опалення з урахуванням класів енергетичної ефективності будівель дозволяє визначити максимальне граничне електроспоживання систем опалення, для різних класів ЕЕБ в температурних і кліматичних умовах областей України. Даний підхід може бути застосований для будівель з системами опалення, які використовують електричну енергію в якості основного джерела енергії (ТЕНи, електродіодні, конвектори, радіатори, плівкові електричні нагрівачі тощо).

Загальні розрахункові електричні навантаження будівлі та в розрізі за окремими складовими наведено у таблиці 3.1. Врахування фактичного класу енергетичної ефективності будівель дозволяє уточнити електричні навантаження системи опалення. Інші навантаження залишаються не змінними та визначаються згідно ДБН В.2.5-23:2025 [1].

Для порівняння розглянуто три варіанти експлуатації та оснащення будівель: існуючий стан будинку, що відповідає найнижчому класу ЕЕ (клас «G»), модернізована будівля, що відповідає мінімальним вимогам (клас «C») з електроопаленням прямої дії (табл. 27).

Таблиця 27 – Розрахункові навантаження будівель

	Навантаження житлової 5-ти поверхової будівлі:			Навантаження житлової 9-ти поверхової будівлі:		
	за методикою	до модернізації (клас G)	після модернізації (клас C)	за методикою	до модернізації (клас G)	після модернізації (клас C)
$P_{жл}, \text{кВт}$	77,00	77,00	77,00	295,92	295,92	295,92
$P_{ос.заг.}, \text{кВт}$	0,28	0,28	0,28	1,74	1,74	1,74
$P_{сил}, \text{кВт}$	0	0	0	29,70	29,70	29,70
$P_{оп}, \text{кВт}$	515,90	329,70	219,80	1591,92	1017,36	678,24
$\Sigma, \text{кВт}$	593,18	406,98	297,08	1919,28	1344,72	1005,60
$\Delta, \text{кВт}$		186,20	296,10		574,56	913,68

При розрахунках потужності системи опалення враховано значення питомого електроспоживання для класу енергетичної ефективності «F» на рівні 4,71 кВт/житло для м. Дніпро (див. п. 2.4 табл. 19) та класу «C» – 3,14 кВт/житло. При визначенні навантаження системою кліматизації з ТН використано значення питомого електроспоживання для класу енергетичної ефективності «C» та середнє значення COP ТН на мінімальному рівні 2,5.

Аналіз отриманих результатів дозволяє встановити завищення розрахункових електричних навантажень у 2 рази для 5-ти поверхових та у 1,9 рази для 9-ти поверхових житлових будівель, які розташовані в м.Дніпро і пройшли комплексну термомодернізацію.

Для визначення перерізу ввідних кабелів виконаємо розрахунок струму на вводі в будівлю. Розрахункове значення струму на вводі в будівлю дозволяє визначити необхідний переріз кабелю, а також робочі струми для вибору захисної та комутаційної апаратури [43, 44].

Розрахункові струми на вводі будівлі визначаємо за формулою:

$$I_{розр} = \frac{P_{буд}}{U_{ном} \cos \varphi},$$

де $P_{\text{буд}}$ – потужність на вводі будівлі, кВА;

$U_{\text{ном}}$ – номінальна напруга мережі, кВ;

$\cos\varphi$ – коефіцієнт потужності.

Таблиця 28 – Розрахункові струми на вході у будівлю

	Навантаження житлової 5-ти поверхової будівлі:			Навантаження житлової 9-ти поверхової будівлі:		
	за методикою	до модернізації (клас G)	після модернізації (клас C)	за методикою	до модернізації (клас G)	після модернізації (клас C)
$P_{\text{буд}}$, кВт	593,18	406,98	297,08	1919,28	1344,72	1005,6
$U_{\text{ном}}$, кВ	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4	0,4
$\cos\varphi$	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96	0,96
$I_{\text{розр}}$, кА	1,54	1,06	0,77	5,00	3,50	2,62

Отримані результати дозволили встановити, що врахування фактичного класу ЕЕБ дозволяє зменшити значення розрахункових струмів на вводі будівлі у 1,46 та 1,43 рази для 5-ти та 9-ти поверхових будівель відповідно. Реалізація комплексу заходів з підвищення рівня енергетичної ефективності будівель і досягнення класу ЕЕБ рівня «С», що відповідає мінімальним вимогам чинного законодавства, забезпечує зменшення розрахункових струмів у 2 та 1,9 рази відповідно для зазначених будівель. При застосуванні енергоефективних технологій в системі кліматизації досягається зменшення розрахункових струмів на вводі в будівлю у 3,59 та 3,21 рази для 5-ти та 9-ти поверхових житлових будівель, розміщених у м.Дніпро.

Оцінимо зміни типорозміру ввідних кабельних ліній (КЛ). Для визначення необхідної кількості КЛ та їхнього перерізу використано стандартні таблиці з допустимим струмовим навантаженням для мідних кабелів (табл. 29).

Таблиця 29 – Струмові навантаження для мідних КЛ з ПВХ ізоляцією

Переріз, мм ²	Допустимий струм, А
95	260
120	300
150	340
185	390
240	465
300	540
400	640
500	730
630	830

Для визначення перерізу КЛ використано умову допустимого тривалого струму:

$$I_{\text{розр}} \leq I_{\text{доп}}$$

У випадку перевищення розрахунковим струмом на вводі у будинок значення допустимого струму на одну КЛ приймається паралельне прокладання кількох кабелів (табл. 30).

Таблиця 30 – Результати вибору КЛ

	Навантаження житлової 5-ти поверхової будівлі:			Навантаження житлової 9-ти поверхової будівлі:		
	за методикою	до модернізації	після модернізації	за методикою	до модернізації	після модернізації
$I_{\text{розр}}$, кА	1,54	1,06	0,77	5,00	3,50	2,62
$I_{\text{доп}}$, кА	1,62	1,08	0,83	5,11	3,65	2,92
К-сть КЛ	3	1	1	7	5	4
Переріз, мм ²	300	630	630	500	500	500

Отже, запропонована вдосконалена методика розрахунку електричних навантажень, яка враховує фактичний клас ЕЕБ та джерело системи опалення, дозволяє зменшити кількість і переріз кабельних ліній та підвищити ресурсоефективність системи електропостачання багатоквартирних житлових будинків з електроопаленням.

3 Вдосконалення методики визначення електричних навантажень

3.1 Обґрунтування показників, які мають бути враховані при проектуванні СЕП багатоквартирних будинків

Проектування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків є складним багатофакторним завданням, яке в сучасних умовах повинно враховувати не лише традиційні вимоги до надійності електропостачання, але й тенденції електрифікації житлового сектору, впровадження відновлюваних джерел енергії, автоматизованих систем керування будівлями та заходів із підвищення енергетичної ефективності. Традиційні методики визначення електричних навантажень, які базуються переважно на статистичних коефіцієнтах попиту та одночасності, були розроблені за умов значно меншого рівня електроспоживання і не враховують сучасних змін у структурі навантаження.

Важливим показником є енергетична характеристика будівлі, яка визначається класом її енергоефективності. Підвищення класу енергоефективності призводить до зменшення теплових втрат, скорочення необхідної теплової потужності та відповідно до зниження електричного навантаження теплових насосів і допоміжного обладнання. Таким чином, під час проектування СЕП доцільно враховувати не лише існуючий стан будівлі, а й перспективні заходи з термомодернізації, які можуть істотно змінити режими роботи систем електропостачання протягом усього життєвого циклу об'єкта [14, 45-48].

Аналіз методики розрахунку та проектування внутрішньобудинкових систем електропостачання дозволив встановити, що діюча методика не враховує теплофізичні характеристики будівлі, рівні АСМУБ, внутрішні та зовнішні теплонадходження, які в свою чергу формують клас енергетичної ефективності будівлі.

Питома норма розрахункового значення системи електроопалення прямої дії встановлена на рівні 7,37 кВт/житло. Чинний підхід передбачає встановлення

розрахункового навантаження системи електроопалення як сталої нормованої величини. Такий підхід не диференціює будівлі за класом енергетичної ефективності та не враховує зміну теплового навантаження внаслідок термомодернізації, використання систем автоматичного регулювання, теплонадходжень і кліматичних умов. Удосконалення підходу полягає у визначенні електричного навантаження системи опалення як змінної функції параметрів теплового балансу будівлі та показників енергетичної ефективності.

Під час визначення параметрів СЕП необхідно враховувати добові та сезонні графіки навантажень. На відміну від традиційного підходу, який орієнтується лише на максимальне розрахункове навантаження, сучасне моделювання передбачає аналіз погодинного електроспоживання протягом року. Це дозволяє більш точно визначити коефіцієнти використання встановленої потужності, коефіцієнти одночасності та попиту, оцінити тривалість роботи обладнання при різних рівнях навантаження і обґрунтувати оптимальні параметри трансформаторів, кабельних ліній та комутаційної апаратури.

Фактори які впливають на формування режиму роботи СЕП:

- теплотехнічні;
- кліматичні та режимні;
- енергетичні та технічні фактори системи опалення;
- фактори енергетичної ефективності та автоматизації.

До першої групи факторів належать площа та опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, площа вікон, орієнтація фасадів, герметичність будинку, повітрообмін, наявність утеплення, містки холоду, поверховість, опалювана площа та об'єм будинку. Зі зменшенням тепловтрат через огорожувальні конструкції та вентиляцію зменшується необхідна теплова потужність системи опалення, а отже – і електричне навантаження.

До другої групи факторів належать розрахункова температура зовнішнього повітря, середня температура опалювального періоду, тривалість опалювального періоду, добові коливання температури, температура внутрішнього повітря та температурний графік системи опалення.

Найбільше електричне навантаження формується за розрахункової мінімальної температури зовнішнього повітря. Річне електроспоживання, навпаки, значною мірою залежить від тривалості опалювального періоду та середньої температури зовнішнього повітря.

До третьої групи факторів належать: тип джерела тепла, коефіцієнт перетворення теплового насоса, ККД електрокотла, ефективність розподільчої мережі, втрати в трубопроводах, температура теплоносія, потужність циркуляційних насосів, робота приводів, систем керування та диспетчеризації.

Для теплового насоса важливим є те, що за зниження температури зовнішнього повітря одночасно зростає потреба будинку в теплі та знижується COP. Саме тому максимум електричного навантаження теплового насоса може бути значно вищим, ніж значення, визначене за середнім сезонним COP.

До четвертої групи факторів належать клас енергетичної ефективності, питома потреба в енергії на опалення, рівень термомодернізації, наявність автоматичного погодного регулювання, зонального регулювання, балансування системи, обліку енергії, дистанційного моніторингу та автоматизованого керування будівлею.

Клас енергетичної ефективності в моделі не розглядається як окремий технічний параметр обладнання. Він є інтегральним показником, який відображає сукупний вплив теплоізоляції, герметичності, вентиляції, ефективності інженерних систем та рівня керування енергоспоживанням.

3.2 Моделювання режимів роботи СЕП багатоквартирних будинків з електричним опаленням

На відміну від традиційних будинків із централізованим тепlopостачанням, використання електричного опалення призводить до суттєвого зростання електричного навантаження, зміни добових графіків споживання електроенергії та появи нових максимумів навантаження у холодний період року. Саме тому моделювання режимів роботи СЕП повинно враховувати

взаємозв'язок між тепловими та електричними процесами, кліматичними умовами, енергоефективністю будівлі та режимами роботи теплогенеруючого обладнання [49-51].

Аналіз електричних та теплових навантажень дозволяє змодельовати режим роботи системи електропостачання багатоквартирних будинків з електричним опаленням.

Графік електричних навантажень житлового багатоквартирного будинку визначено як відсоток від максимуму навантаження [52]. У другому розділі визначено, що максимальне навантаження побутових споживачів 5-ти поверхової житлової будівлі становить 77 кВт. Відносно цього значення побудовано добовий графік електричних навантажень для житлової будівлі.

Таблиця 31 – Добові значення ГЕН для типових житлових багатоквартирних будинків

Об'єкт	Години доби / Електричне навантаження											
	00:00-01:00	01:00-02:00	02:00-03:00	03:00-04:00	04:00-05:00	05:00-06:00	06:00-07:00	07:00-08:00	08:00-09:00	09:00-10:00	10:00-11:00	11:00-12:00
Житловий будинок із газовими плитами, % від максимуму	30	20	18	15	15	15	32	50	35	20	25	30
Житловий будинок із газовими плитами, потужність споживачів, кВт	23,1	15,4	13,86	11,55	11,55	11,55	24,64	38,5	26,95	15,4	19,25	23,1

продовження табл. 31

Об'єкт	Години доби / Електричне навантаження											
	12:00-13:00	13:00-14:00	14:00-15:00	15:00-16:00	16:00-17:00	17:00-18:00	18:00-19:00	19:00-20:00	20:00-21:00	21:00-22:00	22:00-23:00	23:00-24:00
Житловий будинок із газовими плитами, % від максимуму	28	25	28	30	35	40	55	70	85	100	70	40
Житловий будинок із газовими плитами, потужність споживачів, кВт	21,56	19,25	21,56	23,1	26,95	30,8	42,35	53,9	65,45	77	53,9	30,8



Рисунок 13 – Добовий ГЕН для житлових багатоквартирних будинків

На рис. 14 наведено приклад результатів моделювання добового режиму роботи системи електропостачання багатоквартирного будинку з електричним опаленням. Аналіз графіків показує характерну взаємодію між побутовим електроспоживанням, навантаженням системи опалення та сумарним електричним навантаженням будівлі.

Для фактичного графіку електричних навантажень визначено середню розрахункову потужність. Якщо лінеаризувати ГЕН та забезпечувати гнучкість споживання за рахунок регулювання споживання системи опалення, при максимальних навантаженнях побутовими споживачами, можна досягти вирівнювання графіку та зменшити навантаження на елементи електричної мережі. Для забезпечення рівномірного споживання, запропоновано закон управління системою опалення багатоквартирної будівлі, який формується з урахуванням особливостей ГЕН побутових споживачів та очікуваних добових коливань зовнішньої температури. За рахунок формування інверсного до базового ГЕН профілю навантажень електроопалення досягається лінеаризація ГЕН системи електропостачання будівлі та зменшення розрахункових

електричних навантажень відносно нормативного значення в діапазоні 0,69-1,00 залежно від класу енергетичної ефективності будівель.

