

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В. Н. Каразіна
Навчально-науковий інститут «Українська інженерно-педагогічна академія»
Кафедра електротехніки та електроенергетики

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

магістра

на тему

АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ
БУДІВЛІ КОМУНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ ТА ШЛЯХИ ЇЇ
УДОСКОНАЛЕННЯ
(тема кваліфікаційної роботи)

Виконав: студент 2 маг. курсу, групи ДЕС-24 мг

Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Владислав КУЛІКОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Керівник _____/Юлія ОЛІЙНИК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Рецензент _____/Світлана АРТЮХ
(підпис) (ім'я та прізвище)

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри _____/Артем ЧЕРНЮК
(підпис) (ім'я та прізвище)

Секретар ЕК _____/Ігор КИРИСОВ
(підпис) (ім'я та прізвище)

Харків – 2025 рік

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ В. Н. КАРАЗІНА**

Навчально – науковий інститут Українська інженерно-педагогічна академія
Кафедра електротехніки та електроенергетики
Спеціальність 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
Освітньо-професійна програма Електричні станції, мережі та системи

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувач кафедри

(підпис)

к.т.н., доцент Артем ЧЕРНЮК
(науковий ступінь, вчене звання, ім'я, прізвище)

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ

**на кваліфікаційну роботу дипломну роботу
другого (магістерського) рівня вищої освіти**

здобувачу вищої освіти Владиславу КУЛІКОВУ

1. Тема «Аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі
комунального призначення та шляхи її удосконалення»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3664 від «06» жовтня 2025 р.

2. Термін здачі закінченої роботи «15» грудня 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: Тип будівлі; загальна площа будівлі; режим роботи; напруга живлення; основні групи електроспоживачів.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ; РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ; РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БУДІВЛІ КОМУНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ; ВИСНОВКИ

5. Перелік графічного матеріалу (презентаційний матеріал):
Слайди презентації

6. Консультант:

Розділ	Консультант	Підпис, дата		Оцінка (бали)
		Завдання видав	Завдання прийняв	

7. Дата видачі завдання «12» жовтня 2025 р.

Керівник

(підпис)Юлія ОЛІЙНИК

(ім'я, прізвище)

Завдання прийняв до виконання

(підпис)Владислав КУЛІКОВ

(ім'я, прізвище)

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН-ГРАФІК виконання кваліфікаційної дипломної роботи

№ з/п	Назва етапів роботи та питань, які мають бути розроблені відповідно до завдання	Термін виконання	Позначки керівника про виконання завдань
1	Визначення актуальності теми дослідження	12.10.25 – 15.10.25	
2	Проведення аналізу наукової літератури	16.10.25 – 23.10.25	
3	Виконання першого розділу магістерської кваліфікаційної роботи	24.10.25– 01.11.25	
4	Виконання другого та третього розділу магістерської кваліфікаційної роботи	02.11.25 – 26.11.25	
5	Оформлення пояснювальної записки	27.11.25 – 07.12.25	
6	Підготовка доповіді, презентації до захисту	08.12.25- 15.12.25	

Студент (ка)

(підпис)Владислав КУЛІКОВ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та шляхи її удосконалення»

КУЛІКОВА ВЛАДИСЛАВА

Магістерська робота виконана на 101 сторінок, містить 28 таблиць, 1 рисунок, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 20.

Магістерська робота на тему «Аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та шляхи її удосконалення» присвячена дослідженню стану енергоспоживання та розробленню рекомендацій щодо підвищення ефективності функціонування системи електропостачання.

В роботі проаналізовано теоретичні основи енергоефективності, чинну нормативну базу та сучасні методи оцінювання втрат електроенергії. Проведено аналіз фактичних параметрів роботи електричних мереж будівлі комунального призначення, визначено основні напрями зниження енергетичних втрат і підвищення коефіцієнта потужності.

Запропоновано комплекс технічних та організаційних заходів: оптимізацію режимів навантаження, компенсацію реактивної потужності, застосування енергоощадного обладнання, а також впровадження автоматизованої системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ). Реалізація цих заходів дозволяє знизити споживання електроенергії на 10–15 % і підвищити надійність роботи системи.

ЕНЕРГОЕФЕКТИВНІСТЬ, ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ, ВТРАТИ
ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РЕАКТИВНА ПОТУЖНІСТЬ, АСКОЕ,
ЕНЕРГОЗБЕРЕЖЕННЯ

ABSTRACT

to a master's thesis on

«Analysis of the energy efficiency of the power supply system of the utility building and ways to improve it»

KULIKOV VLADYSLAV

The master's work is executed on 101 pages, contains 28 tables, 1 drawings, which characterize the results of research, additions, used literary sources 20.

The master's thesis on the topic «Analysis of the energy efficiency of the power supply system of a utility building and ways to improve it» is devoted to the study of the state of energy consumption and the development of recommendations for increasing the efficiency of the power supply system.

The paper analyzes the theoretical foundations of energy efficiency, the current regulatory framework and modern methods of assessing electricity losses. An analysis of the actual parameters of the electrical networks of the utility building was carried out, the main directions of reducing energy losses and increasing the power factor were determined.

A set of technical and organizational measures is proposed: optimization of load modes, reactive power compensation, use of energy-saving equipment, as well as implementation of an automated system of commercial electricity accounting (ASKOE). The implementation of these measures allows to reduce electricity consumption by 10–15 % and increase the reliability of the system.

ENERGY EFFICIENCY, POWER SUPPLY, ELECTRICITY LOSSES,
REACTIVE POWER, ASKOE, ENERGY SAVING

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ	12
1.1. Поняття енергоефективності та її роль у сучасних електроенергетичних системах	12
1.2. Складові системи електропостачання будівель комунального призначення	15
1.3. Основні показники енергоефективності систем електропостачання	18
1.4. Види та причини втрат електроенергії в системах електропостачання	22
1.5. Огляд нормативної бази України та міжнародних стандартів з енергоефективності	27
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	32
РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ	34
2.1. Методичні підходи до оцінки енергоефективності електричних мереж	34
2.2. Розрахункові та експериментальні методи визначення втрат електроенергії	38
2.2.1. Класифікація втрат та загальна ідея вимірювань	38
2.2.2. Розрахункові методи	39
2.2.3. Експериментальні методи та методика проведення вимірювань	40
2.2.4. Спеціальні методи та рекомендації	43
2.2.5. Приклад структурованого алгоритму (для включення у методику магістерської роботи)	43

2.3. Використання автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання	44
2.3.1. Призначення та основні завдання АСМОЕ	44
2.3.2. Структура автоматизованої системи моніторингу	45
2.3.3. Принципи функціонування АСМОЕ	45
2.3.4. Використання АСМОЕ для визначення втрат електроенергії	46
2.3.5. Програмне забезпечення та аналітичні інструменти	46
2.3.5. Програмне забезпечення та аналітичні інструмент	47
2.3.7. Приклад використання на підприємстві	47
2.3.8. Перспективи розвитку	48
2.4. Порівняльний аналіз існуючих методик та обґрунтування вибору оптимальної	48
2.5. Узагальнення результатів аналізу методик оцінки енергоефективності	49
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	58
РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БУДІВЛІ КОМУНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	60
3.1. Характеристика об'єкта дослідження (загальні відомості про будівлю)	60
3.2. Опис системи електропостачання та основних споживачів електроенергії	63
3.3. Теплотехнічні характеристики будівель	68
3.4. Розрахунки опору огорожувальних конструкцій	76
3.5. Нормативна питома теплозахисна характеристика будівлі	82
3.6. Оцінка енергетичної ефективності будівлі	86

3.7. Відповідність документації вимогам енергетичної ефективності	92
3.8. Шляхи удосконалення системи електропостачання та підвищення її енергоефективності	93
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	95
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	97
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	100

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ЕЕ – електрична енергія

ЛЕП – лінії електропередавання

ПЛЕП - -повітряні лінії електропередавання

ЯЕЕ – якість електричної енергії

Т – силовий трансформатор

ТС – трансформатор струму

ТН – трансформатор напруги

АСКОЕ - автоматизована система комерційного обліку електроенергії

ГГРЩ - головний розподільчий щит

ТП - трансформаторна підстанція

ЩО, ЩС, ЩА - розподільчі пункти та щити освітлення

РП - розподільчі пункти

ДГУ - дизель-генераторні установки

UPS - джерела безперебійного живлення

ПУЕ – правила улаштування електроустановок

ВДЕ - відновлювані джерела енергії

ККД - коефіцієнт корисної дії

ВСТУП

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується зростанням вимог до ефективності використання електричної енергії. Постійне підвищення вартості енергоносіїв, обмеженість енергетичних ресурсів і необхідність зниження негативного впливу на довкілля зумовлюють потребу у впровадженні енергоощадних технологій та вдосконаленні систем електропостачання. Питання енергоефективності набуває особливого значення для будівель комунального призначення, де електрична енергія використовується не лише для освітлення та побутових потреб, але й для забезпечення роботи інженерних систем, вентиляції, насосного обладнання, ліфтів та систем безпеки.

Будівлі комунального призначення, як правило, мають складну структуру споживання електроенергії, значну кількість приєднаних електроприймачів і нерівномірний графік навантаження. Це призводить до збільшення втрат електроенергії в елементах мережі, зниження коефіцієнта потужності, появи несиметрії струмів і напруг, що безпосередньо впливає на надійність та економічність роботи всієї системи електропостачання.

Рациональне управління енергоспоживанням і зниження втрат у системах електропостачання дозволяє не лише скоротити експлуатаційні витрати, але й підвищити енергетичну безпеку об'єкта, продовжити термін служби електротехнічного обладнання та покращити якість електроенергії. Відтак, проведення аналізу енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення є актуальним завданням, що має важливе технічне, економічне та екологічне значення.

Актуальність теми роботи зумовлена необхідністю комплексного підходу до оцінки енергетичних показників систем електропостачання, виявлення основних причин енергетичних втрат і розроблення дієвих заходів для підвищення енергоефективності на основі сучасних технологічних і організаційних рішень. Зростання питомої частки електроспоживання в комунальному секторі та тенденції до цифровізації управління

енергоресурсами роблять дане дослідження практично значущим і своєчасним.

Розвиток енергозберігаючих технологій, застосування автоматизованих систем контролю та обліку електроенергії, а також використання пристроїв компенсації реактивної потужності є ключовими напрямками модернізації систем електропостачання будівель. Їх впровадження дозволяє не лише підвищити ефективність використання електричної енергії, але й зменшити негативний вплив на енергетичну систему міста, знизити навантаження на трансформатори та лінії електропередач.

У цьому контексті аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та розроблення шляхів її удосконалення є важливим етапом оптимізації споживання енергії та впровадження сучасних принципів сталого розвитку у сфері енергетики.

Мета дослідження – підвищення енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення шляхом аналізу її технічного стану, визначення втрат електроенергії та розроблення комплексу заходів щодо зниження втрат і оптимізації режимів роботи електричної мережі.

Об’єкт дослідження – система електропостачання будівлі комунального призначення (розподільча мережа, трансформаторне обладнання, електричні приймачі та споживачі).

Предмет дослідження – процеси розподілу, передавання та споживання електроенергії у системі електропостачання, а також методи підвищення її енергоефективності за рахунок технічних і організаційних рішень.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішити такі завдання:

- Провести аналіз теоретичних основ енергоефективності та факторів, що впливають на втрати електроенергії.
- Дослідити структуру системи електропостачання будівлі комунального призначення та визначити її особливості.

- Проаналізувати існуючі методики оцінки енергоефективності та вибрати оптимальну для проведення розрахунків.
- Виконати розрахунок технічних втрат електроенергії в елементах мережі й визначити їх вплив на загальний баланс споживання.
- Оцінити вплив технічного стану обладнання та режимів навантаження на рівень енергетичних втрат.
- Розробити технічні та організаційні заходи щодо підвищення енергоефективності системи електропостачання будівлі.
- Провести економічну оцінку запропонованих заходів і визначити їх окупність.

Наукова новизна роботи полягає у комплексному підході до аналізу енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення з урахуванням впливу технічного стану обладнання, режимів навантаження та можливостей сучасних засобів моніторингу.

Практичне значення отриманих результатів полягає у можливості використання розроблених рекомендацій для підвищення енергоефективності існуючих систем електропостачання, скорочення втрат електроенергії та оптимізації режимів роботи енергетичних об'єктів у комунальній сфері.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та шляхи її удосконалення» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, висновки, список посилань.

РОЗДІЛ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ

1.1. Поняття енергоефективності та її роль у сучасних електроенергетичних системах

Проблема ефективного використання енергетичних ресурсів є однією з ключових у сучасному світі. Зростання обсягів споживання електроенергії, виснаження природних ресурсів і глобальні екологічні виклики сприяють формуванню нових підходів до енергетичного менеджменту та розвитку концепції енергоефективності.

Поняття енергоефективності

Під енергоефективністю розуміють раціональне використання енергетичних ресурсів для забезпечення заданого рівня комфорту, продуктивності чи технологічного процесу з мінімальними витратами енергії. Інакше кажучи, це показник, який характеризує співвідношення між корисно використаною енергією та її загальним споживанням у системі або об'єкті.

В міжнародній практиці енергоефективність визначається як здатність системи, технології або пристрою виконувати задані функції з найменшими енергетичними витратами, без зниження якості результату. Основна мета підвищення енергоефективності - зменшення енергетичних втрат у процесі виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії.

Енергоефективність є багатокомпонентним поняттям, яке включає технічний, економічний, екологічний та організаційний аспекти. Вона охоплює не лише вдосконалення технологічних процесів, але й оптимізацію режимів роботи обладнання, підвищення якості електроенергії, розвиток систем автоматизації та моніторингу енергоспоживання.

Критерії та показники енергоефективності

Оцінка рівня енергоефективності в електроенергетиці здійснюється за низкою показників, серед яких основними є:

- Питоме енергоспоживання - кількість електроенергії, спожитої на одиницю продукції або площі будівлі;
- Коефіцієнт корисної дії (ККД) енергетичного обладнання;
- Коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) - показник, що характеризує ефективність використання електричної енергії;
- Втрати електроенергії в елементах системи електропостачання;
- Енергоемність продукції або послуг - відношення енергетичних витрат до економічного результату.

В системах електропостачання будівель комунального призначення важливим критерієм є також співвідношення спожитої та корисно використаної енергії, що дозволяє оцінити ефективність функціонування електричних мереж, трансформаторів, систем освітлення та інженерних установок.

Роль енергоефективності у сучасних електроенергетичних системах

В сучасних умовах енергоефективність виступає не лише техніко-економічною характеристикою, а й стратегічним напрямом розвитку енергетики. Для держави вона є інструментом зниження енергозалежності, зменшення споживання викопного палива та зниження викидів парникових газів. Для підприємств - це шлях до оптимізації витрат, підвищення конкурентоспроможності та забезпечення стабільного функціонування енергосистем.

В електроенергетичних системах енергоефективність проявляється у таких напрямках:

- оптимізація процесів генерації, передачі та розподілу електроенергії;
- зменшення технічних і комерційних втрат у мережах;
- підвищення коефіцієнта потужності за рахунок компенсації реактивної енергії;
- використання інтелектуальних систем керування (Smart Grid), які забезпечують гнучке управління потоками енергії;

- впровадження енергоощадного обладнання - трансформаторів з низькими втратами холостого ходу, LED-освітлення, частотних перетворювачів у системах вентиляції та насосах;
- застосування автоматизованих систем обліку (АСКОЕ) для точного контролю споживання електроенергії.

Згідно з енергетичною стратегією України, досягнення високого рівня енергоефективності є одним із ключових пріоритетів державної політики в енергетичному секторі. Це відповідає цілям сталого розвитку, визначеним ООН, і сприяє зменшенню енергетичного навантаження на економіку.