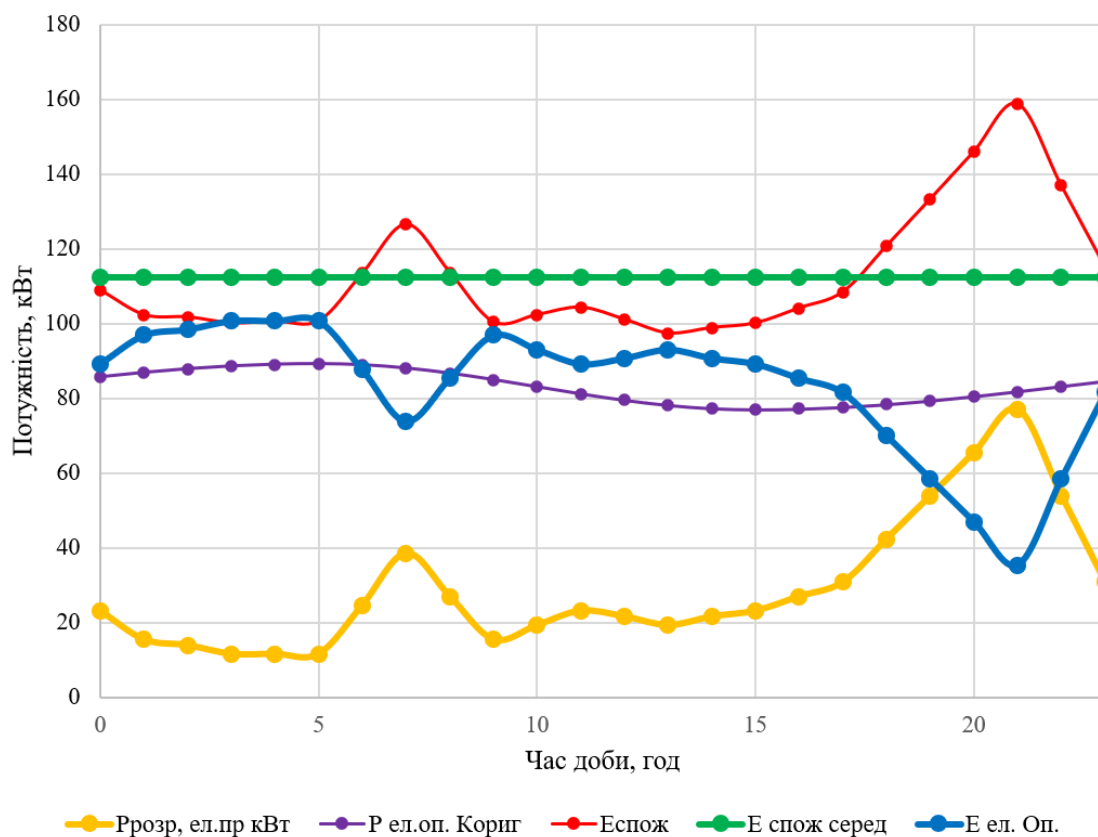


Рисунок 14 – Потужність системи електропостачання будівлі з урахуванням особливостей режиму електроспоживання

Тому, шляхом моделювання графіків електричних та теплових навантажень для багатоповерхових будівель в умовах усіх обласних центрів було встановлено коригуючі коефіцієнти для розрахункового навантаження в залежності від класу енергетичної ефективності (табл. 32). Коригуючий коефіцієнт було встановлено як відношення середнього значення навантаження до максимального пікового значення.

Таблиця 32 – Коефіцієнти коригування розрахункового навантаження в залежності від класу енергетичної ефективності для всіх регіонів України

Клас ЕЕ	Коефіцієнт коригування розрахункового навантаження
A	0,69
B	0,77
C	0,80
D	0,82
E	0,84
F	0,85
G	1,00

При моделюванні режимів роботи систем електроопалення багатоквартирних житлових будинків було встановлено, що розрахункова теплова потужність джерела енергозабезпечення, визначена за максимальними тепловими навантаженнями відповідно до чинних нормативних методик, не забезпечує підтримання нормативного температурного режиму внутрішніх приміщень при переході до лінеаризованого графіка електричних навантажень. Така ситуація обумовлена тим, що традиційний підхід до визначення встановленої потужності орієнтований на статичні розрахункові умови і не враховує динаміку зміни теплових навантажень, інерційність огорожувальних конструкцій будівлі, зміну коефіцієнта перетворення теплових насосів, а також добову нерівномірність електроспоживання.

Під час проведення чисельного моделювання було виконано аналіз погодинних режимів роботи систем електроопалення для житлових будинків, розташованих у всіх обласних центрах України. Для кожного регіону було сформовано річні графіки теплових навантажень на основі нормативних кліматичних параметрів та відповідних температурних рядів, після чого виконано їх перетворення до лінеаризованих графіків із постійним рівнем електричної потужності, що відповідає середньому значенню навантаження за опалювальний період. Такий підхід дозволяє суттєво вирівняти графік електроспоживання, зменшити максимальні навантаження на систему

електропостачання та забезпечити більш стабільний режим роботи теплогенеруючого обладнання.

Разом із тим результати моделювання показали, що використання середнього значення потужності без її коригування призводить до дефіциту теплової енергії у найбільш холодні періоди опалювального сезону. У цей час теплова інерція будівлі вже не здатна компенсувати нестачу теплової потужності, що викликає поступове зниження температури внутрішнього повітря нижче нормативних значень. Аналіз результатів моделювання показав, що для забезпечення безперервного підтримання нормативної температури приміщень необхідно збільшити встановлену потужність джерела теплопостачання відносно її середнього значення.

За результатами моделювання для всіх кліматичних регіонів України встановлено, що оптимальне збільшення встановленої потужності становить 16 %. Дане значення отримано не емпірично, а як результат статистичної обробки результатів моделювання режимів роботи систем електроопалення. Для кожного регіону визначалося мінімальне збільшення потужності, яке забезпечувало відсутність дефіциту теплової енергії протягом усього опалювального сезону при роботі за лінеаризованим графіком навантаження. Подальше усереднення отриманих результатів дозволило встановити універсальне значення коефіцієнта запасу, що становить 1,16 від розрахункової середньої потужності.

Запропоноване збільшення потужності не слід розглядати як традиційний резерв обладнання. На відміну від нормативного запасу, який закладається для компенсації можливих похибок розрахунків або перспективного збільшення навантаження, величина 16 % є компенсацією втрат ефективності, що виникають при переході від змінного графіка теплового навантаження до його лінеаризованого представлення. Таким чином, фактично здійснюється компенсація часової нерівномірності теплового навантаження, а не створення додаткового резерву потужності.

Збільшення встановленої потужності джерела теплопостачання на 16 % також має важливе практичне значення при проєктуванні систем

електропостачання. Воно дозволяє більш коректно визначити номінальну потужність теплових насосів, електричних котлів або комбінованих теплогенеруючих установок. При цьому використання саме усередненого коефіцієнта 1,16 забезпечує уніфікацію проєктних рішень незалежно від кліматичних особливостей конкретного регіону та виключає необхідність індивідуального підбору коефіцієнтів запасу для кожного об'єкта. Результати моделювання підтверджують, що при проєктуванні систем електропостачання багатоквартирних будинків з електричним опаленням недостатньо використовувати лише нормативні коефіцієнти попиту та одночасності. Значно точніші результати забезпечує погодинне моделювання режимів роботи, яке дозволяє врахувати зміну температури зовнішнього повітря, особливості експлуатації будівлі, режими роботи теплових насосів, внутрішні теплонадходження, рівень автоматизації систем управління будівлею та поведінку мешканців.

Застосування такого підходу дозволяє оптимізувати встановлену потужність обладнання систем електропостачання, зменшити перевантаження мереж у години максимального навантаження, забезпечити необхідний рівень надійності електропостачання та створити умови для ефективної інтеграції дахових фотоелектричних станцій і систем накопичення електроенергії.

Таким чином, виконані дослідження дозволили обґрунтувати доцільність застосування коефіцієнта підвищення потужності джерела енергозабезпечення 1,16, який є результатом комплексного моделювання режимів роботи систем електроопалення багатоквартирних житлових будинків у кліматичних умовах усіх регіонів України. Використання такого коефіцієнта забезпечує підтримання нормативного температурного режиму при роботі системи за лінеаризованим графіком електричних навантажень, мінімізує ризик дефіциту теплової потужності та одночасно не призводить до необґрунтованого завищення встановленої потужності обладнання і параметрів систем електропостачання. Це дозволяє рекомендувати застосування зазначеного коефіцієнта як одного з

проектних параметрів при розрахунку систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків із електричним опаленням.

3.3 Визначення потужності джерела електроопалення

Одним із ключових етапів проектування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків із електричним опаленням є визначення необхідної встановленої потужності джерела тепlopостачання [53]. Від правильності її визначення залежить не лише забезпечення нормативного температурного режиму приміщень протягом усього опалювального сезону, а й вибір основного електротехнічного обладнання, параметрів внутрішніх електричних мереж, трансформаторних підстанцій, систем автоматичного керування та економічна ефективність експлуатації будівлі.

Традиційні методики визначення потужності джерела тепlopостачання базуються переважно на максимальних теплових втратах будівлі при розрахунковій температурі зовнішнього повітря. Такий підхід забезпечує надійність роботи системи, однак не враховує значну кількість факторів, що впливають на фактичне теплове навантаження сучасних житлових будинків. Зокрема, залишаються поза увагою рівень автоматизації систем керування, клас енергетичної ефективності будівлі, внутрішні та зовнішні теплонадходження, зміна кліматичних умов протягом року, а також особливості режимів роботи теплових насосів та інших джерел електроопалення.

Запропонований метод визначення потужності джерела електроопалення базується на комплексному врахуванні всіх основних складових теплового балансу будівлі (рис. 15).

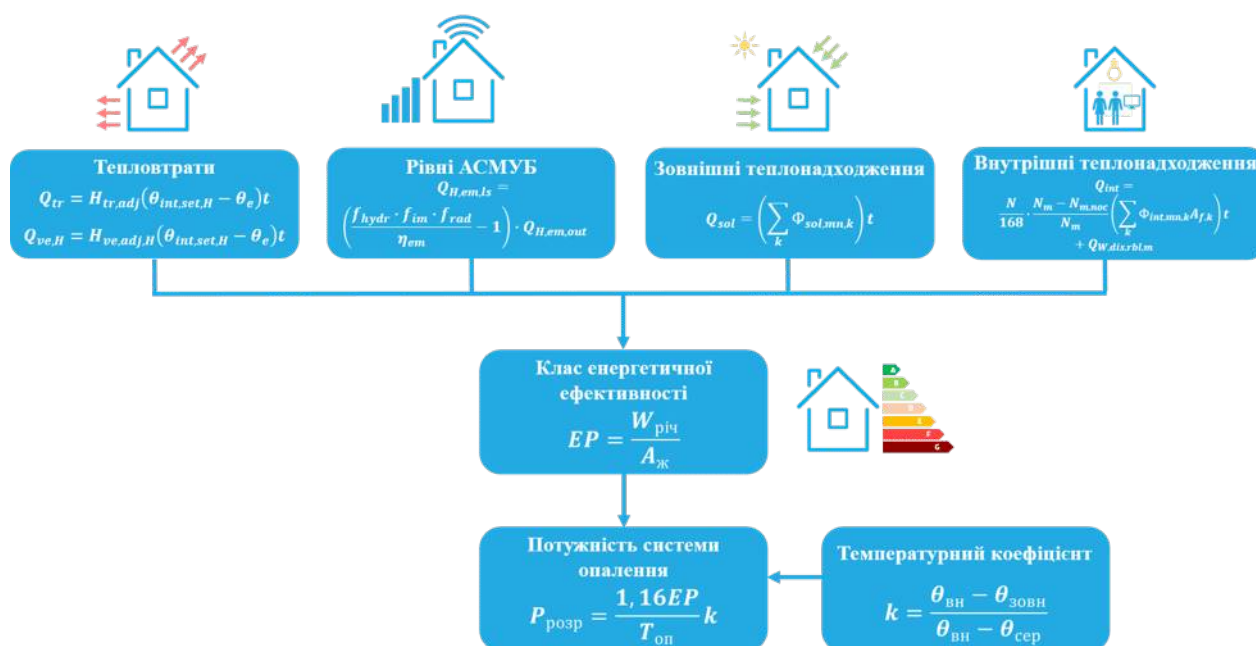


Рисунок 15 – Принцип визначення потужності джерела системи опалення

На першому етапі визначаються тепловтрати через огорожувальні конструкції та вентиляцію, які є базовою складовою теплового навантаження. Саме вони визначають мінімально необхідну кількість теплоти для підтримання нормативної температури внутрішнього повітря за відсутності будь-яких додаткових теплонадходжень. При цьому тепловтрати розраховуються відповідно до чинних нормативних документів з урахуванням характеристик зовнішніх конструкцій, площі будівлі, кратності повітрообміну та розрахункових кліматичних параметрів.

Наступним етапом враховуються можливості сучасних автоматизованих систем моніторингу та управління будівлею (АСМУБ). Використання інтелектуальних систем керування дозволяє оптимізувати роботу систем опалення шляхом погодозалежного регулювання, програмного керування температурою приміщень, зонального розподілу теплових потоків та адаптивного керування теплогенеруючим обладнанням. У результаті фактичне теплове навантаження зменшується без погіршення умов теплового комфорту. При цьому величина зменшення залежить від рівня автоматизації будівлі, який визначається відповідно до вимог чинних нормативних документів.