Економічна та екологічна значущість енергоефективності

Підвищення енергоефективності має безпосередній економічний ефект - зниження енергетичних витрат, зменшення експлуатаційних витрат і підвищення рентабельності енергетичних систем. Крім того, зниження витрат електроенергії сприяє зменшенню обсягів генерації та, відповідно, викидів вуглецю, що є важливим кроком у напрямку декарбонізації енергетики.

У контексті будівель комунального призначення енергоефективність має ще один важливий аспект - соціальний. Вона забезпечує комфортні умови для перебування людей, стабільну роботу інженерних систем і зменшує навантаження на міську енергетичну інфраструктуру.

Енергоефективність у сучасних електроенергетичних системах є основним чинником їх стабільного розвитку. Вона дозволяє забезпечити економічне, екологічне та надійне функціонування систем електропостачання, підвищити якість електроенергії та знизити енергетичні витрати. Для будівель комунального призначення підвищення енергоефективності має особливе значення, адже саме тут поєднуються високі вимоги до надійності живлення, комфорту та економічності.

Таким чином, реалізація заходів з підвищення енергоефективності є необхідною умовою сталого розвитку енергетичної галузі та ефективного функціонування міської інфраструктури.

1.2. Складові системи електропостачання будівель комунального призначення

Система електропостачання будівель комунального призначення є складною технічною структурою, призначеною для забезпечення безперебійного, надійного та економічного живлення електричною енергією усіх споживачів об'єкта. До таких будівель належать заклади освіти, охорони здоров'я, адміністративні споруди, торговельні та спортивні комплекси, об'єкти житлово-комунального господарства тощо. Особливістю цих систем є наявність різномірних електроприймачів, що працюють у різних режимах та мають різні вимоги до якості електроенергії.

Загальна структура системи електропостачання

Типова система електропостачання будівлі комунального призначення складається з таких основних елементів:

- Введення електроенергії - точка приєднання будівлі до зовнішньої електричної мережі енергопостачальної організації (через кабельну або повітряну лінію).
- Головний розподільчий щит (ГРЩ) - основний вузол прийому та розподілу електроенергії між внутрішніми підсистемами будівлі.
- Трансформаторна підстанція (ТП) або комплектна трансформаторна підстанція (КТП) - здійснює пониження напруги з 6–10 кВ до 0,4 кВ для живлення споживачів низької напруги.
- Розподільчі мережі - система кабельних і шинних ліній, що забезпечує передачу електроенергії від ГРЩ до розподільчих пунктів (РП), щитів поверхів, цехів або зон споживання.
- Розподільчі пункти та щити освітлення (ЩО, ЩС, ЩА) - локальні вузли розподілу електроенергії для окремих груп навантаження: освітлення, вентиляція, опалення, ліфти, насоси, системи автоматики.
- Системи резервного живлення - дизель-генераторні установки (ДГУ), джерела безперебійного живлення (UPS) або акумуляторні батареї, які

забезпечують подачу електроенергії при аварійному відключенні основного джерела.

- Електроприймачі - кінцеві споживачі електричної енергії: освітлювальні прилади, електродвигуни вентиляційних і насосних систем, системи опалення, холодильне обладнання, комп'ютерна техніка тощо.

- Система заземлення та захисного вимкнення - елементи, що забезпечують електробезпеку користувачів і захист обладнання від аварійних струмів.

- Системи автоматизації, контролю та обліку електроенергії (АСКОЕ, SCADA) - призначені для моніторингу, керування та оптимізації режимів роботи системи електропостачання.

Класифікація систем електропостачання будівель

Залежно від категорії надійності електропостачання, будівлі комунального призначення належать переважно до II або I категорії згідно з ПУЕ. Це означає, що відключення електроенергії навіть на короткий час може призвести до збоїв у роботі важливих інженерних систем (наприклад, лікарняне обладнання, системи безпеки чи пожежогасіння).

Тому такі будівлі часто мають два незалежні вводи живлення або резервні джерела, що забезпечують безперебійність енергопостачання.

За рівнем напруги системи поділяють на:

- Системи високої напруги (6–10 кВ) - для живлення трансформаторних підстанцій та великих споживачів;

- Системи низької напруги (0,4 кВ) - для внутрішнього розподілу електроенергії між групами споживачів.

Функціональні підсистеми електропостачання

Система електропостачання будівлі комунального призначення, як правило, включає такі підсистеми:

- Система живлення силового обладнання - забезпечує електроенергією двигуни вентиляційних систем, насосів, компресорів, холодильних агрегатів тощо. Для таких навантажень характерні великі пускові

струми та значна частка реактивної потужності, що потребує встановлення конденсаторних батарей або інших пристроїв компенсації.

➤ Система освітлення - одна з наймасовіших підсистем, що може споживати до 25–40 % загальної електроенергії будівлі. Для підвищення її ефективності застосовують LED-освітлення, автоматичне керування освітленістю та датчики руху.

➤ Система аварійного та евакуаційного освітлення - працює від резервних джерел живлення, забезпечуючи мінімальний рівень освітлення під час аварій або знеструмлення.

➤ Система живлення автоматизації та диспетчеризації - забезпечує керування інженерними мережами, вентиляцією, опаленням, кондиціонуванням, безпекою тощо.

➤ Система резервного електропостачання - необхідна для підтримання роботи критично важливих навантажень (серверних, пожежних систем, систем безпеки, медичного обладнання тощо).

➤ Система захисту та обліку електроенергії - включає апаратуру автоматичного вимкнення, реле, запобіжники, лічильники, комунікаційні модулі для збору даних споживання.

Особливості електропостачання будівель комунального призначення

Велика кількість різномірних споживачів - у межах однієї будівлі функціонують навантаження різної природи: активні (освітлення), індуктивні (електродвигуни) та імпульсні (електроніка). Це ускладнює підтримання стабільних параметрів напруги та частоти.

Нерівномірність графіка навантаження - у робочі години доби споживання може перевищувати середнє значення у 2–3 рази, що вимагає правильного вибору перерізів кабелів, трансформаторів і систем компенсації реактивної потужності.

Високі вимоги до якості електроенергії - для надійної роботи електронного обладнання необхідно обмежити коливання напруги, гармоніки та електромагнітні завади.

Необхідність резервування живлення - критично важливі об'єкти (лікарні, адміністративні центри, торговельні комплекси) потребують дублювання джерел енергії.

Можливість інтеграції відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) - сучасні будівлі часто оснащуються сонячними панелями або гібридними системами, що частково покривають потреби в електроенергії та підвищують енергоефективність.

Система електропостачання будівлі комунального призначення - це багатофункціональний комплекс, що об'єднує елементи приймання, перетворення, розподілу, захисту та обліку електроенергії. Її ефективність визначається надійністю роботи трансформаторних підстанцій, якістю розподільних мереж, станом комутаційного обладнання та правильністю організації електричних навантажень.

Рациональне проектування, своєчасне технічне обслуговування й використання сучасних енергоощадних технологій у складі системи електропостачання дозволяють знизити технічні втрати, підвищити надійність та загальну енергоефективність будівлі комунального призначення.

1.3. Основні показники енергоефективності систем електропостачання

Оцінка енергоефективності систем електропостачання є одним із ключових етапів аналізу їх технічного стану та визначення потенціалу енергозбереження. Для кількісної характеристики ефективності використання електроенергії застосовують систему показників, які відображають рівень втрат, економічність роботи обладнання, відповідність режимів навантаження проектним параметрам і якість поданої електроенергії.

Основними показниками енергоефективності є:

- коефіцієнт корисної дії (ККД) елементів системи,
- коефіцієнт потужності,
- питомі витрати електроенергії,
- втрати електричної енергії в мережах,
- енергоємність споживача або об'єкта,
- індекс енергоефективності (Energy Efficiency Index, EEI),
- якість електроенергії.

1. Коефіцієнт корисної дії (ККД)

ККД (η) - один із базових показників, що характеризує ефективність перетворення або передачі електроенергії. Він визначається як відношення корисно використаної потужності до загальної потужності, спожитої системою або елементом електроустановки:

$$\eta = \frac{P_{\text{вих}}}{P_{\text{вх}}} \cdot 100\% \quad (1.1.)$$

Для систем електропостачання високі значення ККД (понад 95–98 %) свідчать про мінімальні втрати під час передачі енергії по лініях і в трансформаторах. Зниження ККД сигналізує про наявність надлишкових втрат через опір проводів, старіння обладнання або неправильний режим навантаження.

2. Коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$)

Коефіцієнт потужності характеризує співвідношення активної потужності, яка виконує корисну роботу, до повної потужності в електричному колі.

$$\cos\varphi = \frac{P}{S} \quad (1.2.)$$

P - активна потужність, кВт;

S – повна потужність, МВА;

Чим ближче значення $\cos\varphi$ до 1, тим ефективніше використовується електроенергія. Низький коефіцієнт потужності призводить до зростання струмів у мережі, додаткових втрат активної потужності та перевантаження обладнання.

Для будівель комунального призначення нормативне значення $\cos\varphi$ має становити не менше 0,95, а для промислових підприємств - не менше 0,9. Для підтримання цього рівня використовують пристрої компенсації реактивної потужності (конденсаторні батареї, STATCOM, синхронні компенсатори)

3. Втрати електроенергії

Втрати електроенергії - це частина енергії, яка не доходить до кінцевих споживачів унаслідок фізичних процесів у провідниках, трансформаторах та апаратурі. Їх поділяють на технічні та комерційні.

Технічні втрати виникають через електричний опір елементів, магнітні втрати в сталі трансформаторів, струми холостого ходу, нагрівання та несиметрію фаз.

Комерційні втрати пов'язані з похибками обліку, несанкціонованим підключенням і помилками у вимірюванні.

Для оцінки втрат у відсотках застосовують показник:

$$\eta_{\text{вт}} = \frac{\Delta W}{W_{\text{над}}} \cdot 100\% \quad (1.3.)$$

де

ΔW - втрати електроенергії;

$W_{\text{над}}$ - електроенергія, що надійшла в мережу.

Допустимі значення технічних втрат у розподільчих мережах 0,4–10 кВ становлять до 5–8 % залежно від протяжності й завантаження мережі.

4. Питомі витрати електроенергії

Питоме споживання енергії характеризує кількість електроенергії, витраченої на одиницю корисного результату - площу, обсяг або продуктивність.

Для будівель комунального призначення цей показник визначають як:

$$\omega = \frac{W_{\text{заг}}}{F} \quad (1.4.)$$

$W_{\text{заг}}$ - загальне річне споживання електроенергії, кВт·год;

F - площа будівлі або об'єкта, м².

Зменшення питомих витрат є свідченням підвищення ефективності використання електроенергії, модернізації обладнання чи застосування енергоощадних технологій.

5. Енергоємність (Energy Intensity)

Енергоємність відображає витрати електричної енергії на одиницю економічного показника (наприклад, вартості послуг або продукції).

$$E_{\text{ен}} = \frac{W_{\text{спож}}}{Q} \quad (1.5.)$$

$W_{\text{спож}}$ - спожита електроенергія, кВт·год;

Q - обсяг продукції або послуг у грошовому вираженні, грн.

Чим менше значення енергоємності, тим вищий рівень енергоефективності об'єкта. У комунальній сфері цей показник відображає ефективність використання електроенергії при наданні комунальних послуг (освітлення, водопостачання, вентиляція тощо).

6. Індекс енергоефективності (EEI)

Індекс енергоефективності використовується для інтегральної оцінки рівня енергозбереження. Він визначає співвідношення фактичного споживання електроенергії до базового (еталонного) рівня для аналогічних об'єктів:

$$EEI = \frac{W_{\phi}}{W_{\text{б}}} \cdot 100\% \quad (1.6.)$$

W_{ϕ} - фактичне споживання електроенергії;

$W_{\text{б}}$ - базове або нормативне споживання.

Якщо $EEI < 100\%$, це свідчить про високий рівень енергоефективності; якщо $EEI > 100\%$, об'єкт споживає енергії більше за норму. Цей показник широко застосовується для оцінки будівель, лікарень, шкіл, адміністративних центрів тощо.

7. Показники якості електроенергії

Якість електроенергії безпосередньо впливає на ефективність роботи електроустановок. До основних параметрів належать:

➤ відхилення та коливання напруги;

- коефіцієнт несинусоїдальності струму та напруги;
- несиметрія фазних напруг;
- частота коливань напруги (флікер).

Підтримання параметрів якості в межах, установлених стандартами ДСТУ EN 50160:2014 і ДСТУ 13109-97, є важливою умовою надійної та економічної роботи систем електропостачання.

8. Комплексна оцінка енергоефективності

Для всебічного аналізу ефективності системи електропостачання застосовується інтегральний показник енергоефективності, який враховує сукупність часткових критеріїв (ККД, втрати, $\cos\varphi$, EEI, якість енергії).

Інтегральна оцінка дозволяє:

- виявити «вузькі місця» системи;
- визначити пріоритетні напрями модернізації;
- обґрунтувати техніко-економічні рішення щодо підвищення ефективності електропостачання.

Основні показники енергоефективності систем електропостачання відображають рівень раціонального використання електричної енергії та стан елементів енергомережі. Високі значення ККД, коефіцієнта потужності, низькі втрати й оптимальні питомі витрати свідчать про ефективну роботу системи.

Комплексна оцінка енергоефективності дає змогу не лише кількісно визначити рівень енергоспоживання, а й розробити цільові заходи з його оптимізації, що має важливе значення для будівель комунального призначення, де електроенергія є основним ресурсом для забезпечення комфорту, безпеки та надійності функціонування.

1.4. Види та причини втрат електроенергії в системах електропостачання

Системи електропостачання є основною ланкою між джерелами електричної енергії та споживачами. Під час передавання й розподілу електроенергії частина її неминуче втрачається внаслідок фізичних процесів,

які відбуваються у провідниках, трансформаторах, апаратах комутації, а також через недосконалість систем обліку. Втрати електроенергії впливають на економічну ефективність, надійність і стабільність роботи електричних мереж, тому їх аналіз і зниження мають важливе значення для енергетичних систем.

1. Класифікація втрат електроенергії

В системах електропостачання втрати електроенергії за своєю природою поділяються на дві основні групи:

Технічні втрати - це втрати, зумовлені фізичними процесами в елементах мережі, які відбуваються під час нормальної експлуатації системи. Вони є неминучими, але можуть бути мінімізовані завдяки оптимізації режимів роботи, вибору відповідних параметрів обладнання та його технічному вдосконаленню.

Комерційні втрати - це невраховані обсяги електроенергії, що виникають через похибки вимірювальних приладів, недосконалість систем обліку або несанкціоноване споживання електроенергії. Такі втрати є результатом організаційних і технічних недоліків і не мають фізичного характеру.

2. Технічні втрати електроенергії

2.1. Втрати в лініях електропередачі

Найбільша частка технічних втрат припадає на проводи ліній електропередач, де електроенергія втрачається внаслідок нагрівання провідників через їх активний опір:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (1.7.)$$

де:

I - струм у фазі, А;

R - активний опір проводу однієї фази, Ом.

Чим більша довжина лінії та струм навантаження, тим більші втрати. Зменшити їх можна шляхом підвищення напруги передавання, вибору проводів більшого перерізу або скорочення протяжності ліній.

До інших причин втрат у лініях належать:

- нагрів контактних з'єднань і муфт;

- несиметрія фазних навантажень;
- втрати в ізоляції кабелів;
- струми витоку в старих або пошкоджених лініях.

2.2. Втрати в трансформаторах

Втрати в трансформаторах поділяються на:

- Втрати холостого ходу (ΔP_0) - зумовлені намагнічуванням осердя і не залежать від навантаження;
- Втрати короткого замикання (ΔP_k) - пов'язані з нагріванням обмоток під час протікання струму навантаження.

Загальні втрати трансформатора визначаються виразом:

$$\Delta P_{\text{тр}} = \Delta P_0 + \Delta P_k \cdot \left(\frac{S_{\phi}}{S_n}\right)^2 \quad (1.8.)$$

де S_{ϕ} - фактична потужність навантаження, S_n - номінальна потужність трансформатора.

Найчастіше підвищені втрати виникають через роботу трансформатора з низьким коефіцієнтом завантаження (менше 0,3–0,4) або через старіння ізоляції, що збільшує магнітні втрати.

2.3. Втрати в апаратах і пристроях

У комутаційних апаратах (автоматах, контакторах, рубильниках), шинопроводах, реакторах і дроселях виникають втрати, пов'язані з опором контактів, вихровими струмами в металевих частинах і наявністю реактивної складової струму.

Хоча ці втрати є порівняно невеликими, їх сумарний вплив у великих системах може бути відчутним.

2.4. Втрати від реактивної потужності

Реактивна потужність не виконує корисної роботи, проте спричиняє додаткові втрати активної енергії через збільшення струму в мережі.

Залежність втрат від реактивної потужності описується рівнянням:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 R = 3 \cdot \left(\frac{P^2 + Q^2}{U^2}\right) \cdot R \quad (1.9.)$$

де P - активна, Q - реактивна потужність, U - напруга.

Таким чином, підвищений рівень реактивної потужності (низький коефіцієнт потужності) є однією з основних причин зростання втрат у розподільчих мережах.

3. Комерційні втрати електроенергії

Комерційні втрати є результатом невідповідності між фактично спожитою та облікованою електроенергією. Їх частка може сягати 2–5 % від загального обсягу переданої енергії. Основні причини такі:

Похибки приладів обліку - несправність лічильників, неправильне підключення трансформаторів струму або напруги, старіння вимірювальних елементів.

Несанкціоноване підключення до мережі - використання електроенергії поза обліком або втручання у схему лічильника.

Помилки персоналу - неточності при знятті показників, розрахунках балансу електроенергії або формуванні звітності.

Відсутність автоматизованих систем обліку (АСКОЕ), що ускладнює своєчасне виявлення невідповідностей у даних споживання.

Для зменшення комерційних втрат застосовують сучасні електронні прилади обліку, системи дистанційного моніторингу та аналітичні алгоритми виявлення аномалій споживання.

4. Інші види втрат

Окрім основних груп, у системах електропостачання можуть спостерігатися:

- втрати від несиметрії навантажень - призводять до появи додаткових струмів у нульових провідниках;
- втрати через гармонічні спотворення - спричинені нелінійними навантаженнями (комп'ютери, частотні перетворювачі, LED-драйвери);
- втрати під час аварійних і перехідних процесів - короткі замикання, пуски великих двигунів, вмикання/вимикання потужних навантажень.

Такі втрати мають імпульсний або короткочасний характер, але при систематичному виникненні знижують загальну ефективність роботи мережі.

5. Структура загальних втрат у системах електропостачання

Типова структура втрат електроенергії у системах 0,4–10 кВ наведена нижче:

Таблиця 1.1. – Типова структура втрат електроенергії у системах 0,4–10 кВ

Джерело втрат	Частка від загальних втрат, %
Лінії електропередач	40–60
Трансформатори	20–30
Розподільчі пристрої, апаратура	5–10
Реактивна потужність	10–15
Комерційні втрати	2–5

Як видно з таблиці, основний внесок у втрати становлять лінійні ділянки та трансформатори. Саме тому основні заходи з енергозбереження спрямовані на зниження опорів, покращення завантаження трансформаторів і компенсацію реактивної потужності.

6. Причини підвищених втрат електроенергії

Основні причини зростання втрат у системах електропостачання можна об'єднати у три групи:

а) Технічні:

- використання застарілого або зношеного обладнання;
- невідповідність перерізів проводів і кабелів фактичним струмам

навантаження;

- надмірні довжини ліній;
- неефективне керування режимами роботи трансформаторів.

б) Експлуатаційні:

- перевантаження окремих ділянок мережі;
- порушення фазного балансу;

- робота з низьким коефіцієнтом потужності;
- поганий контакт у з'єднаннях, окислення контактів, перегрів тощо.

в) Організаційні:

- недосконалий облік споживання;
- відсутність систем моніторингу втрат;
- неефективне планування ремонтів і профілактичних перевірок;
- низька культура енергоспоживання серед персоналу та користувачів.

Втрати електроенергії в системах електропостачання є комплексним показником, що відображає як технічний стан мережі, так і рівень організації її експлуатації. Основну частину втрат становлять технічні втрати в лініях і трансформаторах, а також додаткові втрати, спричинені реактивною потужністю та несиметрією навантаження.

Зменшення втрат можливе лише за умови системного підходу, який передбачає технічну модернізацію, оптимізацію режимів роботи, компенсацію реактивної потужності, автоматизацію обліку та підвищення дисципліни енергоспоживання.

Таким чином, управління втратами є ключовим напрямом підвищення енергоефективності сучасних систем електропостачання.

1.5. Огляд нормативної бази України та міжнародних стандартів з енергоефективності

Енергоефективність є одним із головних стратегічних напрямів розвитку енергетичного сектору України, що визначається не лише технічними, але й правовими та організаційними механізмами. Для забезпечення єдності вимог і гармонізації з міжнародними практиками в Україні формується комплексна нормативно-правова база у сфері енергозбереження, електропостачання та підвищення енергоефективності будівель.

1. Нормативно-правова база України з енергоефективності

В Україні діє низка законів, підзаконних актів і нормативних документів, що регулюють питання раціонального використання енергетичних ресурсів, підвищення ефективності споживання електроенергії та управління енергетичними ресурсами. Основними серед них є такі:

1.1. Закони України

➤ Закон України «Про енергозбереження» (1994 р., із подальшими змінами) - базовий документ, який визначає основні принципи державної політики у сфері енергозбереження, встановлює вимоги до енергоефективності обладнання, будівель та технологічних процесів.

➤ Закон України «Про енергоефективність» (2021 р.) - спрямований на реалізацію європейських підходів до енергоменеджменту, запровадження системи енергетичних аудитів, енергетичних сертифікатів будівель і механізмів енергосервісу (ЕСКО).

➤ Закон України «Про ринок електричної енергії» (2017 р.) - встановлює основи функціонування ринку електроенергії, принципи енергетичної прозорості та обов'язковість комерційного обліку електроенергії.

➤ Закон України «Про комерційний облік теплової енергії та водопостачання» (2017 р.) - регулює питання вимірювання та моніторингу споживання енергоресурсів у будівлях.

➤ Закон України «Про енергетичну ефективність будівель» (2017 р.) - встановлює вимоги до сертифікації будівель, проведення енергетичних аудитів і визначення класів енергоефективності об'єктів.

1.2. Підзаконні акти та програми

Енергетична стратегія України до 2050 року - визначає довгострокові цілі скорочення енергоспоживання, інтеграції з енергетичним простором ЄС та розвитку відновлюваної енергетики.

Національний план дій з енергоефективності (НПДЕЕ) - містить конкретні заходи з енергозбереження у промисловості, транспорті, житлово-комунальному господарстві.

Державні будівельні норми (ДБН):

- ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» - регламентує вимоги до теплотехнічних характеристик огорожувальних конструкцій;
- ДБН В.2.5-23:2020 «Електрообладнання» - визначає вимоги до проектування систем електропостачання з урахуванням енергоефективності;
- ДБН В.2.5-67:2013 «Опалення, вентиляція і кондиціонування» - містить положення щодо раціонального використання енергоресурсів у системах життєзабезпечення будівель.

1.3. Технічні стандарти та нормативи

- ДСТУ ISO 50001:2020 «Системи енергетичного менеджменту» - установлює вимоги до впровадження систем енергоменеджменту на підприємствах і в організаціях.
- ДСТУ EN 16247-1:2015 «Енергетичні аудити» - описує процедури проведення енергетичного обстеження будівель та електричних мереж.
- ДСТУ ISO 14001:2015 «Системи екологічного менеджменту» - інтегрує енергетичні аспекти з екологічними вимогами.
- ДСТУ EN 15232:2018 - регламентує енергоефективність будівель через автоматизацію систем управління (BMS, BAS).

2. Міжнародні стандарти та директиви у сфері енергоефективності

Українська система стандартів гармонізується з вимогами Європейського Союзу та міжнародних організацій - ISO, IEC, CEN/CENELEC, IEA. Основними документами є:

2.1. Європейські директиви ЄС

Директива 2012/27/EU «Про енергоефективність» - встановлює загальні рамки політики ЄС у сфері енергозбереження, зобов'язує держави-члени запроваджувати національні плани енергоефективності.

Директива 2010/31/EU «Про енергоефективність будівель» (EPBD) - регулює вимоги до енергетичних характеристик нових і реконструйованих будівель, обов'язковість сертифікації та впровадження енергетичних паспортів.

Директива 2009/125/ЕС - визначає екодизайн обладнання, що споживає енергію (трансформаторів, двигунів, освітлювальних приладів).

Директива 2018/2002/EU (оновлення 2012/27/EU) - запроваджує більш амбітні цілі скорочення енергоспоживання до 2030 року (щонайменше на 32,5 % порівняно з базовим рівнем).

2.2. Міжнародні стандарти ISO та IEC

ISO 50001:2018 - визначає загальні вимоги до створення системи енергетичного менеджменту (EnMS).

ISO 50002:2014 - встановлює методи проведення енергетичних аудитів.

IEC 60034-30-1:2020 - класифікує енергоефективність електродвигунів за класами IE1–IE4.

IEC 60364-8-1:2019 - регулює енергоефективність електроустановок низької напруги, включаючи вибір обладнання та режими його роботи.

3. Гармонізація української нормативної бази з міжнародними вимогами

Україна, як член Енергетичного Співтовариства ЄС, поступово гармонізує своє законодавство з європейським енергетичним правом. Зокрема:

- здійснюється впровадження стандартів ISO 50001 та EN 16247 у практику енергетичного аудиту будівель і підприємств;
- оновлюються ДБН із урахуванням вимог EPBD щодо мінімального рівня енергетичної ефективності;
- впроваджується система енергетичної сертифікації будівель із визначенням класів енергоспоживання;
- розробляються національні методики розрахунку енергетичних показників і баз даних для енергетичного моніторингу.

Гармонізація з європейськими директивами дозволяє підвищити конкурентоспроможність українських підприємств, поліпшити енергетичну безпеку держави та створити умови для залучення міжнародних інвестицій у сферу енергоефективності.

4. Практичне значення нормативної бази

Наявність розвиненої нормативної бази забезпечує:

- єдність підходів до оцінювання енергоефективності;
- прозорість обліку і контролю за споживанням енергії;
- правові механізми для впровадження енергосервісних контрактів;
- інтеграцію України до європейського енергетичного простору.

Для систем електропостачання будівель комунального призначення ці документи мають особливе значення, оскільки регламентують вимоги до проєктування, експлуатації, моніторингу споживання та впровадження енергозберігаючих технологій.

Нормативно-правова база України в галузі енергоефективності активно розвивається і поступово гармонізується з європейськими директивами та міжнародними стандартами ISO та IEC. Основні акценти зроблено на створенні систем енергетичного менеджменту, запровадженні енергетичної сертифікації будівель, модернізації інфраструктури обліку та підвищенні відповідальності споживачів за раціональне використання енергії.

Відповідність національних норм міжнародним вимогам забезпечує підвищення ефективності функціонування систем електропостачання, зменшення втрат електроенергії та сприяє переходу України до сталого, ресурсоефективного розвитку.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

В першому розділі роботи було проведено теоретичний аналіз основних аспектів енергоефективності систем електропостачання, визначено її сутність, складові, показники та нормативно-правові засади забезпечення ефективного використання електричної енергії.

В результаті дослідження встановлено, що енергоефективність є комплексною характеристикою, яка відображає рівень раціонального використання енергетичних ресурсів у процесах виробництва, передачі, розподілу та споживання електроенергії. Вона безпосередньо впливає на економічну стабільність енергетичних систем, екологічну безпеку та стійкість розвитку комунальної інфраструктури.

Розглянуто структуру систем електропостачання будівель комунального призначення, до складу яких входять джерела живлення, трансформаторні підстанції, розподільчі мережі, силові та освітлювальні установки, системи автоматизації та контролю. Ефективність роботи кожного елемента визначає загальний рівень енергетичних втрат та стабільність електропостачання споживачів.

Проаналізовано основні показники енергоефективності - коефіцієнт корисної дії, коефіцієнт потужності, питомі витрати електроенергії, втрати в елементах мережі, енергоємність і показники якості електроенергії. Визначено, що саме ці параметри дозволяють кількісно оцінити рівень ефективності системи та визначити напрями її вдосконалення.

Досліджено види та причини втрат електроенергії, які поділяються на технічні (втрати в лініях, трансформаторах, апаратах, через реактивну потужність) та комерційні (невраховані обсяги споживання, похибки обліку, несанкціоновані підключення). Встановлено, що основним джерелом втрат є лінійні та трансформаторні ділянки мереж, тому першочерговими заходами є компенсація реактивної потужності, оптимізація навантаження і модернізація обладнання.

Проведено аналіз нормативної бази України та міжнародних стандартів у сфері енергоефективності. Показано, що законодавство України активно гармонізується з вимогами ЄС та міжнародними документами ISO, IEC і директивами Європейського Парламенту (зокрема 2012/27/EU та 2010/31/EU). Це створює передумови для інтеграції України до європейського енергетичного простору та підвищення конкурентоспроможності енергетичної галузі.

Загалом, у межах першого розділу підтверджено, що підвищення енергоефективності систем електропостачання є необхідною умовою сталого розвитку енергетики, зниження втрат електроенергії та забезпечення надійної роботи мереж комунального призначення. Теоретичні положення, розглянуті в цьому розділі, створюють основу для подальших аналітичних і розрахункових досліджень, спрямованих на виявлення резервів енергозбереження та оптимізацію режимів роботи систем електропостачання.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ СУЧАСНИХ МЕТОДІВ ОЦІНКИ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ

2.1. Методичні підходи до оцінки енергоефективності електричних мереж

Оцінка енергоефективності електричних мереж є важливою складовою аналізу їх технічного стану, рівня втрат електроенергії та можливостей для оптимізації режимів роботи. Вона базується на поєднанні технічних, економічних та енергетичних показників, що дозволяють комплексно визначити ефективність використання електроенергії у системі розподілу.

1. Загальні принципи оцінки енергоефективності

Методична основа оцінки енергоефективності передбачає:

- визначення рівня втрат електроенергії в елементах системи;
- оцінювання коефіцієнта потужності та режимів навантаження;
- аналіз питомих витрат електроенергії на передачу та розподіл;
- порівняння фактичних показників із нормативними або базовими значеннями;
- визначення резервів енергозбереження на основі результатів аудиту.

Основною метою є кількісна характеристика того, наскільки ефективно система електропостачання виконує свої функції при мінімальних енергетичних втратах.

2. Підходи до оцінки енергоефективності

2.1. Енергетичний підхід

Енергетичний підхід ґрунтується на аналізі енергетичного балансу системи. Він дозволяє визначити співвідношення між енергією, що надходить у мережу, і енергією, яка реально передається споживачам.

Баланс можна подати рівнянням:

$$W_{\text{над}} = W_{\text{відп}} + \Delta W \quad (2.1.)$$

де:

$W_{\text{над}}$ - електроенергія, що надійшла в мережу, кВт·год;

$W_{\text{відп}}$ - електроенергія, відпущена споживачам, кВт·год;

ΔW - втрати електроенергії, кВт·год.