Важливим фактором є врахування зовнішніх теплонадходжень від сонячної радіації. Протягом значної частини опалювального сезону сонячні теплоприпливи можуть компенсувати частину теплових втрат, особливо для будівель із великими площами застління та правильною орієнтацією фасадів. Їх величина визначається залежно від кліматичних умов регіону, орієнтації будівлі за сторонами світу, площі світлопрозорих конструкцій, коефіцієнтів пропускання сонячної енергії та тривалості сонячного опромінення.

Крім зовнішніх факторів, суттєву роль відіграють внутрішні теплонадходження, які формуються за рахунок перебування людей у приміщеннях, роботи побутових електроприладів, освітлення, кухонного обладнання та інших джерел теплоти. Для сучасних багатоквартирних будинків частка внутрішніх теплонадходжень може становити до 15-25 % від загального теплового навантаження у перехідні періоди року, що дозволяє суттєво зменшити необхідну встановлену потужність системи електроопалення.

Особливе місце у запропонованій методиці займає врахування класу енергетичної ефективності будівлі. На відміну від традиційних методів, де потужність джерела визначається виключно за тепловими втратами, запропонований підхід використовує річне питоме енергоспоживання будівлі як інтегральний показник її енергетичних характеристик. Клас енергоефективності враховує результати всіх виконаних заходів з термомодернізації, включаючи утеплення огорожувальних конструкцій, модернізацію вікон, вентиляції, систем гарячого водопостачання та інженерного обладнання. Це дозволяє перейти від оцінювання окремих теплотехнічних параметрів до комплексної характеристики енергетичного стану будівлі.

Потужність системи опалення формується з урахуванням класу енергетичної ефективності, тривалості періоду опалення та температурного режиму. Запропонований принцип дозволяє враховувати не тільки нормативно затвердженні значення періоду опалення й температур, а й перерахувати значення з урахуванням фактичних тривалостей та температур. Такий підхід вносить точність у розрахунки та вибір обладнання.

На основі отриманого значення питомого річного енергоспоживання визначається середня теплова потужність системи опалення протягом опалювального сезону. При цьому враховується тривалість опалювального періоду для конкретного регіону та вводиться температурний коефіцієнт, який дозволяє адаптувати розрахунок до поточних кліматичних умов. Температурний коефіцієнт характеризує співвідношення між фактичною температурою зовнішнього повітря та її середнім значенням за опалювальний період і забезпечує можливість оперативного визначення необхідної потужності джерела електроопалення залежно від погодних умов.

Відмінною особливістю запропонованої методики є використання коефіцієнта 1,16, який множиться на середню розрахункову потужність системи опалення. Значення цього коефіцієнта не є нормативним запасом потужності або емпірично прийнятою величиною. Воно отримане за результатами комплексного моделювання режимів роботи систем електроопалення багатоквартирних будинків у кліматичних умовах усіх регіонів України. Під час дослідження для кожного обласного центру були сформовані погодинні графіки теплових навантажень, після чого виконувалося їх перетворення до лінеаризованих графіків із постійним значенням потужності. Аналіз показав, що використання лише середнього значення потужності призводить до недостатнього тепловиділення у періоди найбільш низьких температур зовнішнього повітря. У результаті виникає дефіцит теплової енергії, який поступово накопичується через теплову інерційність будівлі та призводить до відхилення температури внутрішнього повітря від нормативних значень.

Для компенсації цього ефекту було визначено мінімальне додаткове збільшення встановленої потужності, яке забезпечує підтримання нормативної температури в усіх регіонах України без переходу до використання змінної потужності джерела теплопостачання. Усереднення результатів моделювання дозволило встановити раціональне значення коефіцієнта 1,16, що відповідає збільшенню встановленої потужності на 16 %. Проведений аналіз також показав, що менші значення коефіцієнта не забезпечують необхідного температурного

режиму у найхолодніші періоди року, тоді як подальше збільшення потужності практично не покращує умови експлуатації, але призводить до необґрунтованого збільшення капітальних витрат на теплогенеруюче обладнання та елементи систем електропостачання.

Таким чином, остаточна потужність джерела електроопалення визначається як функція класу енергетичної ефективності будівлі, тривалості опалювального періоду, температурних умов експлуатації та встановленого коефіцієнта 1,16, що враховує результати математичного моделювання режимів роботи систем електроопалення. Запропонований підхід дозволяє комплексно врахувати всі основні фактори, що впливають на формування теплового навантаження, забезпечити підтримання нормативного температурного режиму, оптимізувати встановлену потужність джерела теплопостачання та підвищити ефективність проєктування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків в умовах широкого впровадження електрифікованих систем опалення.

3.4 Алгоритм визначення раціональної потужності СЕП

Розроблений алгоритм визначення раціональної потужності системи електропостачання багатоквартирного житлового будинку базується на комплексному врахуванні теплотехнічних характеристик будівлі, кліматичних умов експлуатації, рівня автоматизації, енергетичної ефективності та режимів роботи електроопалення. На відміну від традиційних методик, які визначають необхідну потужність лише за встановленими питомими електричними навантаженнями або максимальними тепловими втратами, запропонований алгоритм дозволяє перейти до визначення раціональної встановленої потужності, яка забезпечує нормативний температурний режим при мінімальних капітальних витратах та високій енергоефективності системи.

Викладена вище методика може бути представлена наступним алгоритмом, який наведений на рис. 16. Запропонований алгоритм враховує методи

визначення енергоспоживання системи кліматизації за ДСТУ 9190:2021 зважаючи на фактичний стан будівлі.

У чинному підході до проектування систем електропостачання житлових будинків навантаження електроопалення приймається як стала величина, що не враховує фактичні теплотехнічні характеристики будівлі, клас її енергетичної ефективності, кліматичні умови, тип системи опалення та рівень автоматизації. Запропонована модель передбачає заміну сталої величини електричного навантаження функціональною залежністю, сформованою на основі теплового балансу будівлі.

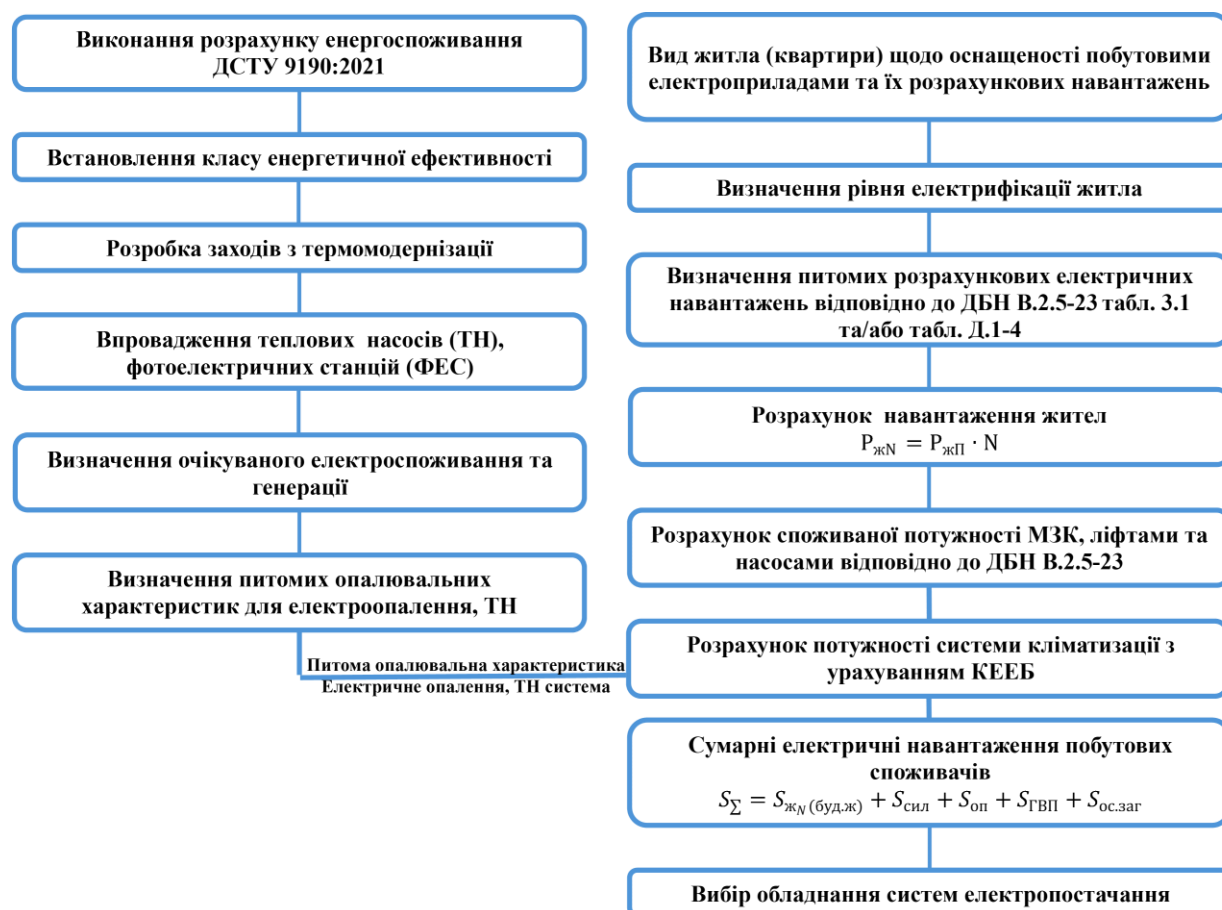


Рисунок 16 – Алгоритм визначення потужності системи кліматизації

Першим етапом алгоритму є збір вихідної інформації про об'єкт дослідження. На цьому етапі визначаються геометричні характеристики будівлі, її поверховість, кількість квартир, площа опалюваних приміщень, конструктивні

особливості огорожувальних конструкцій, характеристики інженерних систем, кліматичний район будівництва та нормативні параметри внутрішнього мікроклімату. Одночасно формується інформаційна база щодо фактичного або прогнозного електроспоживання житлового будинку.

Наступним етапом є розрахунок теплового балансу будівлі, який включає визначення тепловтрат через зовнішні огорожувальні конструкції, вентиляцію та інфільтрацію повітря. Одночасно визначаються внутрішні теплонадходження від мешканців, побутового обладнання та освітлення, а також зовнішні теплонадходження від сонячної радіації. Додатково враховується вплив рівня автоматизації систем моніторингу та управління будівлею (АСМУБ), який дозволяє зменшити необхідне теплове навантаження за рахунок оптимізації режимів роботи обладнання.

На третьому етапі визначається клас енергетичної ефективності будівлі відповідно до результатів енергетичної сертифікації або розрахункового річного енергоспоживання. Саме цей показник використовується як інтегральна характеристика будівлі, що враховує ефективність теплоізоляції, вентиляції, інженерних систем та інших заходів з термомодернізації.

Після визначення класу енергоефективності виконується розрахунок середньої потужності системи електроопалення. Для цього використовується річне енергоспоживання будівлі, тривалість опалювального періоду та температурний коефіцієнт, який враховує фактичні кліматичні умови конкретного регіону. Отримане значення характеризує середню необхідну теплову потужність протягом опалювального сезону.

Наступним етапом є коригування розрахункової потужності за результатами математичного моделювання режимів роботи систем електроопалення. Саме на цьому етапі враховується встановлений у роботі коефіцієнт 1,16, який був отриманий в результаті моделювання погодинних режимів роботи будівель у всіх кліматичних регіонах України. Використання цього коефіцієнта дозволяє компенсувати втрати ефективності, що виникають при переході до лінеаризованого графіка електричних навантажень, та

забезпечити підтримання нормативної температури внутрішнього повітря у найбільш несприятливі періоди опалювального сезону.

Після визначення необхідної потужності джерела електроопалення здійснюється моделювання режимів роботи системи електропостачання. На цьому етапі аналізуються погодинні графіки електроспоживання, визначаються максимальні та середні навантаження, коефіцієнти використання потужності, коефіцієнти попиту та одночасності, а також оцінюється вплив роботи теплових насосів, фотоелектричних станцій, накопичувачів електроенергії та інших джерел генерації.

Далі виконується розрахунок параметрів елементів системи електропостачання. На основі отриманих результатів визначаються необхідна потужність трансформаторної підстанції, перерізи кабельних ліній, параметри захисної апаратури, струми короткого замикання, втрати електроенергії та показники якості електроенергії. Одночасно перевіряється відповідність параметрів обладнання вимогам надійності та допустимим режимам експлуатації.

Після цього проводиться оцінювання енергетичної та економічної ефективності запропонованого технічного рішення. Аналізуються капітальні вкладення, експлуатаційні витрати, річне електроспоживання, економія енергетичних ресурсів, строк окупності заходів та можливість використання відновлюваних джерел енергії. У разі необхідності виконується ітераційне уточнення потужності джерела електроопалення або параметрів системи електропостачання.

Заключним етапом алгоритму є визначення раціональної потужності системи електропостачання, яка забезпечує виконання всіх технічних, енергетичних та економічних критеріїв. Раціональною вважається така потужність, яка гарантує підтримання нормативного температурного режиму приміщень протягом усього опалювального сезону, забезпечує необхідний рівень надійності електропостачання, мінімізує капітальні та експлуатаційні витрати, а

також створює умови для ефективної інтеграції сучасних систем автоматизації, теплових насосів, фотоелектричних станцій та систем накопичення енергії.

Таким чином, запропонований алгоритм відрізняється від існуючих методичних підходів комплексним урахуванням взаємозв'язку між тепловими та електричними режимами роботи будівлі, використанням показника енергетичної ефективності як основного критерію визначення потужності системи електроопалення та застосуванням коефіцієнта 1,16, отриманого за результатами математичного моделювання для всіх кліматичних регіонів України. Це дозволяє підвищити точність визначення розрахункових навантажень, уникнути необґрунтованого завищення встановленої потужності елементів СЕП і водночас забезпечити надійну та енергоефективну експлуатацію багатоквартирних житлових будинків.

Особливістю запропонованого алгоритму є диференційоване визначення електричного навантаження системи опалення житлового будинку залежно від класу енергетичної ефективності та параметрів теплового балансу. На відміну від чинного нормативного підходу, який передбачає прийняття навантаження електроопалення як сталої величини, запропонована модель враховує зміну теплових втрат, теплонадходжень, кліматичних умов, типу теплогенеруючого обладнання та рівня автоматизації. Це забезпечує підвищення точності визначення розрахункових режимів систем електропостачання житлових будинків у процесі їх проєктування та термомодернізації.

4 Впровадження дахових ФЕС для досягнення показників кліматичної нейтральності

4.1 Моделювання режимів генерації дахових ФЕС

У сучасних умовах енергодефіциту, який спричинений ворожими атаками на енергетичну інфраструктуру країни, постає питання у децентралізації систем енергопостачання. Тому, все більшого застосування набувають локальні дахові фотоелектричні станції (ФЕС). Таке рішення у поєднанні з накопичувачами електроенергії дозволяє забезпечувати безперебійне живлення критично важливих інженерних мереж при тривалих відключеннях електроенергії та підвищувати рівень енергетичної безпеки [54].

Для аналізу та оцінки режимів роботи дахової ФЕС промодельовано річну генерацію сонячними електростанціями потужністю 100 та 175 кВт в умовах м. Дніпра за допомогою спеціалізованого програмного забезпечення PV Syst, що дозволяє врахувати особливості місцевості при раціонально заданому напрямку та куті встановлення фотоелектричних модулів (рис.17).

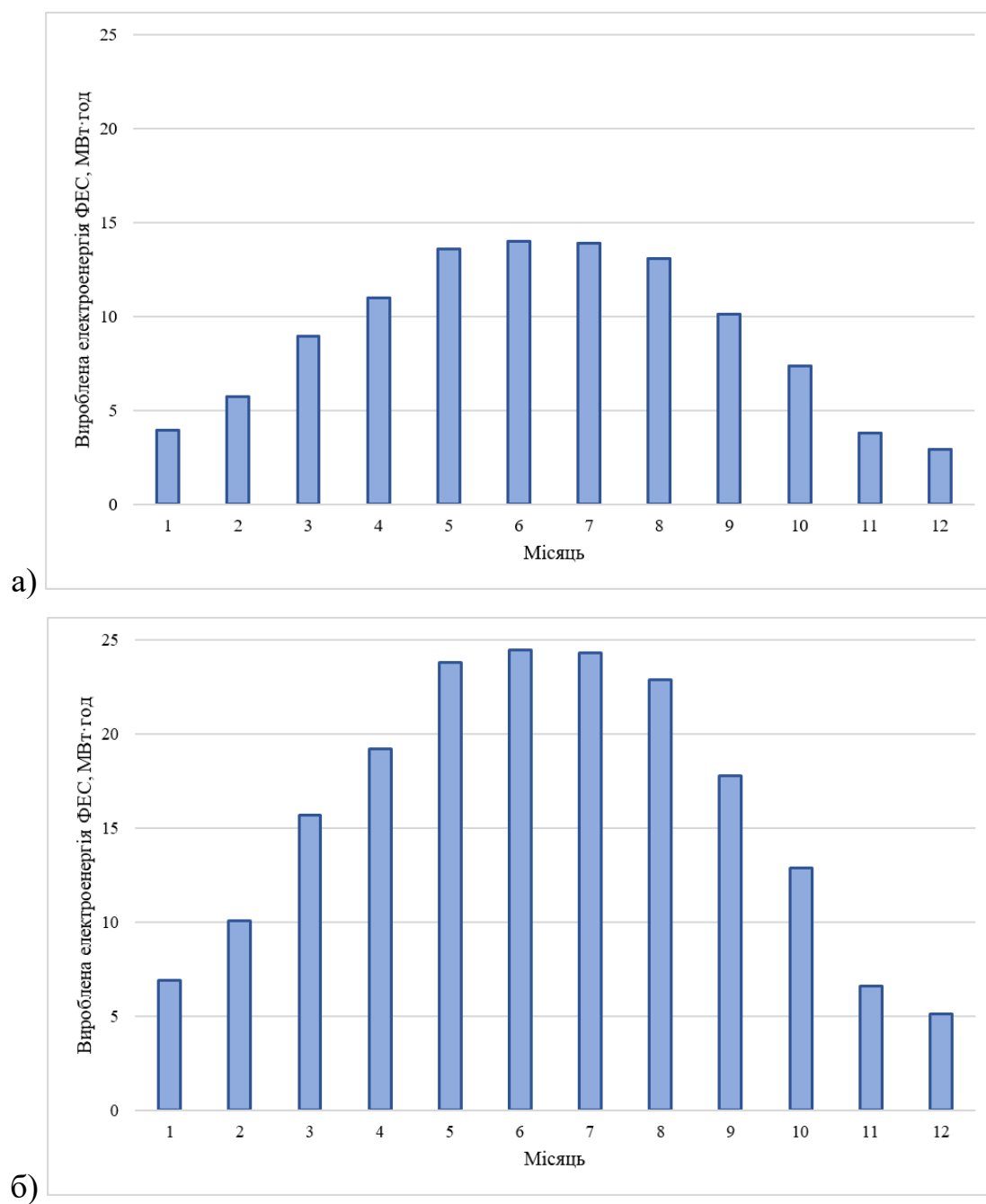


Рисунок 17 – Річна генерація ФЕС

а) 100 кВт для 9-ти поверхової будівлі;

б) 175 кВт для 5-ти поверхової будівлі.

Таблиця 33 – Річне значення генерації даховою ФЕС для 9-ти та 5-ти поверхових будівель

Місяць	Енергія згенерована ФЕС потужністю 100 кВт, МВт·год	Енергія згенерована ФЕС потужністю 175 кВт, МВт·год
1	3,957	6,925
2	5,751	10,065
3	8,959	15,678
4	10,981	19,217
5	13,594	23,790
6	13,973	24,453
7	13,903	24,330
8	13,062	22,859
9	10,142	17,749
10	7,368	12,894
11	3,775	6,606
12	2,920	5,110
Σ	108,385	189,674

Моделювання режимів роботи ФЕС дозволило встановити, що річна генерація становить 108 та 189 МВт·год для типових 9-ти та 5-ти поверхових будівель відповідно. Очевидно, що виробленої енергії станцією не вистачить для покриття усіх потреб будинку ні в річному обсязі, ні помісячно. Тому розглядаються окремі інженерні мережі будівель, які б ці станції могли забезпечити. Для оцінки та встановлення спроможності ФЕС забезпечити енергоспоживання однієї з інженерних мереж будівлі, розглянуто споживання найбільш енерговитратної системи – системи кліматизації.

Проаналізовано чотири варіанти режимів споживання енергії системами енергозабезпечення будівель (рис. 18):

- при існуючому стані будівлі (клас «G»);
- при модернізації будівлі до мінімальних вимог (клас «C»);
- при використанні у модернізованій будівлі прямого електроопалення (опалення ТЕНами);
- при встановленні ТН у модернізовану будівлю до класу «C».

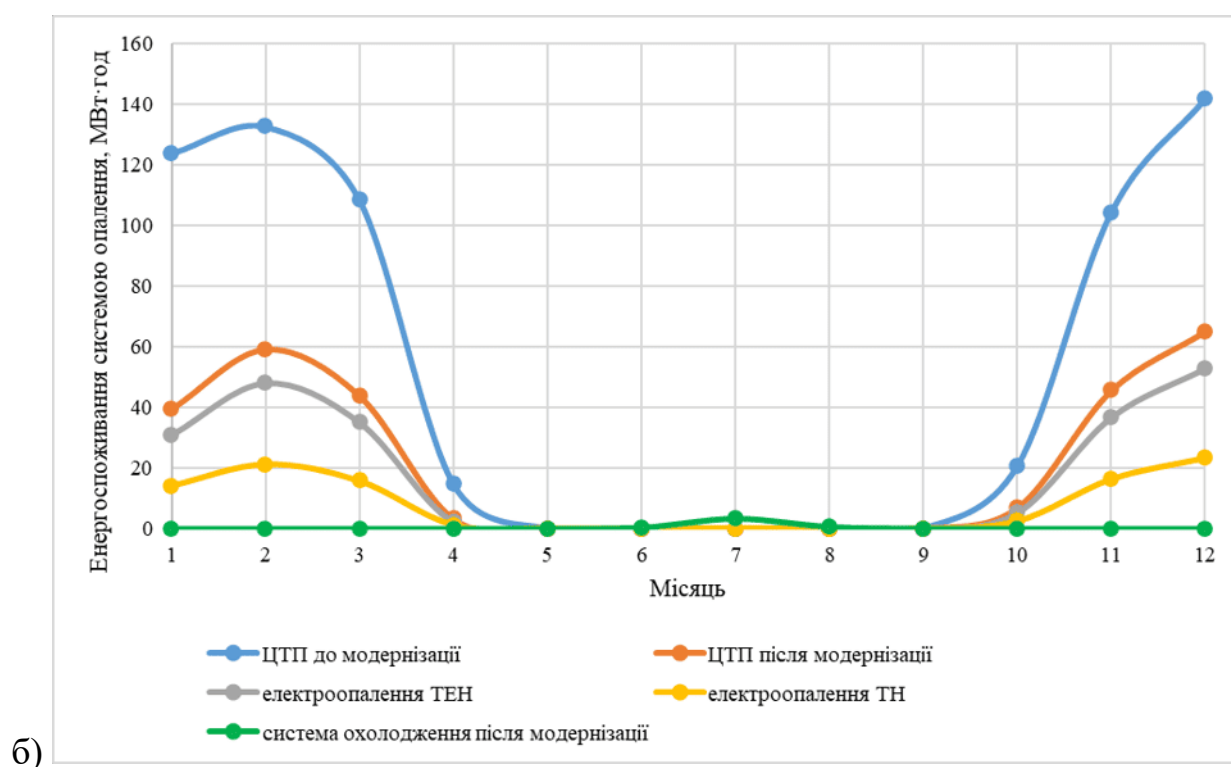
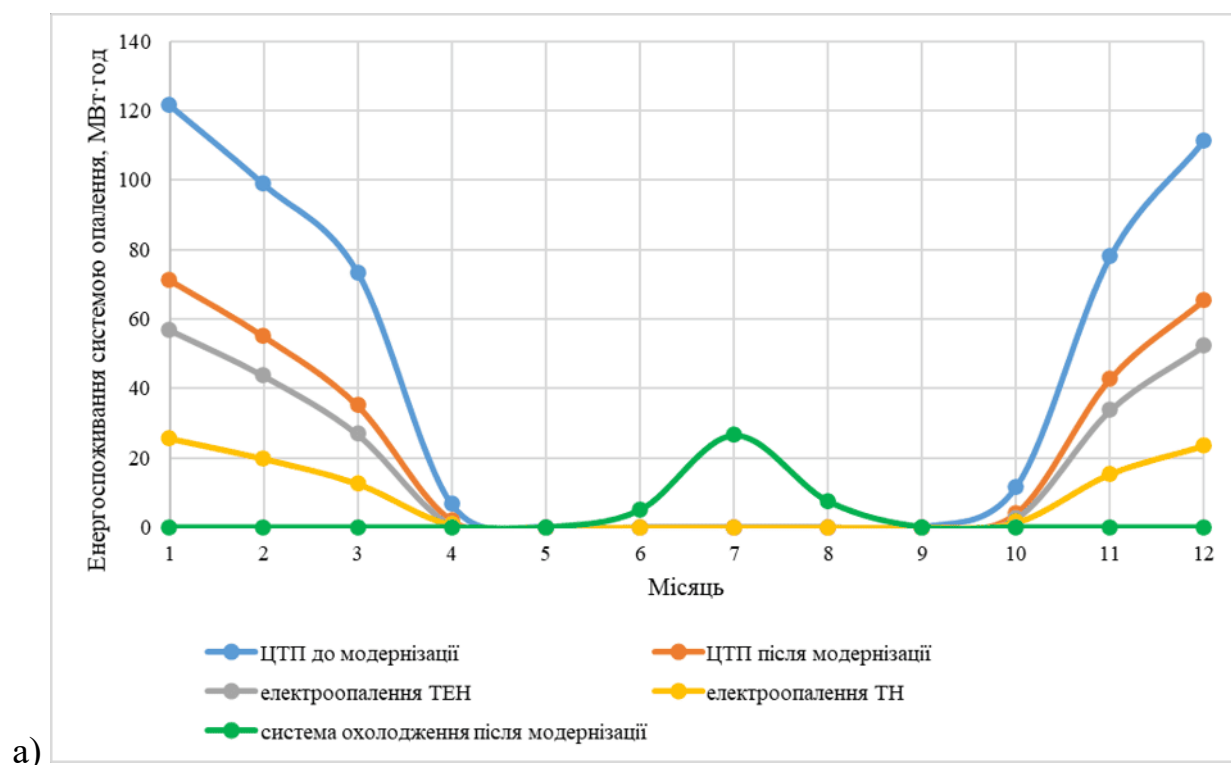


Рисунок 18 – Енергоспоживання системою кліматизації:

а) 9-ти поверховою будівлею;

б) 5-ти поверховою будівлею.