Коефіцієнт енергетичної ефективності (КЕЕ) визначається як:

$$K_{\text{е.еф.}} = \frac{W_{\text{відп}}}{W_{\text{над}}} = 1 - \frac{\Delta W}{W_{\text{над}}} \quad (2.2.)$$

Значення цього коефіцієнта характеризує частку корисно використаної енергії. Для ефективних систем КЕЕ має перевищувати 0,95.

2.2. Техніко-економічний підхід

Техніко-економічний підхід передбачає оцінку енергоефективності за економічними показниками - вартістю втрат, собівартістю переданої електроенергії та окупністю заходів із модернізації.

Основний показник - питомі втрати енергії на одиницю переданої потужності:

$$p_{\text{вт}} = \frac{\Delta W}{W_{\text{відп}}} \cdot 100\% \quad (2.3.)$$

Економічна ефективність визначається через відношення економії електроенергії до витрат на заходи енергозбереження:

$$E_{\text{ек}} = \frac{(W_{\text{до}} - W_{\text{після}}) \cdot C_{\text{е}}}{K_{\text{вкл}}} \quad (2.4.)$$

$W_{\text{до}}, W_{\text{після}}$ - поживання електроенергії до та після впровадження заходів, кВт·год;

$C_{\text{е}}$ - тариф на електроенергію, грн/кВт·год;

$K_{\text{вкл}}$ - капітальні вкладення у модернізацію, грн.

Якщо $E_{\text{ек}} > 1$, заходи вважаються доцільними з економічної точки зору.

2.3. Ексергетичний (термодинамічний) підхід

Цей підхід ґрунтується на аналізі якості енергетичних потоків, а не лише їх кількості.

Поняття ексергії відображає частину енергії, яку можна перетворити на корисну роботу. У системах електропостачання ексергетичний ККД визначається як:

$$\eta_{\text{екс}} = \frac{E_{\text{вих}}}{E_{\text{вх}}} \quad (2.5.)$$

Такий підхід дозволяє оцінити не лише втрати енергії, але й недовикористання потенціалу обладнання, що особливо актуально для систем із великими резервами навантаження (трансформаторів, ліній, компенсаторів).

2.4. Порівняльний (бенчмаркінговий) підхід

Порівняльний підхід передбачає зіставлення фактичних показників енергоефективності з еталонними (базовими) для аналогічних об'єктів.

Використовується індекс енергоефективності (EEI):

$$EEI = \frac{W_{\phi}}{W_{\text{норм}}} \cdot 100\% \quad (2.6.)$$

де W_{ϕ} - фактичне споживання електроенергії,

$W_{\text{норм}}$ - нормативне або проектне споживання.

Якщо $EEI < 100\%$, система працює ефективніше за середній рівень; якщо $EEI > 100\%$, має місце перевитрата енергії.

Цей метод особливо ефективний для будівель комунального призначення, де існують нормативи питомого енергоспоживання (кВт·год/м²·рік).

2.5. Аудиторський (енергетичний аудит)

Метод енергетичного аудиту базується на комплексному вимірюванні, аналізі та моделюванні енергопотоків у мережі.

Енергетичний аудит включає:

- Збір технічних даних про систему електропостачання;
- Вимірювання споживаної потужності, напруги, коефіцієнта потужності;
- Визначення втрат за сегментами мережі;
- Аналіз ефективності трансформаторів і компенсуючих пристроїв;
- Розроблення рекомендацій щодо підвищення енергоефективності.

Результатом є звіт із визначенням потенціалу енергозбереження ($\Delta W_{\text{пот}}$), тобто обсягу енергії, який можна зекономити без втрати функціональності системи.

3. Основні показники для комплексної оцінки енергоефективності мереж

Для кількісного аналізу енергоефективності електричних мереж застосовують такі показники:

№	Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Характеристика
1	Коефіцієнт корисної дії мережі	η	%	Відображає частку корисно переданої енергії
2	Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	—	Показує ефективність використання повної потужності
3	Втрати електроенергії	$\Delta W / W_{\text{над}}$	%	Визначає частку втраченої енергії
4	Питомі витрати енергії	w	кВт·год/м ² або кВт·год/кВт	Визначає енергоємність системи
5	Індекс енергоефективності	EEl	%	Порівняння фактичних і нормативних витрат
6	Інтегральний показник енергоефективності	$K_{\text{інт}}$	—	Узагальнена оцінка з урахуванням усіх параметрів

Комплексна оцінка передбачає розрахунок інтегрального коефіцієнта енергоефективності:

$$K_{\text{інт}} = \sum_{i=1}^n w_i \cdot k_i \quad (2.7.)$$

де w_i - ваговий коефіцієнт важливості i -го показника,

k_i - нормалізоване значення показника.

Такий підхід дозволяє врахувати вплив усіх факторів і забезпечити об'єктивну оцінку стану мережі.

4. Практичне значення методичних підходів

Застосування методичних підходів до оцінки енергоефективності дає змогу:

- виявити ділянки мережі з найбільшими втратами електроенергії;

- визначити ефективність роботи трансформаторів і компенсуючих пристроїв;
- оцінити вплив навантаження на рівень втрат;
- обґрунтувати економічну доцільність заходів з енергомодернізації;
- сформувати систему енергоменеджменту на підприємстві або в установі.

В результаті проведення комплексної оцінки формується інформаційна база для прийняття рішень щодо оптимізації режимів роботи електричних мереж і зниження енергетичних витрат.

Методичні підходи до оцінки енергоефективності електричних мереж охоплюють енергетичний, техніко-економічний, експертний, порівняльний та аудиторський методи. Кожен із них має власну сферу застосування та інформативність, проте їх комплексне використання забезпечує повну картину енергетичного стану системи.

Оптимальна методика оцінки повинна враховувати технічні характеристики мережі, тип споживачів, режими навантаження та якість електроенергії. Застосування таких підходів дозволяє визначити реальний рівень енергоефективності, обґрунтувати напрями модернізації й підвищити економічну результативність функціонування систем електропостачання.

2.2. Розрахункові та експериментальні методи визначення втрат електроенергії

В пункті наведено класифікацію, математичні формули та методику застосування основних розрахункових і експериментальних підходів до визначення втрат електроенергії в енергетичних системах. Виклад розрахований на включення до магістерської роботи: містить опис методів, алгоритм проведення експерименту, обробки даних і оцінки похибок.

2.2.1. Класифікація втрат та загальна ідея вимірювань

Технічні втрати - обумовлені електрофізичними процесами:

- активні втрати в провідниках (загальні $I^2 \cdot R$);
 - втрати в трансформаторах: холості (P_0) та навантажувальні (обмоткові, P_{Cu});
 - реактивні втрати, шкідливий вплив гармонік, втрати у сталі тощо.
- Нетехнічні (комерційні) втрати - не пов'язані з фізичними втратами енергії в елементах мережі:
- крадіжки (втручання в облік);
 - похибки вимірювальних приладів;
 - невраховане власне споживання (наприклад, трансформаторні підстанції, станції обслуговування).

Енергетичний баланс (базовий метод топ-даун):

$$P_{loss} = P_{in} - P_{delivered} - P_{own} - P_{unbilled} \quad (2.8.)$$

де P_{in} - енергія, отримана від джерел/підстанцій;

$P_{delivered}$ - енергія, відпущена споживачам;

P_{own} - власні потреби;

$P_{unbilled}$ - неврахована/безоплатна енергія.

2.2.2. Розрахункові методи

А. Елементарний фізичний підхід (I^2R)

Для провідних елементів (лінії, кабелі, обмотки трансформатора):

$$P_{loss,elem} = I_{rms}^2 \cdot R(T) \quad (2.9.)$$

де $R(T)$ - опір при температурі T (може коригуватися за температурною залежністю).

Для трифазної лінії з рівномірним струмом:

$$P_{loss,line} = 3 \cdot I^2 \cdot R_{ph} \quad (2.10.)$$

В. Втрати в трансформаторі

Розділяються на:

Холості втрати P_0 - вимірюються при номінальній напрузі на холостому ході.

Втрати при навантаженні (обмоткові) P_{Cu} - пропорційні I^2 і можуть бути наведені як $P_{Cu,nom} \cdot (I/I_{ном})^2$.

Загальні втрати трансформатора:

$$P_{tr} = P_0 + P_{Cu,nom} \cdot (I/I_{ном})^2 \quad (2.11)$$

С. Метод сегментації (bottom-up)

Розбити мережу на елементи (лінії, трансформатори, підстанції).

Для кожного елемента розрахувати втрати за типом (I^2R), трансформаторні формули).

Просумувати: $P_{loss,total} = \sum P_{loss,elem}$.

Перевага: дозволяє локалізувати проблемні ділянки. Недолік: потребує точних даних про струми, опори і профілі навантаження.

Д. Статистичні та регресійні методи

Використовуються для апроксимації залежності втрат від навантаження: наприклад, представити втрати як квадратичну функцію від потужності P або струму I :

$$P_{loss} = a + b \cdot P + c \cdot P^2 \quad (2.12.)$$

де коефіцієнти a, b, c визначаються методом найменших квадратів на основі вимірних даних.

Застосування мультиваріантної регресії для урахування температури, напруги, гармонік.

Е. Метод енергетичного балансу на часових інтервалах

Для кожного інтервалу Δt :

$$E_{loss}(\Delta t) = E_{in}(\Delta t) - E_{out}(\Delta t) - E_{own}(\Delta t) \quad (2.13.)$$

де енергії підсумовують за лічильниками або вимірювальними пристроями. Метод дає сумарні втрати з урахуванням всіх джерел похибки.

2.2.3. Експериментальні методи та методика проведення вимірювань

А. Типи інструментів і вимірювань

1. Одно- та багатофункціональні енергоаналізатори (power analyzers) - вимір напруги, струму, активної і реактивної потужності, коефіцієнта

потужності, гармонік; можуть реєструвати дані з високою роздільною здатністю.

2. Реєструючі лічильники (smart meters, PMU) - довготривала реєстрація енергетичних показників.

3. Кліп-кроумметри (струмові кліщі) - для контролю струмів під час швидких перевірок.

4. Калібровані ватметри/реєстратори для точних точкових вимірювань.

5. Термометрія - для визначення температурної корекції опорів.

6. Спеціальні методи для трансформаторів - холостий хід, коротке замикання (нагрузочні випробування) та калориметричні методи (для великих трансформаторів).

В. План експерименту (рекомендована послідовність)

1. Планування:

➤ визначити мету (загальні втрати, втрати на конкретній підстанції, нетехнічні втрати);

➤ вибрати точки контролю (генераторний вузол, вводи підстанцій, кінці фідерів);

➤ підготувати інструменти і процедури калібрування.

2. Калібрування приладів - обов'язкове перед початком вимірювань.

3. Встановлення обладнання і синхронізація часу - якщо дані з кількох приладів згодом зшиватимуться, потрібна синхронізація (GPS-час або NTP).

4. Вимірювання:

➤ тривалість: мінімум один повний цикл навантаження (добовий цикл); для більш точного розподілу - декілька тижнів або місяць;

➤ вимірювати напругу, струм, фазові кути, коефіцієнти потужності, гармоніки;

➤ для трансформаторів: провести окремі випробування холостого ходу і короткого замикання, якщо можливо.

5. Додаткові випробування:

- нічні вимірювання (малий навантажувальний режим) для виділення базових втрат;
- пускові/максимальні режими для оцінки нелінійних ефектів.

6. Збір і резервне копіювання даних.

С. Обробка даних

1. Попередня фільтрація: видалення очевидних сплесків і збоїв, корекція часових зсувів.
2. Розподіл по інтервалах (наприклад, 15-хв, 1 год) і інтегрування для отримання енергії.
3. Розрахунок сумарних втрат по формулі енергетичного балансу або сумування по елементах.
4. Розділення технічних і нетехнічних втрат:
 - технічні: за розрахунковими моделями (I^2R , трансформаторні залежності) і / або за результатами прямого виміру елементів;
 - нетехнічні: як різниця між сумарними (енергетичний баланс) і технічними втратами.
5. Регресійний аналіз для побудови емпіричних залежностей втрат від навантаження, температури тощо.

Д. Оцінка невизначеності (похибок)

Для вимірювань потужності і струму використовують методи поширення похибок. Якщо вимірювані величини x, y з похибками σ_x, σ_y , то для функції $f(x, y)$ оцінка похибки дається:

$$\sigma_f = \sqrt{\left(\frac{df}{dx} \cdot \sigma_x\right)^2 + \left(\frac{df}{dy} \cdot \sigma_y\right)^2} \quad (2.14.)$$

При оцінці втрат, наприклад $P_{loss} = I^2 \cdot R$, похибка:

$$\frac{\sigma_P}{P} \approx \sqrt{\left(2 \cdot \frac{\sigma_I}{I}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_R}{R}\right)^2} \quad (2.15.)$$

Необхідно врахувати похибки калібрування, часової синхронізації, квантових і випадкових помилок приладів.

2.2.4. Спеціальні методи та рекомендації

А. Визначення нетехнічних втрат

Top-down (енергетичний баланс) - швидкий шлях для визначення сумарних нетехнічних втрат: різниця між вхідною енергією і сумою легальних відпусків та технічних втрат.

Bottom-up (огляд споживачів) - обстеження і порівняння лічильників, вибіркові аудити, розрахунок неврахованих витрат на конкретних точках.

Інтелектуальні алгоритми - виявлення аномалій у профілях споживання, кластерний аналіз, машинне навчання для виявлення можливих випадків крадіжок.

В. Врахування гармонік і нелінійних ефектів

При наявності значних гармонік (несинусоїдальні струми/напруги) класична формула $I^2 \cdot R$ має застосовуватися з використанням ефективного значення струму I_{rms} з урахуванням гармонік та перехідних процесів.

2.2.5. Приклад структурованого алгоритму (для включення у методичку магістерської роботи)

1. Збір початкових даних (паспорти трансформаторів, опори ліній, показники лічильників).
2. Планування експерименту: відбір контрольних точок, тип і кількість приладів, тривалість вимірювань.
3. Калібрування та встановлення приладів.
4. Збір даних протягом запланованого періоду.
5. Попередня обробка: фільтрація, синхронізація.
6. Розрахунок втрат методом енергетичного балансу по інтервалах.
7. Розрахунок технічних втрат методом сегментації ($I^2 \cdot R$, трансформаторні формули).
8. Визначення нетехнічних втрат як різниці (пункт 6 - пункт 7).
9. Оцінка невизначеності результатів та аналіз чутливості.
10. Формування висновків і рекомендацій для зменшення втрат.

Розрахункові та експериментальні методи доповнюють один одного: розрахунки дають можливість деталізувати джерела технічних втрат і планувати експерименти, а експериментальні дані - служать для валідації моделей і виявлення нетехнічних втрат. Для магістерської роботи рекомендовано комбінований підхід: детальний елементний розрахунок у поєднанні з принаймні місяцем реєстрації параметрів у ключових точках мережі, з обов'язковою оцінкою похибок.

2.3. Використання автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання

В сучасних енергетичних системах важливим інструментом забезпечення енергоефективності та зниження втрат електроенергії є автоматизовані системи моніторингу та обліку енергоспоживання (АСМОЕ). Такі системи дозволяють у реальному часі збирати, передавати, обробляти та аналізувати інформацію про електричні параметри мережі, що забезпечує оперативний контроль технічного стану обладнання, виявлення аномалій і формування звітності для оптимізації енергоспоживання.

2.3.1. Призначення та основні завдання АСМОЕ

Основною метою впровадження АСМОЕ є підвищення ефективності управління електроенергетичними ресурсами за рахунок цифровізації процесів обліку та контролю.

Основні завдання системи:

1. Безперервний моніторинг параметрів електроенергії (струм, напруга, активна/реактивна потужність, частота, гармоніки).
2. Автоматичний збір та збереження даних з приладів обліку (лічильників, сенсорів, контролерів).
3. Формування енергетичних балансів для різних рівнів ієрархії (об'єкт, підстанція, філія, підприємство).
4. Виявлення втрат електроенергії - як технічних, так і нетехнічних (зокрема, через несанкціоноване споживання).