Таблиця 34 – Енергоспоживання системами енергозабезпечення 9-ти та 5-ти поверховими будівлями, МВт·год

9-ти поверхова будівля						
Місяць	ЦТП до модернізації	ЦТП після модернізації	ТЕН	ТН	Система охолодження	Генерація
січень	121,50	71,18	56,82	25,46	0,00	3,96
лютий	98,75	54,96	43,62	19,66	0,00	5,75
березень	73,33	35,01	26,77	12,52	0,00	8,96
квітень	6,56	1,96	0,67	0,70	0,00	10,98
травень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	13,59
червень	0,00	0,00	0,00	0,00	4,98	13,97
липень	0,00	0,00	0,00	0,00	26,55	13,90
серпень	0,00	0,00	0,00	0,00	7,51	13,06
вересень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	10,14
жовтень	11,60	4,01	2,63	1,43	0,00	7,37
листопад	77,83	42,74	33,70	15,29	0,00	3,78
грудень	111,27	65,43	52,28	23,41	0,00	2,92
Всього	500,83	275,30	216,49	98,47	39,04	108,39
5-ти поверхова будівля						
Місяць	ЦТП до модернізації	ЦТП після модернізації	ТЕН	ТН	Система охолодження	Генерація
січень	123,58	39,40	30,88	14,09	0,00	6,92
лютий	132,40	59,14	47,95	21,15	0,00	10,06
березень	108,26	43,85	35,08	15,68	0,00	15,68
квітень	14,51	3,18	2,28	1,14	0,00	19,22
травень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	23,79
червень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,35	24,45
липень	0,00	0,00	0,00	0,00	3,25	24,33
серпень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,62	22,86
вересень	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	17,75
жовтень	20,56	6,77	5,26	2,42	0,00	12,89
листопад	104,19	45,48	36,66	16,27	0,00	6,61
грудень	141,67	64,99	52,75	23,24	0,00	5,11
Всього	645,19	262,79	210,87	94,00	4,22	189,67

Аналізуючи отримані графіки на рис. 18 та значення у табл. 34, можемо сказати, що енергоспоживання системою опалення після модернізації зменшується у 2,5 рази, а при встановленні системи електроопалення з ТН – у 6,9

разів. В такому випадку, дахова ФЕС спроможна забезпечити систему електроопалення для 5-ти та 9-ти поверхових будівель, а в окремих випадках й систему охолодження для 5-ти поверхових будівель протягом року.

Отримані дані енергоспоживання системи опалення будівлі дозволяють помітити, що переведення будівлі на пряме електроопалення практично не призводить до зменшення енергоспоживання. В умовах тривалого воєнного вторгнення й руйнування об'єктів електроенергетичної інфраструктури таке переведення може бути вимушеною мірою, проте потребуватиме значної модернізації електроенергетичних мереж низькою напруги від будинкового до квартального рівня. При вимушеному переведенні на електроопалення цілих мікрорайонів така модернізація неминуче охопить міські розподільні мережі середніх класів напруги (6 – 10 – 35 кВ). До того ж централізовані системи опалення в якості джерел первинної енергії можуть використовувати різні види палива: природний газ, вугілля, дрова, пелети, паливні брикети тощо. Натомість перехід на електроопалення вимагає обов'язкового виробництва електричної енергії, що певною мірою звужує вибір і водночас потребує підвищених заходів щодо забезпечення резервування живлення споживачів.

Альтернативним методом, який дозволяє знизити споживання електричної енергії в системі опалення є використання теплових насосів [55-58]. При переході на теплонасосні системи опалення потребують модернізації внутрішньобудинкові опалювальні мережі. Розвиток компресорної техніки, теплообмінників та холодоагентів дозволяють досягати прийнятних показників сезонної ефективності теплових насосів повітря-повітря і повітря-вода за характерних погодних умов України. При цьому очікуване енергоспоживання систем опалення знижується у 2,8-3,2 рази порівняно з централізованим та прямим електроопаленням. Підвищенню показників енергозабезпеченості будівель може сприяти розміщення додатково дахових сонячних електростанцій з системами накопичення або без них і з гібридними інверторами. Це дозволить певною мірою убезпечити будівлю від тривалих відключень світла і також скомпенсує частину електричної енергії, яка буде споживатися тепловим

насосом упродовж опалювального сезону.

4.2 Передумови формування показників операційної та повної кліматичної нейтральності

Поняття кліматичної нейтральності визначається ЗУ «Про основні засади державної кліматичної політики» – стан, за якого загальний обсяг антропогенних викидів парникових газів дорівнює або компенсується загальним обсягом видалених парникових газів [59, 60].

Згідно з Паризькою кліматичною угодою, що була підписана 12 грудня 2015 року у м. Парижі на Двадцять першій Конференції Сторін Рамкової конвенції Організації Об'єднаних Націй про зміну клімату, яка була підписана від імені України 22 квітня 2016 року у м. Нью-Йорку, з метою запобігання зміні клімату Україна зобов'язалась стримувати зростання глобальної середньої температури значно нижче 2° С понад доіндустріальні рівні і докладати зусилля з метою обмеження зростання температури до 1,5° С понад доіндустріальні рівні, визнаючи, що це суттєво знизить ризики та наслідки зміни клімату.

В рамках підписаної угоди, кожна країна-учасниця представила Національно визначений внесок (НВВ) щодо глобального реагування на зміну клімату. За результатами Першого НВВ Україна скоротила викиди CO₂ до 40% від рівня 1990 року. Проект Другого НВВ передбачає скорочення викидів до рівня 65%.

Станом на 2019 рік Україна скоротила викиди на 63%. Забруднення повітря до 2030 року повинно бути на рівні 1990 року, тобто скоротитись на 65%.

8 жовтня 2024 року Верховна рада ухвалила в другому читанні рамковий кліматичний закон № 11310. Він передбачає, що Україна має досягти кліматичної нейтральності до 2050 року шляхом поступового переходу на відновлювані джерела енергії, розвиток енергоефективних технологій та зменшення залежності від викопних видів палива, таких як вугілля та газ.

Кліматична або вуглецева нейтральність визначається обсягом небезпечних викидів в атмосферу, що не має перевищувати можливостей природи поглинути їх. Це концепція, яка передбачає досягнення нульових чистих викидів парникових газів, що сприяють глобальному потеплінню. Це означає, що кількість викидів вуглекислого газу (CO₂) та інших шкідливих газів повинна бути компенсована або зменшена до рівня, який не впливає на клімат.

Основними засадами для досягнення кліматичної нейтральності є:

- зменшення викидів шляхом впровадження чистих технологій та відновлюваних джерел енергії;
- підвищення енергоефективності. Використання енергії більш раціонально в різних секторах, таких як промисловість, транспорт і будівництво;
- збереження лісів та природних екосистем;
- компенсація викидів.

Щоб досягти поставлених цілей, 11 грудня 2019 року Європарламенті був представлений Європейський Зелений Курс (ЄЗК). Він затверджує рух до кліматично нейтрального європейського континенту у 2050 році. Основною метою Зеленого Курсу є перетворення Європи до 2050 року на перший кліматично-нейтральний континент.

Для долучення України до Європейського Зеленого Курсу, виконуються наступні кроки:

- було представлено проєкт Концепції «зеленого» енергетичного переходу України до 2050 року. Основною метою Концепції є досягнення частки електроенергії, виробленої з ВДЕ, до 70% через 30 років. Однак Україна проголосила про намір досягти кліматичної нейтральності у 2060 році, що на 10 років пізніше європейської цілі. У липні 2021 року Уряд затвердив нову ціль України – до 2030 року зменшити викиди парникових газів до 35% від рівня 1990 року.

- 13 серпня 2020 року Україна передала Єврокомісії позиційний документ щодо участі України у Зеленому Курсі. В ньому пропонується встановити регулярний діалог з ЄС щодо залучення України до розробки та реалізації

політик у рамках ЄЗК і розробити спільну Дорожню карту участі України у Європейському Зеленому Курсі.

- 6 жовтня 2020 року на саміті Україна-ЄС було підписано угоду “Кліматичний пакет для стабільної економіки в Україні” (CASE) на суму 10 млн євро, що мала сприяти фінансуванню проєктів з переходу до чистої і кліматично нейтральної економіки.

- у 2021 році РНБО України для протидії зміні клімату та адаптації до неї передбачила розробку та затвердження «Національного плану з енергетики та зміни клімату на період до 2030 року». План так і не прийнято.

Найбільшими споживачами енергії в Україні є промисловість та побутовий сектор. Зазвичай, надмірне споживання енергії припадає на кліматизацію будівель житлового та громадського секторів.

Для досягнення зеленого виробництва та кліматичної нейтральності у будівництві та промисловості, необхідно виконати низку умов, які спрямовані на зменшення викидів парникових газів, енергоефективність та збереження природних ресурсів.

Енергоефективність є головним аспектом для досягнення кліматичної нейтральності. Щодо житлового сектора, то для нього, в першу чергу, необхідно повести комплексну реновацію будівель задля досягнення мінімальних вимог рівня енергетичної ефективності.

Після проведення термомодернізації будівлі, клас енергетичної ефективності повинен досягати мінімум рівня «С».

У промислових секторах для переходу до кліматичної нейтральності важливо:

- енергоефективність виробничих процесів: впровадження сучасних технологій, які зменшують енергоспоживання;
- перехід з викопного палива на відновлювану енергію, зокрема, електричну енергію, вироблену фотоелектричними, вітровими станціями тощо;

- декарбонізація: впровадження низьковуглецевих технологій у виробництві, наприклад, використання водню або біопалива замість вугілля чи газу;

- захоплення та зберігання вуглецю (CCS): технології захоплення CO₂ з промислових процесів і його зберігання в підземних резервуарах або повторного використання;

- створення замкнутих циклів виробництва, коли відходи одного процесу стають ресурсом для іншого;

- переробка та повторне використання.

Окрім вище зазначених заходів, в будівництві та промисловості важливо проводити регулярні енергоаудити для виявлення можливостей покращення ефективності та використовувати сучасні системи моніторингу для контролю за викидами CO₂ та інших парникових газів.

Для досягнення кліматичної нейтральності необхідно виконувати вимоги національних і міжнародних стандартів енергоефективності, сертифікаційних систем, таких як LEED (Leadership in Energy and Environmental Design) та BREEAM (Building Research Establishment Environmental Assessment Method), що підтверджують екологічність будівель [53].

Також, одним із найважливіших аспектів є інтеграція відновлюваних джерел енергії у виробничі процеси та підключення до «зелених» енергомереж.

Якщо річна генерація сонячної електростанції компенсує річне електроспоживання теплового насоса, система опалення може вважатися операційно вуглецево нейтральною.

Комплексна термомодернізація будівель до досягнення мінімального рівня енергетичної ефективності з одночасною інтеграцією теплових насосів до систем кліматизації та встановленням дахових ФЕС дозволяє досягти показників операційної нейтральності на річному діапазоні для типових п'ятиповерхових житлових будівель в умовах середніх широт України [48, 60].

4.3 Оцінка умов досягнення кліматичної нейтральності для багатоквартирних будинків

Зважаючи на передумови формування кліматичної нейтральності об'єктами, проаналізовано та оцінено можливості багатоквартирних будинків досягати повної або часткової кліматичної нейтральності за рахунок впровадження комбінованої системи енергозабезпечення з даховою ФЕС (рис. 19).

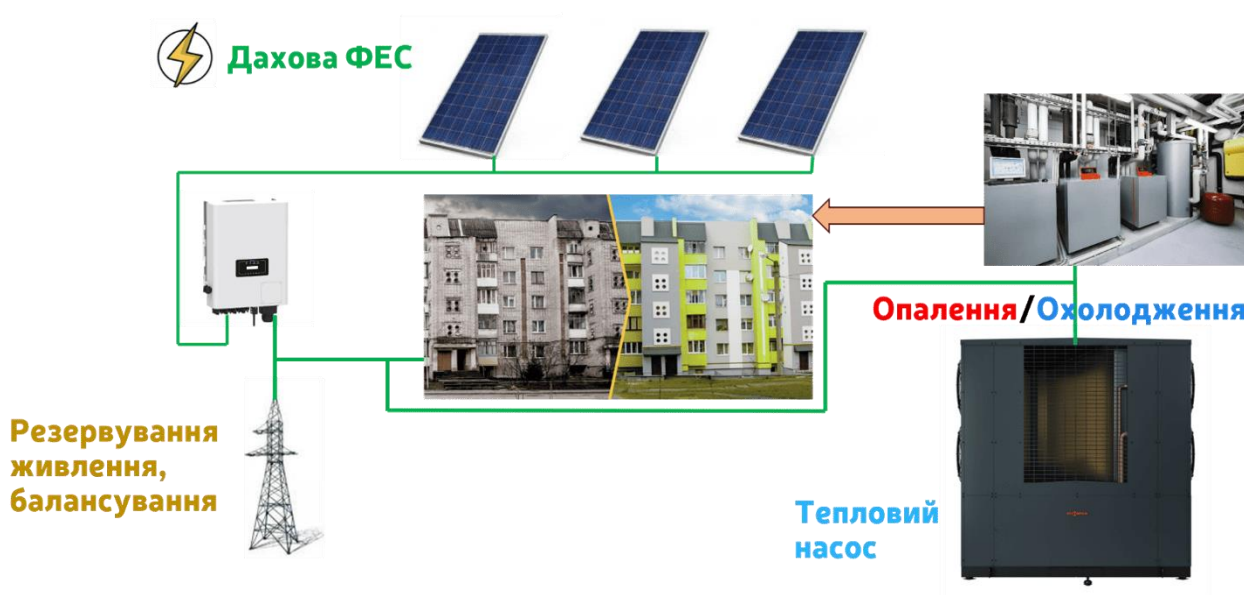


Рисунок 19 – Комбінована система енергозабезпечення для багатоквартирних житлових будинків

Стимулюючим фактором до широкого застосування цього рішення в житловому секторі є низька частка покриття даховою ФЕС фактичного електроспоживання. Проте, в останні роки достатньо істотно підвищилася ефективність фотоелектричних модулів з 12-16% до 18-23%, що призвело до збільшення виробленої електричної енергії у 1,5-1,9 рази з одиничної площі в річному діапазоні [48, 61-64].

Для дослідження очікуваних показників кліматичної нейтральності будівлі з теплонасосною системою опалення виконаємо моделювання режимів роботи

дахової ФЕС на річному діапазоні. У табл. 35 наведено основні характеристики сонячних панелей, які можна використати для встановлення дахової СЕС.

Таблиця 35 – Характеристики сонячних панелей [64]

Потужність панелі, Вт	ККД панелі, %	Геометричні розміри, м	Площа панелі, м ²	Питома потужність панелі, Вт/м ²
600	23,2	2,278x1,134	2,58	232,56
620	23	2,382x1,134	2,7	229,63
615	22,8	2,382x1,134	2,7	227,78
610	22,6	2,382x1,134	2,7	225,93
580	22,5	2,278x1,134	2,58	224,81
605	22,4	2,382x1,134	2,7	224,07
575	21,3	2,384x1,134	2,7	212,96

З табл. 35 бачимо, що чим вищий ККД панелі, тим вище значення питомої потужності панелі. Тому, при моделюванні дахової ФЕС використано питому потужність першої панелі, що становить 0,233 кВт/м².

Приклад моделювання наведено для 5-ти поверхової житлової будівлі. Для моделювання роботи сонячної станції, визначено ефективну площу даху при встановленні ФЕС [64]:

$$A_{\text{еф.ФЕС}} = 0,75 \cdot A_{\text{даху}} = 0,75 \cdot 916,7 = 687,53 \text{ м}^2,$$

де 0,75 – коефіцієнт використання площі, що враховує кут нахилу панелей, міжрядні відстані, технічні проходи та відступи від парапету;

$A_{\text{даху}}$ – площа даху, що визначена за проєктною документацією обраної будівлі, м².

Встановлена потужність фотоелектричної станції визначимо наступним чином та становить:

$$P_{\text{ФЕС}} = A_{\text{еф.ФЕС}} \cdot p_{\text{ФЕМ}} = 687,53 \cdot 0,233 = 159,89 \text{ кВт},$$

де $A_{\text{еф.ФЕС}}$ – ефективна площа даху, м^2 ;

$p_{\text{ФЕМ}}$ – питома потужність одного фотоелектричного модуля, $\text{кВт}/\text{м}^2$.

Розрахована орієнтовна річна генерація ФЕС становить:

$$E_{\text{річ.}} = P_{\text{ФЕС}} \cdot H_{\text{еф.}} = 159,89 \cdot 1100 = 175878,5 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік},$$

де $P_{\text{ФЕС}}$ – потужність ФЕС, кВт;

$H_{\text{еф.}}$ – ефективні сонячні години для центрального регіону України, год/рік [65].

Кількість електричної енергії, що потрібна для забезпечення роботи системи опалення протягом року:

$$E_{\text{еє}} = q_{H,nd} \cdot A_{\text{оп.}} = 23,65 \cdot 3974,9 = 94006,39 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{рік},$$

де $q_{H,nd}$ – річна питома енергопотреба системи опалення, що визначається сертифікатом про енергетичну ефективність будівлі $\text{кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2$;

$A_{\text{оп.}}$ – опалювальна площа будівлі, м^2 .

Значення $q_{H,nd}$ було визначено для модернізованої будівлі до класу «С» та з встановленням ТН як джерела теплозабезпечення. Аналогічним чином промодельовано ФЕС для 9-ти поверхової двопід'їзної будівлі.

На рис. 20 представлено результати моделювання генерації ФЕС у порівнянні з енергоспоживанням систем кліматизації при різних теплотехнічних характеристиках будівлі для 5-ти та 9-ти поверхових будівель відповідно.

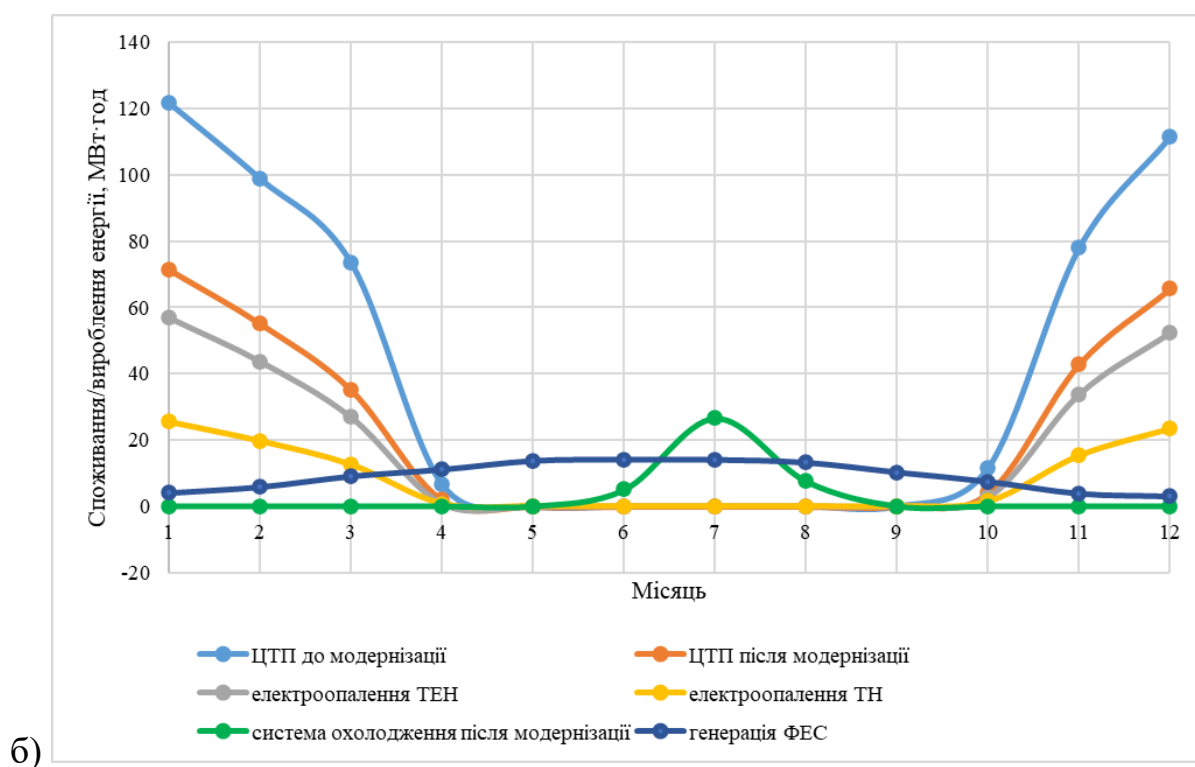
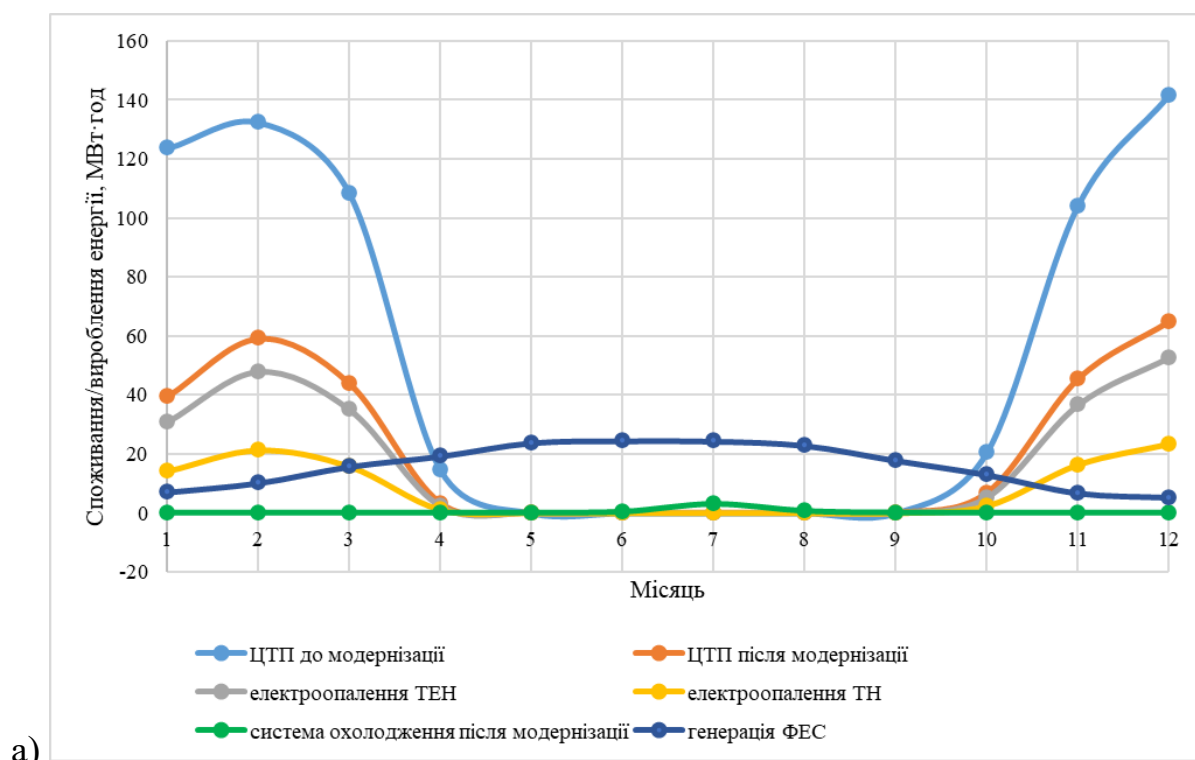


Рисунок 20 – Спроможність покриття даховою ФЕС споживання системами кліматизації для:

а) 5-ти поверхової будівлі;

б) для 9-ти поверхової будівлі.

За результатами моделювання встановлено, що дахова ФЕС спроможна

забезпечувати незалежну роботу систем кліматизації в річному розрізі за умови комплексної модернізації будівлі та впровадивши системи електроопалення з ТН. Накопичувальний ефект генерації в порівнянні зі споживанням системи енергозабезпечення наведено на гістограмі на рис. 21.

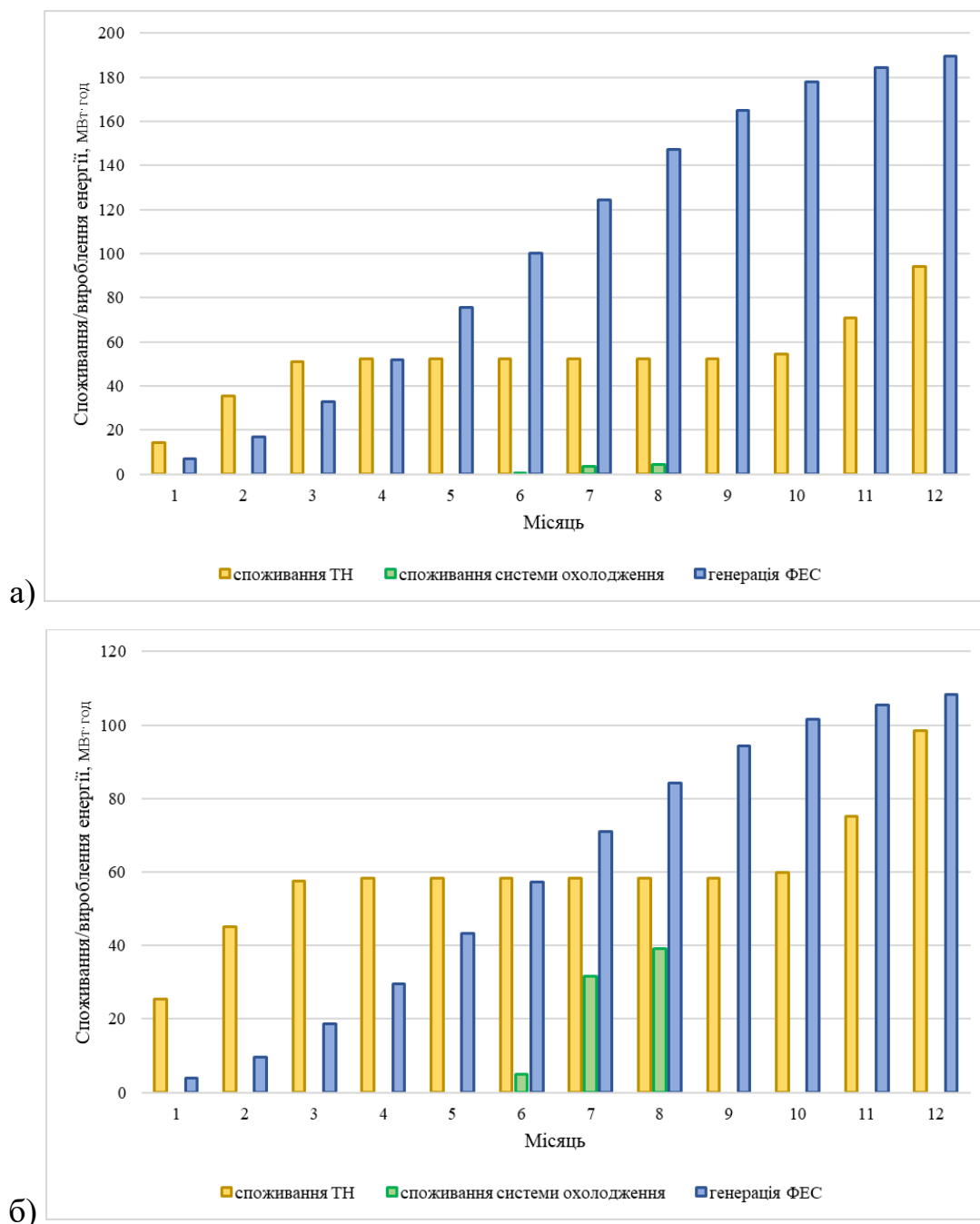


Рисунок 21 – Накопичення згенерованої енергії даховою ФЕС протягом року в порівнянні зі споживанням системою кліматизації для:

- а) 5-ти поверхової будівлі;
- б) для 9-ти поверхової будівлі.

Проведений аналіз та оцінка дозволила встановити, що при комплексній модернізації будівель та впровадженні комбінованих систем енергозабезпечення будівлі досягають операційної кліматичної нейтральності системами кліматизації у річному розрізі – 9-ти поверхові будівлі, а 5-ти поверхові житлові будівлі в цілому досягають повної кліматичної нейтральності.

4.4 Оцінка економічної ефективності дахових ФЕС

Визначення капітальних витрат при спорудженні дахової ФЕС. Усі значення показників економічної ефективності розраховані для 1 кВт встановленої потужності дахової ФЕС. Значення проєктних капіталовкладень визначаємо за формулою:

$$K_{\text{пр}} = K_{\text{об}} \left(\sum \text{Ц}_i \right) + \text{З}_{\text{тзс}} + \text{З}_{\text{м}} + \text{З}_{\text{н}} + \text{З}_{\text{пр}}, \text{ грн}$$

де $K_{\text{об}}$ – вартість придбання електрообладнання (засобів автоматизації, програмного забезпечення тощо) за проєктом або сумарна вартість комплектуючих елементів i -го виду, необхідних для реалізації прийнятого рішення;

$\sum \text{Ц}_i$ – кількість необхідних комплектуючих елементів;

$\text{З}_{\text{тзс}}$ – транспортно-заготівельні і складські витрати;

$\text{З}_{\text{м}}$ – витрати на монтажні роботи;

$\text{З}_{\text{н}}$ – витрати на налагоджувальні роботи;

$\text{З}_{\text{пр}}$ – інші одноразові вкладення грошових коштів.