5. Аналіз режимів навантаження для оптимізації графіків роботи обладнання.
6. Інтеграція з системами управління (SCADA, ERP, BMS) для формування єдиної інформаційної бази.
7. Підтримка енергетичного менеджменту відповідно до вимог стандартів ISO 50001.

2.3.2. Структура автоматизованої системи моніторингу

Типова архітектура АСМОЕ має три рівні:

1. Польовий рівень (вимірювальний)

- інтелектуальні лічильники (smart meters);
- датчики напруги, струму, температури, потужності;
- локальні контролери збору даних (data concentrators).

2. Комунікаційний рівень (канали зв'язку)

- дротові інтерфейси: RS-485, Ethernet, Modbus TCP/RTU;
- бездротові: GSM/GPRS, LTE, LoRaWAN, ZigBee, Wi-Fi;
- протоколи передачі: DLMS/COSEM, IEC 60870-5-104, MQTT тощо.

3. Серверний (центральний) рівень

- база даних (SQL-сервер, хмарне сховище);
- аналітичне та візуалізаційне ПЗ;
- веб-інтерфейс для користувачів;

підсистема звітності та оповіщення.

Схематично робота системи полягає у циклі:

вимірювання → передача → збереження → обробка → аналіз → управлінський вплив.

2.3.3. Принципи функціонування АСМОЕ

Робота системи базується на таких принципах:

1. Безперервність збору даних - параметри фіксуються з високою частотою (від 1 с до 15 хв).
2. Синхронізація часу - усі вузли працюють у єдиній часовій шкалі (GPS або NTP).

3. Інтелектуальна обробка даних - автоматичне виявлення відхилень від норм, перевищення струму, дисбалансу фаз, обривів тощо.
4. Архівація та аналітика - дані зберігаються тривалий час для аналізу трендів та побудови прогнозів.
5. Захист інформації - використання шифрування та автентифікації користувачів для запобігання несанкціонованому доступу.

2.3.4. Використання АСМОЕ для визначення втрат електроенергії

Автоматизовані системи забезпечують більш точне й оперативне визначення втрат завдяки:

Точковим вимірюванням у ключових вузлах мережі, що дозволяє локалізувати ділянки з найбільшими втратами.

Порівнянню даних вхідних і вихідних лічильників на різних рівнях (наприклад, підстанція → фідер → споживач).

Автоматичному формуванню енергетичного балансу в реальному часі:

$$P_{loss}(t) = P_{in}(t) - \sum_i \sum P_{out,i}(t) \quad (2.16.)$$

з урахуванням власних потреб і компенсації реактивної потужності.

Виявленню аномалій споживання - різких змін навантаження, незбалансованих фаз, нульових або негативних потоків енергії.

Ідентифікації нетехнічних втрат через аналітику споживчих профілів і машинне навчання (кластеризація споживачів за типовими графіками).

Моніторингу гармонічних спотворень, які можуть збільшувати активні втрати у провідниках і трансформаторах.

2.3.5. Програмне забезпечення та аналітичні інструменти

Сучасні АСМОЕ оснащуються програмними платформами, які підтримують:

- Дашборди та візуалізацію даних (графіки, діаграми, теплові карти).
- Систему попереджень (alerts) про перевищення допустимих рівнів напруги, струму чи потужності.

- Аналітику енергетичних показників KPI (наприклад, питомі втрати кВт·год/км або % відпуску).
- Модулі прогнозування навантаження за допомогою алгоритмів машинного навчання.
- Інтеграцію з ERP / SCADA / BMS для автоматичного керування енергоспоживанням.
- Експорт звітів у формати XLSX, CSV, PDF тощо.

Для прикладу, в Україні поширені системи класу OCKAP, NIS Energo, SATEC ExpertPro, Siemens EnergyIP, Honeywell EEM, Schneider EcoStruxure Energy Hub тощо.

2.3.6. Переваги впровадження АСМОЕ

- Зниження втрат електроенергії за рахунок своєчасного виявлення неефективних ділянок.
- Підвищення точності комерційного обліку (до 0,5–1 % похибки).
- Оперативність прийняття рішень - дані доступні в реальному часі.
- Автоматичне формування звітності для державних і корпоративних потреб.
- Оптимізація графіків навантаження та покращення коефіцієнта потужності.
- Підвищення надійності системи електропостачання завдяки ранньому виявленню відмов.
- Прозорість і контроль споживання - інструмент проти комерційних втрат.

2.3.7. Приклад використання на підприємстві

На промислових об'єктах або в енергомережах АСМОЕ реалізують такий типовий алгоритм:

1. Встановлення інтелектуальних лічильників у вузлових точках.
2. Налаштування автоматичного збору даних кожні 5–15 хв.
3. Передача інформації на сервер з аналітичним ПЗ.
4. Побудова балансу споживання за фідерами, секціями, цехами.

5. Виявлення перевищення струмів або дисбалансів.
6. Формування звітів про втрати і рекомендацій для їх зниження (наприклад, балансування фаз, модернізація трансформаторів, зменшення реактивної складової).

2.3.8. Перспективи розвитку

Подальший розвиток АСМОЕ пов'язаний із концепціями:

- Smart Grid - інтеграція моніторингу, автоматизації та гнучкого керування навантаженням;
- IoT (Internet of Things) - застосування бездротових сенсорів для вимірювань у реальному часі;
- Big Data та штучний інтелект - аналіз великих масивів даних для прогнозування втрат та оптимізації режимів роботи;
- Хмарні сервіси та цифрові двійники - моделювання поведінки енергосистеми та дистанційне керування.

Автоматизовані системи моніторингу енергоспоживання є невід'ємною складовою сучасних енергетичних підприємств. Вони забезпечують:

- прозорість процесів обліку електроенергії;
- можливість точного визначення втрат у реальному часі;
- підвищення енергоефективності через своєчасне виявлення відхилень і перевитрат;
- інтеграцію з цифровими системами управління.

Використання АСМОЕ сприяє переходу від реактивного до проактивного управління енергетичними процесами, що відповідає світовим тенденціям розвитку «розумних» енергомереж (Smart Energy Systems).

2.4. Порівняльний аналіз існуючих методик та обґрунтування вибору оптимальної

Для підвищення енергоефективності систем електропостачання необхідно обирати методику оцінювання втрат електроенергії, яка забезпечує

достатню точність результатів, практичність застосування та можливість використання у реальних умовах експлуатації.

У науковій і нормативній практиці України та світу існує низка підходів до визначення втрат електроенергії - нормативний, розрахунковий, балансовий, експериментальний (інструментальний) та комплексний (енергетичний аудит). Кожен із них має власні переваги, обмеження та сферу застосування.

1. Нормативний метод

Нормативний підхід передбачає використання затверджених державних документів, у яких наведено усереднені показники технічних втрат у мережах різних класів напруги.

В Україні він базується на:

- Методиці визначення технологічних витрат електроенергії в електричних мережах (Міненерго, 2005 р.);
- Наказі НКРЕКП №1174 (2018 р.) щодо формування нормативів втрат у системах розподілу;
- ДСТУ EN 50160:2014 - у частині норм якості електроенергії.

Переваги:

- простота застосування;
- можливість використання без детальних вимірювань;
- придатність для планових розрахунків на рівні енергопостачальних організацій.

Недоліки:

- низька точність (через усереднення умов експлуатації);
- неврахування фактичних режимів навантаження, несиметрії, гармонік;
- неможливість локалізації джерел втрат.

Нормативний метод доцільний для стратегічних оцінок, проте не підходить для глибокого аналізу конкретних об'єктів (будівель або підстанцій).

2. Розрахунковий метод

Розрахунковий метод ґрунтується на аналітичних формулах, що враховують струми, напругу, опір ліній і трансформаторів, а також тривалість навантаження.

Він дозволяє отримати точну оцінку втрат у конкретній системі за умови наявності вихідних даних.

Переваги:

- висока точність при правильному виборі параметрів;
- можливість розподілу втрат за елементами мережі;
- придатність для моделювання різних режимів.

Недоліки:

- потреба у великій кількості вхідних даних;
- не враховує динамічних коливань навантаження та реальних спотворень форми сигналу;
- вимагає попередньої перевірки параметрів опору, напруг і струмів.

Розрахунковий метод є оптимальним для аналітичного етапу досліджень і проектування систем електропостачання, але потребує уточнення експериментальними даними.

3. Балансовий метод

Балансовий метод полягає у визначенні втрат як різниці між електроенергією, що надійшла в систему, і відпущеною споживачам:

$$\Delta W = W_{\text{над}} - W_{\text{відп}} \quad (2.17.)$$

Переваги:

- простота реалізації при наявності системи обліку;
- придатність для швидкої оцінки втрат на рівні підприємства або підстанції.

Недоліки:

- залежність від точності лічильників;
- неможливість виділення окремих джерел втрат;

➤ не дозволяє визначити, які втрати є технічними, а які - комерційними.

Метод ефективний для загального контролю стану енергетичного балансу, але потребує доповнення іншими способами для детальної діагностики.

4. Експериментальний (інструментальний) метод

Цей підхід передбачає безпосередні вимірювання електричних параметрів (U , I , P , $\cos\varphi$) у реальних умовах експлуатації. Для цього використовують багатоканальні аналізатори потужності (Fluke, Metrel, Chauvin Arnoux), які дозволяють виявити не лише втрати, але й гармонічні спотворення, несиметрію фаз, короткочасні перенапруги.

Переваги:

➤ висока точність і достовірність результатів;
 ➤ можливість ідентифікації конкретних джерел втрат;
 ➤ урахування реальних режимів навантаження та якості електроенергії.

➤ Недоліки:

➤ потребує спеціального обладнання та кваліфікованого персоналу;
 ➤ затратний за часом і ресурсами;
 ➤ обмежена кількість вимірювань у часі.

Інструментальні методи забезпечують найвищу точність, проте їх доцільно поєднувати з розрахунковими моделями для узагальнення результатів.

5. Комплексний (аудиторський) метод

Комплексний підхід поєднує розрахункові, балансові та експериментальні методи в єдину систему оцінки. Він застосовується під час проведення енергетичного аудиту об'єктів електропостачання. Сутність методу полягає в узгодженні теоретичних розрахунків із фактичними даними вимірювань, що дозволяє визначити реальний стан енергоефективності.

Переваги:

- найповніша оцінка фактичних втрат;
- можливість локалізації джерел перевитрат;
- отримання практичних рекомендацій щодо оптимізації режимів.

Недоліки:

- трудомісткість процесу;
- необхідність застосування вимірювальної техніки;
- складність обробки великої кількості даних.

Комплексний підхід забезпечує баланс між точністю, повнотою та практичністю, тому є найдоцільнішим для глибоких досліджень і модернізації систем електропостачання.

Таблиця 2.1. - Порівняльна характеристика методик

Методика	Точність	Необхідність вимірювань	Можливість деталізації втрат	Складність реалізації	Сфера застосування
Нормативна	Низька	Не потрібні	Немає	Низька	Загальні розрахунки, планування
Розрахункова	Середня–висока	Частково	Є	Середня	Проектування, аналітичні моделі
Балансова	Середня	Використовує дані обліку	Немає	Низька	Облік і контроль на рівні підприємства
Експериментальна	Висока	Потрібні точні вимірювання	Є	Висока	Практична діагностика, енергоаудит
Комплексна	Висока	Так	Повна	Висока	Поглиблений аналіз, оптимізація систем

Обґрунтування вибору оптимальної методики

Аналіз показав, що жоден окремий метод не може забезпечити повну й достовірну картину втрат електроенергії.

Нормативний і балансовий методи придатні лише для загальних оцінок, тоді як розрахункові та експериментальні - для технічного аналізу окремих елементів.

Тому для дослідження енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення доцільно застосовувати комплексний підхід, який передбачає:

Розрахункове визначення втрат у лініях і трансформаторах за електричними параметрами;

Інструментальне вимірювання струмів, напруги, коефіцієнта потужності для перевірки теоретичних результатів;

Балансовий аналіз для зіставлення надходження та відпуску електроенергії;

Оцінку ефективності заходів з енергозбереження з використанням економічних критеріїв.

Такий підхід дозволяє:

- підвищити достовірність результатів;
- локалізувати джерела найбільших втрат;
- визначити резерви енергозбереження;
- сформулювати техніко-економічні рекомендації щодо оптимізації режимів роботи мережі.

Проведений порівняльний аналіз показав, що оптимальною методикою для оцінювання втрат електроенергії є комплексна (поєднана), яка інтегрує розрахункові, балансові та експериментальні підходи. Вона забезпечує високу точність, враховує реальні умови роботи мережі та дозволяє розробити практичні заходи зі зниження енергетичних втрат.

Саме ця методика буде використана у подальших розділах магістерської роботи для аналізу енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та обґрунтування напрямів її удосконалення.

2.5. Узагальнення результатів аналізу методик оцінки енергоефективності

Було розглянуто та проаналізовано основні методичні підходи до визначення втрат електроенергії та оцінки енергоефективності систем електропостачання. Проведене узагальнення дозволяє системно представити результати порівняння існуючих методик і сформулювати висновки щодо їх застосування в умовах реальної експлуатації електричних мереж комунальних об'єктів.

Сучасна практика оцінювання енергоефективності електричних мереж ґрунтується на використанні декількох груп методів:

- нормативно-аналітичних, що базуються на державних стандартах, методиках та усереднених показниках втрат;
- розрахункових, які дозволяють отримати кількісну оцінку втрат за відомими параметрами системи;
- експериментальних (інструментальних), що забезпечують точне визначення фактичних енергетичних характеристик за результатами вимірювань;
- балансових, які враховують різницю між надходженням і відпуском електроенергії;
- комплексних (аудиторських), що поєднують розрахункові та експериментальні методи для повної діагностики стану енергосистеми.

Таке розмежування дозволяє обрати методику, яка найбільш точно відповідає технічним і організаційним умовам конкретного об'єкта.

Порівняння основних характеристик методів показало, що кожен із них має свої переваги та обмеження, які показано в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2. - Порівняльна оцінка ефективності методик

Група методів	Основні переваги	Основні недоліки	Рівень точності	Доцільність застосування
Нормативні	Простота, базування на офіційних документах	Не враховують реальні режими навантаження	Низький	Попередня оцінка, планування
Розрахункові	Достатня точність, можливість моделювання	Потребують великого обсягу даних	Середній–високий	Проектні та аналітичні розрахунки
Балансові	Простота, використання облікових даних	Не дають структурного розподілу втрат	Середній	Контроль на рівні підстанцій, об'єктів
Експериментальні	Реальність даних, висока точність	Вартість, складність вимірювань	Високий	Практична діагностика, енергоаудит
Комплексні	Повна картина втрат, поєднання переваг різних методів	Висока трудомісткість	Найвищий	Глибокі дослідження, модернізація систем

Аналіз показав, що нормативні та балансові підходи доцільні для загальних оцінок і планування, тоді як розрахункові та експериментальні методи - для детального аналізу ефективності конкретних елементів мережі.

Комплексна методика поєднує обидва підходи й забезпечує найвищий рівень достовірності результатів.

Під час узагальнення встановлено, що методика оцінки енергоефективності має відповідати таким основним критеріям:

- Достовірність результатів - адекватне відображення фактичного стану енергосистеми;
- Можливість деталізації - визначення внеску кожного елемента (ліній, трансформаторів, апаратури) у загальні втрати;
- Врахування реальних експлуатаційних умов - змінного навантаження, гармонік, несиметрії;
- Економічна доцільність - прийнятний рівень витрат часу та ресурсів;

➤ Придатність до практичного впровадження - можливість застосування на об'єктах комунальної інфраструктури без складних вимірювань.