Вартість однієї сонячної панелі, що розглянута в підпункті 4.3 дисертаційної роботи становить 5200 грн. Встановлена потужність однієї панелі складає 0,6 кВт. Для спорудження дахової ФЕС потужністю 100 кВт прийнято до встановлення 167 панелей.

Для роботи ФЕС прийнято до встановлення інвертор Deye 100 000 Вт (SUN-100K-G03) вартістю 137210 грн.

Отже, витрати на придбання обладнання становитимуть:

$$З_{об} = K_{об} \left(\sum C_i \right) = 5200 \cdot 167 + 137210 = 1005610 \text{ грн.}$$

Транспортно-заготівельні та складські витрати визначаються з урахуванням тарифів на перевезення компанією АвтоТрансГарант. Згідно тарифу на перевезення вартість за кожний кілометр по Україні становить 16 грн. Відстань між Києвом та Дніпром становить 494 км. Загальна вартість транспортно-заготівельних та складських витрат становить:

$$З_{тзс} = 494 \cdot 16 = 7904 \text{ грн.}$$

Складські витрати не розраховуються, з огляду на те, що панелі доставляються безпосередньо на місце монтажу.

Витрати на монтажну-налагоджувальні роботи визначено наступним чином:

$$З_{м+н} = \sum (C_i \cdot a_i \cdot t_i) \cdot K_d \cdot K_{см} \cdot K_{пр}, \text{ грн,}$$

де $C_i = 6$ – чисельність працівників i -го розряду, необхідних для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), чол.

$a_i = 52$ – годинна тарифна ставка працівника 4-го розряду, грн.

$t_i = 168$ – час, необхідний для виконання певного обсягу монтажних (налагоджувальних робіт), год.

$K_d = 1,1$ – коефіцієнт, що враховує розмір доплат;

$K_{см} = 1,22$ – коефіцієнт, що враховує єдиний соціальний внесок;

$K_{\text{пр}} = 1,2$ – коефіцієнт, що враховує інші витрати на здійснення монтажних (налагоджувальних) робіт.

Отже, витрати на монтажні роботи складуть:

$$З_{\text{м}} = 6 \cdot 52 \cdot 168 \cdot 1,1 \cdot 1,22 \cdot 1,2 = 84411 \text{ грн.}$$

Проектні капіталовкладення становитимуть:

$$K_{\text{пр}} = 1005610 + 7904 + 84411 = 1097925 \text{ грн.}$$

Розрахунок експлуатаційних витрат. До основних статей експлуатаційних витрат відносять:

- амортизаційні відрахування (АО);
- заробітна плата обслуговуючого персоналу (C_z);
- відрахування на соціальні заходи від заробітної плати (C_c);
- витрати на технічне обслуговування й поточний ремонт устаткування та мереж (C_t);
- інші витрати ($C_{\text{пр}}$).

Річні експлуатаційні витрати розраховуватимуться як:

$$C = AO + C_z + C_c + C_t + C_{\text{пр}}.$$

Заробітна плата обслуговуючого персоналу, відрахування на соціальні заходи від заробітної плати та інші витрати не розраховуються, оскільки працівники на підстанції відсутні.

Амортизація об'єкта основних засобів нараховується виходячи з терміну його корисного використання. Фотоелектричні модулі СЕС відносяться до 4-ї групи основних засобів з мінімальним корисним терміном використання 5 років.

Норма амортизації визначається за формулою:

$$H_a = \frac{K_{\text{пр}} - Л}{K_{\text{пр}} \cdot T_{\text{мін}}} \cdot 100\%,$$

де $K_{\text{пр}}$ – проєктні капіталовкладення;

$Л$ – розрахункова ліквідаційна вартість основних засобів;

$T_{\text{мін}}$ – термін корисного використання.

Розрахункова ліквідаційна вартість становить 10% від проєктних капіталовкладень:

$$Л = K_{\text{пр}} \cdot 0,1 = 1097925 \cdot 0,1 = 109793 \text{ грн.}$$

Норма амортизації:

$$H_a = \frac{K_{\text{пр}} - Л}{K_{\text{пр}} \cdot T_{\text{мін}}} \cdot 100\% = \frac{1097925 - 109793}{1097925 \cdot 5} \cdot 100\% = 18\%$$

Амортизаційні відрахування знаходяться за прямолінійним методом:

$$AO = \Phi_{\text{п}} \cdot H_a = 1005610 \cdot 18\% = 181010 \text{ грн,}$$

Річні витрати на технічне обслуговування і поточний ремонт електротехнічного устаткування приймаємо на рівні 1% від капітальних витрат:

$$C_{\text{т.о.}} = K_{\text{пр}} \cdot 0,01 = 1097925 \cdot 0,01 = 10979 \text{ грн.}$$

Експлуатаційні витрати складатимуть:

$$C = 181010 + 10979 = 191989 \text{ грн.}$$

Розрахунок вартості електричної енергії. Річна економія електричної енергії досягається за рахунок генерації ФЕС. За рік фотоелектрична станція потужністю 100 кВт здатна виробити:

$$W_p = P_{\text{ФЕС}} \cdot H_{\text{еф.}} = 100 \cdot 1100 = 110000 \text{ кВт} \cdot \text{год/рік}$$

Вартість зекономленої електричної енергії визначається як:

$$E_p = W_p \cdot C_e = 110000 \cdot 4,32 = 475200 \text{ грн,}$$

де W_p – втрати енергії за рік;

C_e – тариф на електроенергію, грн./ кВт·год;

Повна річна економія від впровадження ФЕС визначається з урахуванням експлуатаційних витрат:

$$E_{\text{кп}} = E_p - C = 475200 - 191989 = 283211 \text{ грн.}$$

Термін окупності капітальних витрат T_p показує, за скільки років окупиться ФЕС за рахунок загальної економії від впровадження прийнятого рішення:

$$T_p = \frac{K_{\text{пр}}}{E_{\text{кп}}} = \frac{1097925}{283211} = 3,87 \text{ роки}$$

Термін окупності становить менше мінімального встановленого терміну окупності – 5 років. Таким чином, можна стверджувати, що впровадження дахових фотоелектричних станцій може стати надійним інвестиційно привабливим рішенням для ОСББ та для житлово-сервісних компаній, які здійснюють управління типовими 5-ти та 9-ти поверховими будівлями.

ВИСНОВКИ

1. Проведений аналіз методики визначення електричних навантажень дозволив встановити: питомі розрахункові електричні навантаження, як правило, завищені та потребують уточнення; методика не враховує рівень енергетичної ефективності будівель; наведені розрахункові навантаження у ДБН встановлені для будівель, параметри яких відповідають найнижчому класу енергетичної ефективності.

2. Врахування класів енергетичної ефективності будинків дозволяє зменшити розрахункові електричні навантаження будинків у 1,5-5,2 разів, перейти на менші типорозміри обладнання системи електропостачання і зменшити її вартість.

3. Статистичний аналіз температур зовнішнього повітря за останні 5 років виявив, що середньомісячні температури у період опалення зросли на 1,7 - 3,7 °C в порівнянні з нормативно затвердженими значеннями. Врахування фактичних температур дозволяє розширити межі роботи теплонасосних установок та підвищити їх коефіцієнт перетворення енергії.

4. Встановлено, що перехід на низькотемпературні графіки роботи системи опалення дозволяє підвищити сезонний коефіцієнт перетворення енергії з 1,8-2,0 до 2,8-3,2 з урахуванням осереднених за 5 років фактичних зовнішніх температур упродовж опалювального сезону.

5. Ефективність фотоелектричних модулів зросла з 12-16% до 18-23%, що призводить до збільшення виробленої електричної енергії у 1,5-1,9 рази з одиничної площі панелі в річному діапазоні і за умов комплексної модернізації будівлі та запровадження високоефективних систем опалення з тепловими насосами досягти показників операційної кліматичної нейтральності для типових 5-ти та 9-ти поверхових будівель.

6. Запропоновано удосконалення алгоритму проєктування систем електропостачання багатоквартирних житлових будинків з урахуванням класу енергетичної ефективності та рівнем автоматизації систем моніторингу і управління будівель.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. ДБН В.2.5-23:2025. Проектування електрообладнання об'єктів цивільного призначення. Чинний від 2025--. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2025.
2. Про енергетичну ефективність будівель : Закон України від 22.06.2017 № 2118-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2017. № 33. Ст. 359.
3. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція та енергоефективність будівель. Чинний від 2022-09-01. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2022. 27 с.
4. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. Чинний від 2022-09-01. Київ: Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. 18 с.
5. Про енергетичну ефективність : Закон України від 21.10.2021 № 1818-IX. Відомості Верховної Ради України. 2022. № 2. Ст. 8.
6. Про затвердження Методики визначення енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства регіонального розвитку, будівництва та житлово-комунального господарства України від 11.07.2018 № 169. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0822-18#n224> (дата звернення: 20.07.2026).
7. Енергоефективність у будівлях. URL: <https://eeplatform.org.ua/vse-pro-energoefektivnist-v-ukrayini/budivli/> (дата звернення: 20.07.2026).
8. Національний план дій з енергоефективності на період до 2030 року. Київ : Кабінет Міністрів України.
9. Кошеленко Є. В. Енергетична ефективність режимів електротехнічних комплексів підприємств та міст: дис. к.т.н.: 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Дніпро : НТУ «Дніпровська політехніка», 2021. 191 с.
10. ДСТУ 9190:2022. Енергетична ефективність будівель. Метод розрахунку енергоспоживання під час опалення, охолодження, вентиляції,

освітлення та гарячого водопостачання. Чинний від 2023-05-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 116 с.

11. ДСТУ 9191:2022. Настанова щодо вибору теплоізоляційного матеріалу для утеплення будівель. Чинний від 2023-05-01. Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2022. 35 с.

12. ДБН В.1.2-11:2021. Основні вимоги до будівель і споруд. Енергозбереження та енергоефективність. Чинний від 2022-09-01. Київ : Міністерство розвитку громад та територій України, 2021. 18 с.

13. ДСТУ EN ISO 52000-1:2022. Енергетичні характеристики будівель. Загальна методика оцінювання. Чинний від 2023-05-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

14. ДСТУ EN ISO 52016-1:2022. Енергетичні характеристики будівель. Розрахунок енергетичних потреб для опалення та охолодження. Чинний від 2023-05-01. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2022.

15. Aghbalou N., Charki A., Errousso H. et al. Building Energy Efficiency: Using Ensemble Learning to Forecast the Load on Heating, Ventilation, and Air Conditioning Systems. *Journal of Engineering*. 2025. Vol. 2025. Art. 4764874. DOI: 10.1155/2025/4764874.

16. Building-PROFet: A scalable data-driven modelling approach for estimating heat and electricity load profiles of buildings. *Energy*. 2026. Vol. 353. Art. 140814. DOI: 10.1016/j.energy.2026.140814.

17. ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Будівельна кліматологія. Чинний від 2011-11-01. Київ: Мінрегіонбуд України, 2011. 127 с.

18. Yilmaz S., Dincer I., Kilicarslan A. The determination of load profiles and power consumptions of home appliances. *Energies*. 2018. Vol. 11, № 3. Art. 607. DOI: 10.3390/en11030607.

19. Zamkova O. A., Koshelenko A. O. Vplyv znachennia temperatury otochuiuchoho seredovyshcha na pokaznyky enerhetychnoi efektyvnosti budivli (Influence of ambient temperature on building energy efficiency indicators). *Molod:*

Nauka ta Innovatsii : Proceedings of the XII International Scientific and Technical Conference of Students, Postgraduates and Young Scientists. Dnipro, 2024. P. 43–45.

20. Про затвердження Мінімальних вимог до енергетичної ефективності будівель: наказ Міністерства розвитку громад та територій України від 27.10.2020 № 260. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z1257-20> (дата звернення: 20.07.2026).

21. Euroheat & Power. Low-temperature district heating (LTDH): Guidelines for transition in new and existing areas. Brussels : Euroheat & Power, 2014. URL: https://eudp.dk/files/slutrapporter/euroheatpower_newguidelinelowtemperatedh_1.pdf (дата звернення: 20.07.2026).

22. Lower temperatures, higher efficiency: The pivotal role of heat pumps in building energy renovation. BUILD UP. 2025. URL: <https://build-up.ec.europa.eu/> (дата звернення: 20.07.2026).

23. Є.В. Кошеленко, О.А. Замкова. Аналіз ефективності систем енергозабезпечення багатоквартирних житлових будинків з тепловими насосами. Збірник наукових праць НГУ. – Дніпро: Національний ТУ «Дніпровська політехніка», 2025 – № 83. С 209-219. DOI: [10.33271/crpnmu/83.209](https://doi.org/10.33271/crpnmu/83.209)

24. Температурний графік 95/70. URL: https://dniprorada.gov.ua/upload/editor/temperaturnij_grafik_95-70_1.pdf

25. Температурний графік 90/70 °С. Теплоенергетика. URL: https://www.ter-en.com/calon/example/tg_90_70_ua.pdf (дата звернення: 20.07.2026).

26. Температурний графік 80/60 °С. Теплоенергетика. URL: https://www.ter-en.com/calon/example/tg_80_60_ua.pdf (дата звернення: 20.07.2026).

27. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинний від 2014-01-01. Київ : Мінрегіон України, 2013. 149 с. <https://dbn.co.ua/load/normativy/dbn/1-1-0-1018>

28. ДБН В.2.5-39:2008. Теплові мережі. Чинний від 2009-01-01. Київ: Міністерство регіонального розвитку та будівництва України, 2008. 56 с.