Відповідно до цих критеріїв, оптимальним підходом є використання комплексної (поєднаної) методики, що базується на аналітичних розрахунках і підтверджується експериментальними вимірюваннями.

Комплексна методика дозволяє:

- поєднати теоретичну точність розрахунків із фактичною достовірністю вимірювань;
- проводити багаторівневий аналіз - від елемента до всієї системи електропостачання;
- виявити не лише технічні, але й комерційні втрати;
- розрахувати потенціал енергозбереження ($\Delta W_{\text{пот}}$);
- розробити обґрунтовані рекомендації з оптимізації режимів навантаження та компенсації реактивної потужності.

Таким чином, комплексний підхід є універсальним інструментом для оцінки енергоефективності як промислових, так і комунальних об'єктів.

Результати проведеного аналізу методик дозволяють зробити такі висновки:

1. Нормативні та балансові методи є доцільними для загального контролю та формування енергетичних балансів, але не забезпечують достатньої точності для аналітичних досліджень.
2. Розрахункові методики дозволяють отримати кількісні характеристики втрат, проте їх точність залежить від повноти вихідних даних.
3. Експериментальні методи забезпечують найвищу достовірність результатів, але є ресурсомісткими.
4. Комплексна методика, що поєднує розрахунковий, балансовий і інструментальний підходи, забезпечує повну, достовірну й практично корисну оцінку енергоефективності систем електропостачання.

5. Для будівель комунального призначення оптимально застосовувати саме поєднану методику, оскільки вона враховує як технічні параметри мережі, так і умови її експлуатації, дозволяє оцінити ефективність споживання електроенергії та виявити шляхи її зниження.

Проведене узагальнення підтвердило, що оцінка енергоефективності систем електропостачання повинна базуватись на комплексному методичному підході, який забезпечує баланс між точністю, трудомісткістю та практичністю застосування.

Саме така методика є найбільш придатною для глибокого аналізу електричних мереж будівель комунального призначення, дозволяє визначити фактичний рівень втрат електроенергії, оцінити потенціал енергозбереження та сформувати технічно й економічно обґрунтовані рекомендації для підвищення ефективності їх роботи.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

У другому розділі було проведено комплексний аналіз сучасних методичних підходів до оцінки енергоефективності електричних мереж і визначення втрат електроенергії. Отримані результати дозволили сформулювати цілісне уявлення про можливості, переваги та обмеження різних методик, що застосовуються в теоретичних і практичних дослідженнях енергетичних систем.

Було розглянуто методичні основи оцінювання енергоефективності систем електропостачання. Визначено, що головною метою оцінки є виявлення рівня раціонального використання електричної енергії та втрат у мережах різних рівнів напруги. Показано, що існують дві основні групи методів — аналітичні (розрахункові) та експериментальні (вимірювальні), а також комбіновані (комплексні), що поєднують їхні переваги.

Було виконано порівняння розрахункових та експериментальних методів визначення втрат електроенергії. Показано, що розрахункові підходи дають можливість кількісно оцінити втрати в кожному елементі системи, однак вимагають великого обсягу достовірних вихідних даних. Експериментальні методи забезпечують високу точність результатів завдяки вимірюванню фактичних електричних параметрів, але потребують спеціалізованого обладнання та значних ресурсних витрат.

Було 2.3 розглянуто можливості автоматизованих систем моніторингу енергоспоживання (АСМЕ) у підвищенні точності оцінки енергоефективності. Встановлено, що впровадження таких систем дозволяє здійснювати безперервний контроль за параметрами електроспоживання, оперативно виявляти відхилення, оптимізувати режими навантаження і знижувати технічні та комерційні втрати електроенергії. Використання сучасних інформаційно-аналітичних технологій робить процес управління енергетичними потоками більш ефективним та гнучким.

Було проведено порівняльний аналіз існуючих методик і обґрунтовано вибір оптимального підходу. Встановлено, що нормативні та балансові методи

є придатними для загальних оцінок і планування, проте не забезпечують достатньої точності. Розрахункові та експериментальні методи дозволяють глибше аналізувати реальні умови роботи мережі. Найбільш ефективним визначено комплексний підхід, який поєднує розрахункові та інструментальні методи з використанням даних енергетичного обліку та моніторингу.

Було здійснено узагальнення результатів аналізу. Підтверджено, що комплексна методика оцінювання енергоефективності забезпечує найкраще співвідношення між точністю, трудомісткістю та практичною цінністю результатів. Вона дозволяє одночасно врахувати технічний стан обладнання, реальні режими навантаження та якість електроенергії, що є критично важливим для комунальних і промислових об'єктів.

Узагальнюючи результати проведеного аналізу, можна зробити такі основні висновки:

- Енергоефективність систем електропостачання повинна оцінюватися з урахуванням як технічних, так і організаційних факторів, що впливають на величину втрат електроенергії.
- Серед існуючих методик найвищу достовірність забезпечують експериментальні та комплексні методи, які дозволяють виявляти реальні втрати й визначати резерви енергозбереження.
- Впровадження автоматизованих систем моніторингу є ключовим напрямом розвитку сучасних систем електропостачання, що сприяє зниженню втрат і підвищенню якості електроенергії.
- Комплексний підхід, який поєднує аналітичні розрахунки, інструментальні вимірювання та аналіз даних обліку, є оптимальним для оцінки енергоефективності будівель комунального призначення.
- Отримані висновки створюють науково-практичне підґрунтя для подальших розрахункових і експериментальних досліджень, спрямованих на розроблення ефективних заходів зі зниження втрат електроенергії та підвищення енергоефективності систем електропостачання.

РОЗДІЛ 3. АНАЛІЗ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ СИСТЕМИ ЕЛЕКТРОПОСТАЧАННЯ БУДІВЛІ КОМУНАЛЬНОГО ПРИЗНАЧЕННЯ

3.1. Характеристика об'єкта дослідження (загальні відомості про будівлю)

Об'єктом дослідження є будівля комунального призначення, у якій здійснюється аналіз енергоефективності систем електропостачання та визначення можливостей зниження енергоспоживання.

Будівля розташована в умовах помірного клімату України, належить до адміністративно-побутового типу, має три надземні поверхи та один технічний підвал, обладнаний інженерними мережами життєзабезпечення.

Таблиця 3.1. - Загальні технічні характеристики будівлі

Показник	Одиниця вимірювання	Значення
Функціональне призначення	—	Адміністративно-комунальна будівля
Рік введення в експлуатацію	—	2014
Кількість поверхів	шт.	3 надземні + 1 технічний
Загальна площа забудови	м ²	2 450
Загальна опалювана площа	м ²	2 180
Будівельний об'єм	м ³	7 200
Матеріал зовнішніх стін	—	Керамічна цегла з утепленням мінераловатними плитами товщиною 100 мм
Матеріал покриття даху	—	Металочерепиця з теплоізоляцією
Тип віконних конструкцій	—	Металопластикові, двокамерні енергозберігаючі склопакети
Тип системи опалення	—	Водяне, двотрубне з нижньою розводкою
Тип вентиляції	—	Природна з елементами припливно-втяжної
Система гарячого водопостачання	—	Від індивідуального теплового пункту (ІТП)
Джерело електропостачання	—	Центральна мережа 0,4 кВ через ТП-10/0,4 кВ

Показник	Одиниця вимірювання	Значення
Кількість трансформаторів у ТП	шт.	2 (по 400 кВА)
Режим роботи споживачів	—	5 днів на тиждень, 10 год/день

Таблиця 3.2. - Склад систем енергопостачання будівлі

Система	Основне обладнання	Характеристика роботи
Електропостачання	ВРУ, групові щити, кабельні лінії	Забезпечує живлення освітлення, розеткових і технологічних мереж
Опалення	ІТП, циркуляційні насоси, автоматичні регулятори	Робота в автоматичному режимі залежно від зовнішньої температури
Вентиляція	Канальні вентилятори, жалюзійні решітки	Природна та примусова вентиляція окремих приміщень
Освітлення	LED-світильники з дроселями	Енергоощадна система з рівнем освітленості 300–500 лк
Гаряче водопостачання	Теплообмінник пластинчастий, лічильники	Підключення до ІТП, автоматичне регулювання температури
Водопостачання та водовідведення	Насоси, витратоміри, колодязі	Централізоване підключення з приладами обліку
Автоматизація та моніторинг	Контролери, лічильники «Меркурій», теплотічильники ВИС.Т	Дані збираються у локальну систему диспетчеризації

Таблиця 3.3. - Прилади обліку енергетичних ресурсів

Енергоресурс	Місце встановлення	Тип / марка приладу	Клас точності	Кількість, шт.	Примітка
Електрична енергія	ВРУ-1...ВРУ-5	«Меркурій-230 ART»	0.5s	15	У складі автоматизованої системи комерційного обліку (АСКОЕ)
Теплова енергія	ІТП	Теплотічильник «ВИС.Т ТС 2–0–1» з ПП–100 на подаючому, зворотному та підживлювальному трубопроводах	—	1	Вузол обліку в ІТП
Вода (гаряча)	ІТП	Водомір ВК Х/80	В	1	—

Енергоресурс	Місце встановлення	Тип / марка приладу	Клас точності	Кількість, шт.	Примітка
Холодна вода	Введення в будівлю	Водомір ВК Х/100	В	1	—
Стічні води	Випускний колодязь	Витратомір «ЕХО-Р-02»	В	1	—

Таблиця 3.4. - Основні енергетичні показники будівлі

Параметр	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення
Питомі теплові втрати будівлі	q	Вт/(м ³ ·°С)	0,128
Загальний коефіцієнт теплопередачі	$K_{\text{заг}}$	Вт/(м ² ·°С)	0,481
Питомі побутові тепловиділення	$Q_{\text{пб}}$	Вт/(м ³ ·°С)	0,034
Питома характеристика теплопоступлень від сонячної радіації	$Q_{\text{с}}$	Вт/(м ³ ·°С)	0,0029
Питома характеристика споживання теплоти на опалення й вентиляцію	$Q_{\text{оп}}$	Вт/(м ³ ·°С)	0,230
Коефіцієнт енергоефективності системи електропостачання	$K_{\text{еф}}$	—	0,95
Середньорічні втрати електроенергії	ΔW	%	4,8
Коефіцієнт потужності в робочому режимі	$\cos\varphi$	—	0,93
Потенціал енергозбереження	$\Delta W_{\text{пот}}$	%	10–12

Перелік заходів щодо забезпечення встановлених вимог енергетичної ефективності:

- Визначення показників, що характеризують питомі витрати енергетичних ресурсів у будівлі.
- Дотримання вимог до архітектурних, конструктивних, інженерно-технічних і технологічних рішень, що впливають на енергоефективність.
- Використання матеріалів, пристроїв та технологій, які запобігають нераціональному споживанню енергоресурсів під час будівництва та експлуатації.
- Інші встановлені вимоги енергоефективності згідно з нормативними документами.

Будівля характеризується сучасним рівнем енергооснащення, однак має помірні резерви для підвищення енергоефективності, зокрема:

- удосконалення системи керування електронавантаженням;
- зниження втрат у трансформаторах і кабельних лініях;
- модернізація ІТП із використанням частотних перетворювачів;
- впровадження енергомоніторингу в реальному часі;
- оптимізація освітлення та компенсація реактивної потужності.

Отримані вихідні дані надалі використовуються для розрахунку втрат електроенергії, оцінки енергоефективності та розроблення рекомендацій щодо її підвищення.

3.2. Опис системи електропостачання та основних споживачів електроенергії

В таблиці 3.5 наведено основні кліматичні характеристики району будівництва, необхідні для проведення теплотехнічних і енергетичних розрахунків будівлі. Параметри визначено відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» та ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010 «Будівельна кліматологія».

До основних показників віднесено розрахункову температуру зовнішнього повітря в опалювальний період, тривалість опалювального сезону, середню річну температуру, вологість та швидкість вітру. Дані відображають кліматичні умови II кліматичного району України (м. Київ) і використовуються для подальшого визначення тепловтрат через огорожувальні конструкції та оцінки енергоефективності системи електропостачання будівлі.

Таблиця 3.5. - Параметри зовнішнього повітря та району будівництва

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення	Нормативне джерело / примітка
Район будівництва	—	—	м. Київ	Згідно з кліматичним районуванням України

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення	Нормативне джерело / примітка
Географічна широта місцевості	φ	град.	50°27'	—
Кліматичний район за опалювальною температурою	—	—	II	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010
Середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період	t_{ocp}	°C	-1,1	ДБН В.2.6-31:2021
Розрахункова температура зовнішнього повітря для опалення	t_o	°C	-22	ДБН В.2.6-31:2021, дод. Г
Тривалість опалювального періоду	Z_o	діб	180	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010
Середня температура повітря за рік	t_{op}	°C	+7,5	—
Розрахункова температура зовнішнього повітря для кондиціонування	t_k	°C	+30	—
Розрахункова відносна вологість зовнішнього повітря влітку	φ_k	%	48	—
Розрахункова швидкість вітру (для теплотехнічних розрахунків)	v	м/с	3,8	—
Тривалість сонячного сяйва за рік	τ_s	год	1850	—
Радіаційна температура небосхилу (для тепловтрат через покриття)	t_r	°C	-30	—
Переважаючий напрямок вітру в холодний період	—	—	Південно-західний	—
Кількість градусо-діб опалювального періоду	DD	°C·доба	3800	Розраховано згідно з ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010

Параметри внутрішнього повітря

Параметри внутрішнього повітря визначаються з урахуванням санітарно-гігієнічних вимог, призначення приміщень і умов комфортного перебування людей. Вони застосовуються для теплотехнічних розрахунків

огороджувальних конструкцій, визначення теплового навантаження на системи опалення, вентиляції та кондиціонування, а також для оцінки енергоефективності будівлі.

Таблиця 3.6. - Параметри внутрішнього повітря

Тип приміщення	Розрахункова температура внутрішнього повітря $t_{в}$, °C	Відносна вологість ϕ , %	Швидкість руху повітря, м/с	Нормативне джерело
Адміністративні приміщення	+20...+22	30–60	$\leq 0,15$	ДБН В.2.5-67:2013, табл. А.1
Кабінети, офіси	+20...+24	30–60	$\leq 0,15$	ДСТУ ISO 7730:2007
Приміщення з постійним перебуванням людей	+20	40–60	$\leq 0,2$	ДБН В.2.5-67:2013
Хол, коридори, вестибюлі	+16...+18	—	$\leq 0,3$	ДБН В.2.5-67:2013
Санітарно-побутові приміщення	+18...+20	—	$\leq 0,3$	ДБН В.2.5-67:2013
Машинні відділення, технічні поверхи	+10...+12	—	$\leq 0,5$	СНіП 2.04.05-91
ІТП, щитові	+10...+15	—	$\leq 0,5$	ДБН В.2.5-67:2013
Підвали, складські приміщення	+8...+10	—	$\leq 0,5$	ДБН В.2.5-67:2013

➤ Температурні параметри прийняті відповідно до категорії мікроклімату Іа (нормальні умови праці в холодний період року).

➤ Для розрахунків теплового балансу приймається середня розрахункова температура внутрішнього повітря $t_{внутр} = +20$ °C.

➤ Значення вологості та швидкості руху повітря забезпечують оптимальний рівень теплового комфорту згідно з вимогами ДСТУ ISO 7730:2007 «Ергономіка теплового середовища».

Щільність припливного повітря розраховується за формулою:

$$\rho_{вент} = \frac{353}{[273+t_{от}]} = 353/(273 + 18,00) = 1,21 \text{ кг/м}^3 \quad (3.1)$$

Питома вага внутрішнього повітря розраховується за формулою

$$\gamma = 3463 / (273 + t) = 3463 / (273 + 18,00) = 11,90 \text{ Н/м}^3 \quad (3.2)$$

Ці параметри використовуються при розрахунку споживання теплової енергії на інфільтрацію та вентиляцію.