<https://document.vobu.ua/wp-content/uploads/DBN/96.1.-DBN-V.2.5-392008.-Inzhenerne-obladnannya-budinkiv-i.pdf>

29. Toleikyte, A., Lecomte, E., Volt, J., Lyons, L., Roca Reina, J.C., Georgakaki, A., Letout, S., Mountraki, A., Wegener, M. and Schmitz, A., Clean Energy Technology Observatory: Heat Pumps in the European Union - 2024 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2024, <https://data.europa.eu/doi/10.2760/7205477>, JRC139377.

30. Реконструкція систем опалення багатоквартирних будинків : альбом рішень. Danfoss. URL:

<https://assets.danfoss.com/documents/latest/526537/AJ381704008168uk-UA0402.pdf>

31. Про теплопостачання : Закон України від 02.06.2005 № 2633-IV. Відомості Верховної Ради України. 2005. № 28. Ст. 373.

32. Про житлово-комунальні послуги : Закон України від 09.11.2017 № 2189-VIII. Відомості Верховної Ради України. 2018. № 1. Ст. 1.

33. Dermentzis G., Ochs F., Franzoi N. Four years monitoring of heat pump, solar thermal and PV system in two net-zero energy multi-family buildings. Journal of Building Engineering. 2021. Vol. 43. Art. 103199. DOI: 10.1016/j.jobbe.2021.103199.

34. Heat Pumps in Multi-Family Buildings: The Key to Urban Energy Efficiency. Heat Pumps Watch. 2025. URL: <https://heatpumpswatch.org/> (дата звернення: 20.07.2026).

35. Kim J., James N., Maguire J. Investigation of a high-temperature combination heat pump for lower-cost electrification in multifamily buildings. Applied Energy. 2024.

36. Vitocal 150-A типу AWO-M-E-AC 151.A04. Інструкція з проєктування. Viessmann. Аллендорф : Viessmann Werke GmbH.

37. Vitocal 250-A типу AWO-AC-AF 251.A40. Інструкція з проєктування. Viessmann. Аллендорф : Viessmann Werke GmbH.

38. Vitocal 200-A типу AWCI-AC 201.A10. Інструкція з проєктування. Viessmann. Аллендорф : Viessmann Werke GmbH.

39. Vitocal 350-A типу AWHI/AWHO-AC 351.A14. Інструкція з проєктування. Viessmann. Аллендорф : Viessmann Werke GmbH.

40. Vitocal 300-A типу AWO-AC 301.B11. Інструкція з проєктування. Viessmann. Аллендорф : Viessmann Werke GmbH.

41. Архів погодних умов. Meteopost. URL:
<https://meteopost.com/weather/archive/> (дата звернення: 20.07.2026).

42. Boiko O. O., Voskoboinyk Ye. K., Koshelenko Ye. V. Doslidzhennia protsesu keruvannia teplovym komfortom u bahatokimnatnomu budynku z vykorystanniam detsentralizovanoi systemy v umovakh obmezhenoho elektropostachannia. Central Ukrainian Scientific Bulletin. Technical Sciences. 2025. Vol. 12 (43), Pt. 1. P. 316–325. DOI: 10.32515/2664-262X.2025.12(43).1.316-325.

43. Papaika Y., Lutsenko I., Koshelenko I., Tsyhan P. Methodology for selecting the rated parameters of power transformers in the town's electrical distribution networks in settlements. Electrical Engineering and Power Engineering. 2021. № 2. P. 33–43. DOI: 10.15588/1607-6761-2021-2-4.

44. Замкова О. А., Кошеленко А. О. Визначення питомих електричних навантажень багатоквартирних будинків. Електротехнічні та інформаційні системи. 2026. № 109. С. 154–162. DOI: 10.32782/EIS/2026-109-18.

45. ДСТУ EN 12831-1:2017. Енергетичні характеристики будівель. Метод визначення розрахункового теплового навантаження. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2018.

46. Koliienko A., Shelimanova O. Thermal load of buildings as a parameter of energy efficiency of the heating system. Energy and Automation. 2025. № 6 (82). P. 41–51. DOI: 10.31548/energiya6(82).2025.041.

47. Modelling electric and heat load profiles of non-residential buildings for use in long-term aggregate load forecasts. Utilities Policy.

48. Косенко Л. В. Оцінка ефективності утеплення у контексті стандарту NZEB та застосування сонячної електростанції для житлових будівель. Український журнал будівництва та архітектури. 2026. № 1. С. 87–97.

49. Anderson K., Smith J., Brown L. A rigorous standalone literature review of residential electricity load profiles. *Energies*. 2023. Vol. 16, № 10. Art. 4072. DOI: 10.3390/en16104072.
50. Smith A., Johnson P., Lee R. A comprehensive review of residential electricity load profile models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2021. Vol. 150. Art. 111457. DOI: 10.1016/j.rser.2021.111457.
51. Yilmaz S., Dincer I., Kilicarslan A. The determination of load profiles and power consumptions of home appliances. *Energies*. 2018. Vol. 11, № 3. Art. 607. DOI: 10.3390/en11030607.
52. Бондарчук А. С. Внутрішньобудинкове електропостачання: навч. посіб. Київ : Освіта України, 2015. 480 с.
53. ДБН В.2.5-67:2013. Опалення, вентиляція та кондиціонування. Чинний від 2014-01-01. Київ : Мінрегіон України, 2013. 149 с.
54. ДСТУ ІЕС 61724-1:2020. Фотоелектричні системи. Моніторинг продуктивності. Київ : ДП «УкрНДНЦ», 2020.
55. Namdar H., Rossi di Schio E., Semprini G., Valdiserri P. Photovoltaic-thermal solar-assisted heat pump systems for building applications: A technical review on direct expansion systems. *Energy and Buildings*. 2025. Vol. 334. Art. 115516. DOI: 10.1016/j.enbuild.2025.115516.
56. Koshelenko Ye. V., Lutsenko I. M., Zamkova O. A., Tsyhan P. S., Koshelenko A. O. Tekhnolohii stvorennia system kombinovanoho zhyvlennia ob'ektiv mist. *Collection of Scientific Works of NMU*. 2024. № 79. P. 222–231. DOI: 10.33271/crpnmu/79.222.
57. Kazem H. A., Chaichan M. T., Al-Waeli A. H. A., Sopian K. A systematic review of photovoltaic/thermal applications in heat pump systems. *Solar Energy*. 2024. Vol. 269. Art. 112299. DOI: 10.1016/j.solener.2023.112299.
58. Rabczak S., Mateichyk V., Smieszek M., Nowak K., Kolomiets S. Evaluating the energy efficiency of combining heat pumps and photovoltaic panels in eco-friendly housing. *Applied Sciences*. 2024. Vol. 14, № 13. Art. 5575. DOI: 10.3390/app14135575.

59. Про основні засади державної кліматичної політики : Закон України від 08.10.2024 № 3991-IX. Відомості Верховної Ради України. 2025. № 9. Ст. 19.

60. Zamkova O. A., Koshelenko A. O. Osnovni zasady klimatychnoi neitralnosti ta zelenoho perekhodu Ukrainy (Fundamental principles of climate neutrality and the green transition of Ukraine). Scientific Spring 2025 : Proceedings of the XV International Scientific and Technical Conference of Postgraduates and Young Scientists. Dnipro, 2025. P. 156–158.

61. Кудря С. О. Нетрадиційні та відновлювані джерела енергії : підручник. Київ : НТУУ «КПІ», 2012. 495 с.

62. Вишницька А. Чому відновлювана енергетика – це запорука безпеки для України під час та після війни. Heinrich-Böll-Stiftung. 2023. URL: [https://ua.boell.org/uk/2023/02/22/chomu-vidnovlyuvana-enerhetyka-tse-zaporuka-bezpeky-dlya-ukrayiny-pid-chas-ta-pislya](https://ua.boell.org/uk/2023/02/22/chomu-vidnovlyuvana-enerhetyka-tse-zaporuka-bezpeky-dlya-ukrayiny-pid-chas-ta-pislya-viyni) (дата звернення: 20.07.2026).

63. Савченко О. Проблеми та перспективи розвитку відновлюваної енергетики в 2024 році. LIGA ZAKON. 2024. URL: https://biz.ligazakon.net/analytys/227024_problemi-ta-perspektivi-rozvitku-vidnovlyuvano-energetiki-v-2024-rots (дата звернення: 20.07.2026).

64. Замкова О. А., Кошеленко А. О. Дослідження річного енергоспоживання житлової будівлі з фотоелектричною станцією. Електротехніка та електроенергетика. 2026. № 1. С. 75–83. DOI: 10.15588/1607-6761-2026-1-8.

65. International Electrotechnical Commission. IEC 61724-1:2021. Photovoltaic system performance – Part 1: Monitoring. Geneva : IEC, 2021. ISBN 978-2-8322-5088-4.

ДОДАТОК А

Документи, що підтверджують практичне значення отриманих результатів роботи



49000, г. Дніпро, вул. Ольгерда Бочковського, 26/171, office@elektal.com.ua

АКТ

про впровадження результатів дисертаційної роботи
ЗАМКОВОЇ Ольги Андріївни
на тему «Підвищення енергетичної ефективності режимів систем
електропостачання житлових будинків»

Наукові та практичні результати дисертаційної роботи Замкової Ольги Андріївни були впроваджені у виробничу діяльність ТОВ «ЕЛЕКТАЛ» та використовуються під час розроблення і впровадження технічних рішень у сфері переведення житлових багатоквартирних будинків на електроопалення.

У процесі впровадження використано підходи до підвищення ефективності використання електротехнічного обладнання шляхом використання уточнених значень питомих електричних навантажень. Також у діяльності компанії використовується запропонована уточнена методика розрахунку питомих електричних навантажень з урахуванням комплексного впливу класів енергетичної ефективності будівель, рівнів автоматизації систем моніторингу та управління будівлею, інтеграції об'єктів розподіленої генерації та теплових насосів.

Результати дисертаційної роботи мають практичне значення для діяльності ТОВ «ЕЛЕКТАЛ» та рекомендовані до подальшого використання під час розроблення та реалізації проектів модернізації сучасних систем електропостачання та кліматизації житлових будинків.

Директор



Дмитро КОСОНОГОВ



**ДНІПРОПЕТРОВСЬКА ОБЛАСНА ВІЙСЬКОВА АДМІНІСТРАЦІЯ
ДЕПАРТАМЕНТ ЖИТЛОВО-КОМУНАЛЬНОГО
ГОСПОДАРСТВА ТА БУДІВНИЦТВА**

пр. Олександра Поля, 2, м. Дніпро, 49101 тел. (056) 742-86-92; факс (056) 742-86-81
e-mail: gkh@adm.dp.gov.ua, код ЄДРПОУ 38598277

АКТ

**про використання результатів дисертаційної роботи
ЗАМКОВОЇ Ольги Андріївни
на тему «Підвищення енергетичної ефективності режимів систем
електропостачання житлових будинків»**

Цей акт складений про те, що наукові результати дисертаційної роботи ЗАМКОВОЇ Ольги Андріївни на тему «Підвищення енергетичної ефективності режимів систем електропостачання житлових будинків» використовуються у проектних рішеннях та при плануванні заходів з підвищення енергетичної ефективності житлових будинків.

У процесі впровадження використано такі результати дослідження:

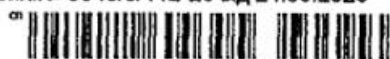
- методичні підходи до оцінювання режимів електроспоживання житлових будинків;
- рекомендації щодо інтеграції теплових насосів типу «повітря-вода» та дахових фотоелектричних станцій у системи енергозабезпечення багатоквартирних житлових будинків;
- уточнені значення питомих електричних навантажень, які залежать від класу енергетичної ефективності будівлі.

Запропоновані результати дисертаційного дослідження Замкової О.А. є актуальними та мають важливе практичне значення при проектуванні системи електропостачання, вибору обладнання та розрахунку питомих електричних навантажень, що дозволяють підвищити раціональне використання енергетичних ресурсів та застосовувати комбіновані системи енергозабезпечення. Зазначені матеріали становлять інтерес для подальшого використання при виконанні проектних і дослідно-конструкторських робіт, пов'язаних із процесами підвищення енергетичної ефективності житлового фонду, розроблення програм енергозбереження та модернізації інженерних систем житлового фонду.

Заступник
директора департаменту

Володимир ВЕРХОТУРЦЕВ

Дніпропетровська обласна державна адміністрація
департамент житлово-комунального господарства та будівництва
Вих. № 3040/0/112-26 від 24.06.2026



ЗАТВЕРДЖУЮ

Перший проректор

Національного технічного університету

«Дніпровська політехніка»

Артем ПАВЛИЧЕНКО

«01» вересня 2025 р.



АКТ

**впровадження в навчальний процес результатів дисертаційної роботи
Замкової Ольги Андріївни
«Підвищення енергетичної ефективності режимів систем
електропостачання житлових будинків»**

Цим документом підтверджуються впровадження результатів дисертаційної роботи «Підвищення енергетичної ефективності режимів систем електропостачання житлових будинків» здобувачки Замкової Ольги Андріївни в навчальний процес на кафедрі електроенергетики за освітньою програмою «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» освітнього рівня бакалавр Національного технічного університету «Дніпровська політехніка» у наступних освітніх компонентах:

- у лекційному курсі «Електропостачання промислових підприємств та міст» використано уточнені показники питомого електроспоживання системою електроопалення та методику розрахунку електричних навантажень житлових будівель;
- у лекційному курсі «Основи енергетичного менеджменту» використано запропоновані методи інтеграції комбінованих систем енергозабезпечення з тепловими насосами та даховими фотоелектричними станціями, як один із методів підвищення енергетичної ефективності будівель;
- у лекційному курсі «Енергетичні мережі будівель та споруд» використано підходи до проєктування систем електропостачання та вплив автоматизованих систем моніторингу та управління будівлями на рівень енергетичної ефективності інженерних мереж будинків.

Завідувач кафедри
електроенергетики, д.т.н., професор

Юрій ПАПАЙКА