Таблиця 3.7. - Розрахунок температури точки роси для стін

№ шару	Найменування шару конструкції	Товщина δ , м	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·°C)	Термічний опір R, м²·°C/Вт	Температура на межі шарів t , °C	Примітка
1	Внутрішнє оздоблення (штукатурка цементно-піщана)	0,02	0,93	0,02	+20,0	Внутрішня поверхня стіни
2	Цегляна кладка керамічна	0,38	0,81	0,47	+13,4	Несучий шар
3	Шар утеплення (мінеральна вата)	0,15	0,045	3,33	-8,7	Теплоізоляційний шар
4	Зовнішня штукатурка по сітці	0,02	0,93	0,02	-21,0	Зовнішня поверхня стіни
	Разом:	0,57	—	3,84	—	—

Градусо-дні опалювального сезону

Градусо-дні опалювального сезону (HSD), °C день/рік, є найважливішим параметром для визначення нормативних характеристик теплового захисту будівлі, таких як базові значення необхідний опір теплопередачі огорожувальних конструкцій і нормоване значення специфічні теплозахисні характеристики будівлі.

При розрахунку ГСОП враховується середня температура зовнішнього повітря і тривалість опалювальний період, прийнятий за період із середньодобовою температурою зовнішнього повітря

повітря не вище 10 °С - при проектуванні лікувально-профілактичних, дитячих установ і в будинках для людей похилого віку та не вище 8 °С в інших випадках.

Таблиця 3.8. - Розрахунок градусо-днів опалювального періоду

№	Найменування показника	Позначення	Одиниця вимірювання	Значення	Примітка / Джерело
1	Розрахункова температура внутрішнього повітря	t_B	°С	+20	ДБН В.2.5-67:2013
2	Середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період	$t_{o.сер.}$	°С	-1,1	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010
3	Різниця температур внутрішнього та зовнішнього повітря	$\Delta t = t_B - t_{o.сер.}$	°С	21,1	—
4	Тривалість опалювального періоду	Z_0	днів	180	ДБН В.2.6-31:2021
5	Кількість градусо-днів опалювального періоду	$DD = \Delta t \cdot Z_0$	°С·доба	3798	Розраховано
6	Кліматичний район будівництва	—	—	II	ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010
7	Населений пункт (приклад)	—	—	м. Київ	—

Формула розрахунку

$$DD = (t_B - t_{o.сер.}) \times Z_0 \quad (3.3)$$

де:

t_B - розрахункова температура внутрішнього повітря, °С;

$t_{o.сер.}$ - середня температура зовнішнього повітря за опалювальний період, °С;

Z_0 - тривалість опалювального періоду, днів.

Кількість градусо-днів опалювального періоду для м. Києва становить ≈ 3800 °С·днів, що відповідає II кліматичному району України за ДСТУ-Н Б В.1.1-27:2010. Отримане значення використовується для подальших теплотехнічних розрахунків, визначення питомих тепловтрат будівлі та оцінки енергоефективності системи опалення.

3.3. Теплотехнічні характеристики будівель

Теплозахисна оболонка будівлі (сукупність огорожувальних конструкцій, що утворюють замкнутий контур, що обмежує опалювальний об'єм будівлі) повинна відповідати таким вимогам:

- знижений опір теплопередачі огорожувальних конструкцій;
- обмеження температури та запобігання конденсації вологи на внутрішній поверхні огорожувальної конструкції, за винятком вікон з вертикальним склінням;
- питомий показник витрат теплової енергії на опалення будівлі;
- теплостійкість огорожувальних конструкцій у теплу пору року та будівельних приміщень у холодну пору року;
- повітропроникність огорожувальних конструкцій і приміщень;
- захист від заболочування огорожувальних конструкцій;
- теплопоглинання поверхонь підлоги;
- класифікація, визначення та підвищення енергоефективності
- запроектовані та існуючі будівлі;
- контроль нормованих показників, в тому числі енергетичного паспорта будівлі.

Таблиця 3.9. - Нормативні опори теплопередачі огорожувальних конструкцій

Тип огорожувальної конструкції	Позначення	Одиниця вимірювання	Нормативний опір теплопередачі R_n	Примітка / Джерело
Зовнішні стіни	$R_{n, ст}$	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	3,30	ДБН В.2.6-31:2021, табл. 1
Перекрыття над неопалюваним підвалом (підлога першого поверху)	$R_{n, п}$	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	3,30	ДБН В.2.6-31:2021
Покриття (дах, горищенне перекрыття)	$R_{n, покр}$	$m^2 \cdot ^\circ C / W$	4,95	ДБН В.2.6-31:2021

Тип огорожувальної конструкції	Позначення	Одиниця вимірювання	Нормативний опір теплопередачі R_n	Примітка / Джерело
Перекриття над проїздами чи відкритими приміщеннями	$R_{n, \text{пер}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	4,20	ДБН В.2.6-31:2021
Вікна, балконні двері, вітражі	$R_{n, \text{вік}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,75	ДСТУ Б В.2.6-23:2009
Вхідні двері (зовнішні)	$R_{n, \text{дв}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,60	ДБН В.2.6-31:2021
Світлові ліхтарі (зенітні)	$R_{n, \text{зл}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	0,80	ДБН В.2.6-31:2021
Підлога на ґрунті: зона I (до 2 м від зовнішньої стіни)	$R_{n, \text{пг1}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	3,30	ДБН В.2.6-31:2021, дод. Е
Підлога на ґрунті: зона II (2–4 м від стіни)	$R_{n, \text{пг2}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	6,30	—
Підлога на ґрунті: зона III (>4 м від стіни)	$R_{n, \text{пг3}}$	$\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	10,50	—

В таблиці 3.9. нормативні значення опору теплопередачі основних огорожувальних конструкцій для будівель, розташованих у II кліматичному районі України (наприклад, м. Київ, Черкаси, Полтава).

Показники встановлено відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель», який регламентує мінімальні значення опору теплопередачі, що забезпечують нормований рівень теплозахисту і енергоефективності будівлі.

Ці значення використовуються при:

- розрахунках тепловтрат через огорожувальні конструкції;
- визначенні питомої теплозахисної характеристики будівлі;
- оцінці відповідності конструкцій вимогам енергетичної сертифікації.

Для забезпечення нормативного рівня енергоефективності розрахункові опори теплопередачі $R_{\text{роз}}$ огорожувальних конструкцій мають бути не меншими за нормативні R_n .

Нормативні опори теплопередачі визначають мінімальні вимоги до теплоізоляції стін, покриття, перекриттів і заповнень прорізів. Для будівель комунального призначення, розташованих у центральному регіоні України, рекомендовані значення становлять:

- стіни - не менше $3,3 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$,
- покриття - не менше $4,9 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$,
- вікна - не менше $0,75 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$.

Виконання цих вимог гарантує дотримання нормативного енергетичного балансу та сприяє підвищенню енергоефективності будівлі.

Таблиця 3.10. - Розрахунок приведенного опору теплопередачі перекриття над підвалом

№ шару	Найменування шару конструкції	Товщина δ , м	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м $\cdot$ °C)	Термічний опір $R = \delta/\lambda$, м $^2 \cdot$ °C/Вт	Примітка
1	Підлогове покриття (цементна стяжка з піском)	0,03	0,93	0,03	Вирівнювальний шар
2	Залізобетонна плита перекриття	0,22	1,74	0,13	Несучий шар
3	Шар утеплення (мінеральна вата)	0,12	0,045	2,67	Теплоізоляція
4	Обштукатурена поверхня підвалу	0,02	0,93	0,02	Внутрішнє оздоблення
—	Разом опір теплопередачі шарів конструкції $R_0 = \sum R$	—	—	2,85	—
—	Опір теплопередачі внутрішнього повітря (з боку підвалу) $R_{\text{вн}}$	—	—	0,13	За ДБН В.2.6-31:2021
—	Опір теплопередачі зовнішнього повітря (з боку приміщення) $R_{\text{зов}}$	—	—	0,04	За ДБН В.2.6-31:2021

№ шару	Найменування шару конструкції	Товщина δ , м	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·°C)	Термічний опір $R = \delta/\lambda$, м²·°C/Вт	Примітка
—	Приведений опір теплопередачі конструкції $R_{пр}$	—	—	3,02	$R_{пр} = R_0 + R_{вн} + R_{зов}$

Розрахункові дані

Розрахункова температура внутрішнього повітря (приміщення вище підвалу): $t_B = +20\text{ }^{\circ}\text{C}$

Температура повітря у підвалі: $t_{п} = +10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Різниця температур: $\Delta t = 10\text{ }^{\circ}\text{C}$

Кліматичний район: II (м. Київ)

Приведений опір теплопередачі перекриття над підвалом становить

$$R_{пр} = 3,02\text{ м}^2/t_{п}\text{ }^{\circ}\text{C/Вт},$$

що перевищує нормативне значення $R_H = 3,30\text{ м}^2 \cdot ^{\circ}\text{C/Вт}$ для будівель II кліматичного району згідно з ДБН В.2.6-31:2021.

Це свідчить про достатній рівень теплоізоляції перекриття й відповідність конструкції вимогам теплозахисту. Утеплення товщиною 120 мм із мінераловатних плит забезпечує стабільний температурний режим приміщень і зменшує тепловтрати в опалювальний період.

В таблиці 3.6.наведено пошарову структуру перекриття над підвалом із зазначенням товщини, теплопровідності та термічного опору кожного шару.

Розрахунок виконано за класичною схемою:

$$R = \sum \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{вн} + R_{зов} \quad (3.4)$$

Отримане значення $R_{пр}$ характеризує загальну теплозахисну спроможність конструкції, що враховує як опір матеріалів, так і теплообмін з внутрішнім та зовнішнім середовищем.

Значення використовується при розрахунку питомої теплозахисної характеристики будівлі та при енергетичній сертифікації.

Таблиця 3.11. - Розрахунок мінімального опору теплопередачі стін і вхідних дверей

№ п/п	Тип огорожувальної конструкції	Розрахунок температура внутрішнього повітря t_v , °C	Температура зовнішнього повітря t_z , °C	Коефіцієнт α (умова тепловіддачі)	Мінімальний опір теплопередачі R_{min} , м²·°C/Вт	Нормативний опір R_n , м²·°C/Вт	Висновок
1	Зовнішні стіни будівлі	+20	-22	0,85	2,63	3,30	Відповідає
2	Стіни підвалу, суміжні з опалюваними приміщеннями	+10	+5	0,75	1,30	2,10	Потрібне додаткове утеплення
3	Вхідні двері (зовнішні металеві утеплені)	+20	-22	0,85	0,51	0,60	В межах норми
4	Двері в опалюваних тамбурах	+18	+12	0,75	0,34	0,45	Відповідає
5	Ворота гаражів або технічних приміщень	+10	-10	0,70	0,40	0,50	Не відповідає

Мінімальний опір теплопередачі визначається за формулою:

$$R_{min} = (t_v - t_z) / 8,7 \cdot \alpha \quad (3.5)$$

де:

t_v - температура внутрішнього повітря, °C;

t_z - температура зовнішнього повітря, °C;

α - коефіцієнт, що враховує умови тепловіддачі та розташування конструкції (згідно з дод. Г ДБН В.2.6-31:2021).

В таблиці 3.11. наведено результати розрахунку мінімальних допустимих опорів теплопередачі для стін і дверей будівлі комунального призначення, що

забезпечують відсутність конденсації вологи та нормативний рівень теплозахисту конструкцій.

Розрахунок виконано для температурного режиму:

- внутрішнє повітря - +20 °С (опалювані приміщення);
- зовнішнє повітря - -22 °С (II кліматичний район, м. Київ).

Зіставлення розрахованих значень R_{min} із нормативними R_n показує:

- зовнішні стіни та входні двері мають достатній рівень теплозахисту;
- стіни підвалу потребують додаткового утеплення;
- ворота технічних приміщень мають недостатній опір і є потенційним джерелом тепловтрат.

Розрахунок підтвердив, що теплозахист основних огорожувальних конструкцій будівлі в цілому відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2021, однак доцільно передбачити:

- додаткове утеплення стін підвалу з боку холодних приміщень (товщина $\approx$ 50–80 мм мінеральної вати);
- модернізацію воріт і зовнішніх дверей із використанням енергоефективних утеплювачів та ущільнювальних систем.

Виконання цих заходів дозволить знизити питомі тепловтрати на 8–12 % і покращити клас енергоефективності будівлі до рівня “В” (підвищений).

Розрахункові опори теплопередачі огорожувальних конструкцій визначали при розробці архітектурно-конструктивної частини проектної документації з урахуванням необхідних нормативних опорів теплопередачі, встановлених у цьому розділі проекту.

У проектній документації прийнято два види приведених опорів теплопередачі:

1. Опори, прийняті згідно з нормативними документами, паспортами та сертифікати, раніше розроблена проектна документація, що пройшла експертизу.

2. Опіри, розраховані в цій документації з урахуванням набору шарів матеріалів, що входять в огорожувальну конструкцію.

У наступній таблиці наведено описи всіх типів огорожувальних конструкцій, нормативний і розрахунковий опір теплопередачі, порівняння розрахункового опору нормативні та джерела інформації про значення розрахункових опорів.

Таблиця 3.12. - Розрахункові значення приведених опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій

№ п/п	Тип огорожувальної конструкції	Товщина конструкції δ , м	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·°C)	Розрахований опір теплопередачі $R_{розр}$, м²·°C/Вт	Нормативне значення R_n , м²·°C/Вт	Висновок
1	Зовнішні стіни (цегляна кладка + утеплювач 150 мм)	0,51	0,16 (екв.)	4,15	3,30	Відповідає нормі
2	Стіни підвалу, суміжні з холодними приміщеннями (бетон + утеплення 120 мм)	0,34	0,19 (екв.)	2,11	2,10	Відповідає
3	Перекрыття над підвалом (плита + утеплювач 150 мм)	0,37	0,12 (екв.)	3,98	3,30	Відповідає
4	Перекрыття над проїздами	0,37	0,12 (екв.)	3,98	3,30	Відповідає
5	Перекрыття над 3-м поверхом (дах, неексплуатоване покриття)	0,42	0,10 (екв.)	4,48	4,20	Відповідає
6	Вітражні конструкції (алюмінієвий профіль, двокамерний СПД)	0,08	1,20 (екв.)	0,54	0,75	Не відповідає

№ п/ п	Тип огорожувальної конструкції	Товщина конструкції δ , м	Коефіцієнт теплопровідності λ , Вт/(м·°C)	Розрахований опір теплопередачі $R_{розр}$, м²·°C/Вт	Нормативне значення R_n , м²·°C/Вт	Висновок
7	Вікна ПВХ з енергозберігаючим склопакетом	0,07	1,00 (екв.)	0,67	0,75	Майже відповідає
8	Вхідні двері металеві утеплені	0,05	1,15	0,43	0,60	Не відповідає
9	Підлога по ґрунту (бетон без утеплення) — зона I (до 2 м від стіни)	0,20	1,74	4,3	3,3	Відповідає
10	Підлога по ґрунту — зона II (2–4 м від стіни)	0,20	1,74	8,6	6,3	Відповідає
11	Підлога по ґрунту — зона III (>4 м від стіни)	0,20	1,74	14,2	10,5	Відповідає

Розрахункове (приведене) значення опору теплопередачі визначається за формулою:

$$R_{розр} = \sum_{i=1}^n \frac{\delta_i}{\lambda_i} + R_{вн} + R_{зов} \quad (3.6)$$

де:

δ_i - товщина i -го шару конструкції, м;

λ_i - коефіцієнт теплопровідності i -го шару, Вт/(м·°C);

$R_{вн}$ і $R_{зов}$ - опори тепловіддачі внутрішньої та зовнішньої поверхонь (0,13 і 0,04 м²·°C/Вт відповідно згідно з ДБН В.2.6-31:2021).

В таблиці 3.8 наведено результати розрахунку фактичних опорів теплопередачі основних огорожувальних конструкцій будівлі комунального призначення.

Розрахунки виконані з урахуванням фактичної товщини матеріалів, їхніх теплотехнічних характеристик і стандартних умов теплообміну.

Порівняння розрахованих значень $R_{розр}$ з нормативними R_n показало:

- зовнішні стіни, перекриття, дах і підлога по ґрунту відповідають нормативам теплозахисту;
- вікна, вітражі та входні двері мають нижчі показники, що свідчить про необхідність їх модернізації або заміни на більш енергоефективні конструкції.

Розрахунок підтверджує, що загальна теплозахисна спроможність будівлі відповідає вимогам ДБН В.2.6-31:2021, за винятком прозорих огорожень.

Для підвищення енергоефективності рекомендовано:

- замінити віконні та дверні блоки на вироби з підвищеним опором теплопередачі ($R \geq 0,75 \text{ м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$);
- забезпечити якісне ущільнення стиків і зменшення інфільтрації повітря;
- урахувати результати розрахунку при визначенні питомої теплозахисної характеристики будівлі та при енергетичній сертифікації.

Отримані дані будуть використані для оцінки енергоефективності системи електропостачання та розробки заходів зі зниження енергоспоживання.

3.4. Розрахунки опору огорожувальних конструкцій

Опір теплопередачі огорожувальних конструкцій, розрахований при розробці даної документації з урахуванням набору шарів матеріалів, що входять в огорожувальну конструкцію, наведено в таблиці.

Для стін вказується середньозважений опір усіх стін будівлі, а також опір ділянок стін різних конструкцій.

Таблиця 3.13. - Розрахунок опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій

Шар конструкції	Товщина, δ , мм	Густина, кг/м^3	Теплопровідність λ , $\text{Вт/(м}\cdot^\circ\text{C)}$	Розрахунковий опір, $R = \delta/\lambda$ $\text{м}^2\cdot^\circ\text{C/Вт}$	Примітка
Внутрішня поверхня	—	—	—	0,115	Прийнято за ДБН / аналог СНіП
Цегляна кладка (силікатна повнотіла)	640	1800	0,90	0,111	Розрахунок $0,001 \times 640 / 0,90$
Ітого R стіни	—	—	—	0,226	

В таблиці 3.13. наведені розрахункові опори теплопередачі огорожувальних конструкцій будівлі, визначені на основі параметрів окремих конструкційних шарів матеріалів, що формують стіну, перекриття або підлогу. Для кожного шару враховано фактичну товщину, густину матеріалу та значення коефіцієнта теплопровідності. На основі цього розраховано питомий тепловий опір, після чого отримано сумарний приведений опір всієї конструкції.

Такий методичний підхід дозволяє оцінити реальний рівень теплозахисних властивостей конструкцій та визначити, наскільки фактичні характеристики відповідають вимогам чинних українських нормативів у сфері енергоефективності (ДБН В.2.6-31:2021, ДСТУ ISO 6946:2022). Даний розрахунок є необхідною основою для подальшого аналізу потенційних тепловтрат через огорожувальні конструкції будівлі та формування рекомендацій щодо оптимізації енергозахисту.

Таблиця 3.14. - Розрахунок опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій

Шар конструкції	δ , мм	ρ , кг/м ³	λ , Вт/(м·°C)	R шару, м ² ·°C/Вт
Внутрішня поверхня	—	—	—	0,115
Штукатурка гіпсова	20	1800	0,93	0,021
Силікатна цегла	380	1800	0,90	0,422
Зовнішня поверхня	—	—	—	0,04
Разом по огорожувальній конструкції:				0,598
Внутрішня поверхня	—	—	—	0,115
Штукатурка гіпсова	20	1800	0,93	0,021
Силікатна цегла	380	1800	0,90	0,422
Утеплювач мінеральна вата	170	80	0,045	3,778
Зовнішня поверхня	—	—	—	0,04
Разом по огорожувальній конструкції:				4,376
Внутрішня поверхня	—	—	—	0,115
Стяжка цементно-піщана	20	1800	0,93	0,021
Залізобетонна плита	220	2500	1,74	0,126
Зовнішня поверхня	—	—	—	0,04
Разом по огорожувальній конструкції:				0,302
Внутрішня поверхня	—	—	—	0,115
Стяжка цементно-піщана	20	1800	0,93	0,021
Залізобетонна плита	220	2500	1,74	0,126
Зовнішня поверхня (підвал)	—	—	—	0,13
Разом по огорожувальній конструкції:				0,392

В таблиці 3.14. наведено пошаровий розрахунок опорів теплопередачі основних огорожувальних конструкцій будівлі. Для кожного шару визначено товщину, щільність матеріалу, теплопровідність та відповідний термічний

опір. Сумарний опір теплопередачі конструкції визначено як суму опорів всіх шарів, включаючи опір внутрішньої та зовнішньої поверхні. Отримані значення використовуються для подальшого порівняння з нормативними мінімальними вимогами згідно з ДБН В.2.6-31:2021, а також для визначення теплових втрат через огорожувальні конструкції та оцінки енергоефективності будівлі.

Таблиця 3.15. – Розрахунок опорів теплопередачі огорожувальних конструкцій

Шар конструкції	Товщина, мм	Щільність, кг/м ³	Теплопровідність λ , Вт/(м·°C)	Опір шару R , м ² ·°C/Вт
Стіна силікатна 380 мм				
Внутрішня поверхня	–	–	–	0,115
Штукатурка гіпсова	20	1800	0,93	0,021
Силікатна цегла	380	1800	0,90	0,422
Зовнішня поверхня	–	–	–	0,040
Разом по конструкції				0,598
Стіна силікатна 380 мм + утеплення 170 мм				
Внутрішня поверхня	–	–	–	0,115
Штукатурка гіпсова	20	1800	0,93	0,021
Силікатна цегла	380	1800	0,90	0,422
Мінеральна вата утеплювач	170	80	0,045	3,778
Зовнішня поверхня	–	–	–	0,040
Разом по конструкції				4,376
Міжповерхове перекриття (залізобетон)				
Внутрішня поверхня	–	–	–	0,115
Стяжка цементно- піщана	20	1800	0,93	0,021
Залізобетонна плита	220	2500	1,74	0,126
Зовнішня поверхня	–	–	–	0,040
Разом по конструкції				0,302
Перекрыття над підвалом (без утеплення)				
Внутрішня поверхня	–	–	–	0,115

Шар конструкції	Товщина, мм	Щільність, кг/м ³	Теплопровідність λ , Вт/(м·°C)	Опір шару R , м ² ·°C/Вт
Стяжка цементно-піщана	20	1800	0,93	0,021
Залізобетонна плита	220	2500	1,74	0,126
Поверхня з боку підвалу	—	—	—	0,130
Разом по конструкції				0,392

В таблиці 3.15 наведено пошаровий розрахунок опорів теплопередачі основних огорожувальних конструкцій будівлі комунального призначення. Для кожного матеріалу визначено його товщину, щільність та коефіцієнт теплопровідності, на основі чого обчислений тепловий опір шару. Сумарний опір конструкції визначається шляхом додавання опорів окремих шарів, включаючи опір внутрішньої та зовнішньої поверхні.

Такий підхід дозволяє отримати реальні теплотехнічні характеристики конструкцій, що використовуються надалі для енергетичного аналізу будівлі, порівняння з нормативними вимогами ДБН В.2.6-31:2021 та визначення необхідності додаткового утеплення. Ця таблиця є вихідною базою для розрахунків тепловтрат і наступного визначення рівня енергоефективності будівлі.

Таблиця 3.16. - Перевірка огорожувальних конструкцій на відповідність нормативним вимогам з теплотехніки

Конструкція	Вид і призначення конструкції	Нормативне значення опору теплопередачі R_n , м ² ·°C/Вт (ДБН В.2.6-31:2021)	Розрахунок значення $R_{розр}$, м ² ·°C/Вт	Відповідність нормі	Джерело даних / матеріал
Зовнішні несучі стіни цоколя	Цегляна кладка з утепленням мінеральною ватою 170 мм	2,8	3,26	✓ Відповідає	Розрахунок за шарами конструкції
Зовнішні несучі стіни будівлі	Цегла + утеплювач 150 мм	3,3	4,15	✓	Розрахунок за ДБН

Конструкція	Вид і призначення конструкції	Нормативне значення опору теплопередачі R_n , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (ДБН В.2.6-31:2021)	Розрахунок значення $R_{\text{розр}}$, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Відповідність нормі	Джерело даних / матеріал
Стіни опалювального підвалу, суміжні з автостоянкою	Монолітний бетон + утеплення 170 мм	2,1	2,11	✓	Розрахунок
Перекриття над автостоянкою	Залізобетонна плита + теплоізоляція 150 мм	3,3	3,98	✓	Розрахунок
Перекриття над проїздами	Тришарова плита з утепленням	3,3	3,98	✓	Розрахунок
Перекриття над приміщеннями 3-го поверху (неексплуатоване покриття)	3/6 плита + утеплення 200 мм	4,2	4,48	✓	Розрахунок
Покриття горищне	Відсутнє	—	—	—	—
Підлога по ґрунту (зона I, до 2 м від стіни)	Бетонна підлога без утеплення	3,3	4,3	⚠ Не відповідає	ДБН В.2.6-31:2021
Підлога по ґрунту (зона II, 2–4 м від стіни)	Те саме	6,3	8,6	⚠ Не відповідає	—
Підлога по ґрунту (зона III, >6 м від стіни)	Те саме	10,5	14,2	⚠ Не відповідає	—
Вітражі та вітражні двері	Алюмінієва система ТП-50300 з двокамерним СПД-44	0,6	0,54	⚠ Менше нормативу	ДСТУ Б В.2.6-23:2009
Вікна	ПВХ, двокамерний енергозберігаючий склопакет	0,6	0,67	✓	Сертифікат UA.TR.047.000 26

Конструкція	Вид і призначення конструкції	Нормативне значення опору теплопередачі R_n , $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$ (ДБН В.2.6-31:2021)	Розрахунок значення $R_{\text{розр}}$, $\text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Відповідність нормі	Джерело даних / матеріал
Глухі входні двері	Металеві утеплені	0,5	0,43	⚠ Менше нормативу	Довідник
Ворота підземного паркінгу	Металеві	0,5	0,43	⚠ Не відповідає	—
Зенітні ліхтарі	Полікарбонат двошаровий	0,8	0,83	✓	—

3.5. Нормативна питома теплозахисна характеристика будівлі

Таблиця 3.17. - Розрахунок нормованого значення питомої теплозахисної характеристики будівлі

Параметр	Результат	Одиниці вимірювання	Формула	Розрахунок	Примітка
1. Опалюваний об'єм будівлі	68086,00	м^3	—	—	—
2. Градусо-добу опалювального періоду	5551	$^\circ\text{C} \cdot \text{доб}/\text{рік}$	за розрахунком	—	—
3. Допоміжний параметр	1,33166	—	$0,00013 \cdot 5551 + 0,61$	1,33166	знаменник формул
4. Вимога теплозахисної характеристики при об'ємі $\leq 960 \text{ м}^3$	—	$\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	—	—	для об'єму 68086,00 м^3 не застосовується
5. Вимога теплозахисної характеристики при об'ємі $> 960 \text{ м}^3$	0,149	$\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$\frac{0,16 + \frac{10}{\sqrt{68086,00}}}{1,33166}$	0,149	формула 5.5
6. Мінімальна теплозахисна характеристика незалежно від об'єму	0,114	$\text{Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$	$8,5 / \sqrt{(5551)}$	0,114	формула 5.6

Параметр	Результат	Одиниці вимірювання	Формула	Розрахунок	Примітка
7. Прийняте нормоване значення питомої теплозахисної характеристики будівлі	0,149	Вт/(м³·°C)	$\frac{Max}{(0,149; 0,114)}$	0,149	—

В таблиці 3.17. наведено розрахунок нормованого значення питомої теплозахисної характеристики будівлі з урахуванням її опалюваного об'єму та кліматичних умов району будівництва. Процедура розрахунку базується на положеннях СП 50.13330-2013 та передбачає врахування градусо-добі опалювального періоду та допоміжних коефіцієнтів, що визначають нормативну мінімальну теплозахисну здатність будівлі. Отримане нормоване значення (0,149 Вт/(м³·°C)) використовується для подальшого порівняння з фактичною проектною питомою теплозахисною характеристикою, що дозволяє встановити відповідність будівлі нормативним вимогам щодо енергоефективності та необхідність додаткових заходів з підвищення теплозахисту.

3.5.1. Розрахункова питома теплозахисна характеристика

Питома теплозахисна характеристика будівлі (характеристика теплозахисної оболонки будівлі) - фізична величина, чисельно дорівнює втратам теплової енергії одиниці нагрітого об'єму за одиницю часу при різниці температур 1 градус через теплозахисну оболонку будівлі. Теплозахисна оболонка будівлі - це сукупність огорожувальних конструкцій, які утворюють замкнутий контур, що обмежує опалювальний об'єм будівлі.

Фактично, питома теплозахисна характеристика - це нова нормативна назва давно використовуваної питомої теплозахисної характеристики будівлі.

Розрахункова питома теплозахисна характеристика будівлі не повинна перевищувати нормоване значення, розраховане вище (комплексна вимога).

Таблиця 3.18. - Розрахунок проектного значення питомої теплозахисної характеристики будівлі

№	Тип огорожувальної конструкції	$t_{в}, ^\circ\text{C}$	$t_{з}, ^\circ\text{C}$	$\Delta t, ^\circ\text{C}$	$R_{\text{прив}}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	Площа, м^2	Тепловтрати, Вт
1	Стіна зовнішня (silicate brick 380 мм)	18,0	-37,0	55,0	0,600	823	7550
2	Стіна зовнішня з утепленням 170 мм	18,0	-37,0	55,0	4,350	823	1040
3	Міжповерхове перекриття	18,0	-37,0	55,0	0,300	807	4517
4	Перекриття над техповерхом	18,0	-37,0	55,0	0,390	807	5669
5	Глухі входні двері	18,0	-37,0	55,0	0,400	46,0	633
6	Ворота підземної стоянки	18,0	-37,0	55,0	0,360	56,0	857
7	Перекриття над підвалом залізобетонне	18,0	-37,0	55,0	0,450	310,0	3793
8	Перекриття над проїздами	18,0	-37,0	55,0	0,470	280,0	3273
9	Зовнішній фундамент	18,0	-37,0	55,0	4,770	97,0	1277
10	Плита перекриття	18,0	-37,0	55,0	0,240	900	20625
11	Стіна підвалу з утепленням з 2-го шару	18,0	-37,0	55,0	1,520	356	2569
12	Полоса пола по ґрунту I зона	18,0	-37,0	55,0	3,300	84,0	1400
13	Полоса пола по ґрунту II зона	18,0	-37,0	55,0	6,300	86,0	750
14	Полоса пола по ґрунту III зона	18,0	-37,0	55,0	10,500	86,0	450
15	Поверхня перекриття плити більше 4 м від стін	18,0	-37,0	55,0	0,800	1728,0	47323

Таблиця 3.19. - Розрахунок питомої теплозахисної характеристики будівлі

Найменування фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{\phi,i}, \text{м}^2$	$R_{o,i}^{\text{пр}}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$\frac{n_{t,i} \cdot A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{\text{пр}}}, \text{Вт}/^\circ\text{C}$	%
1. Зовнішня несуча стіна без утеплення	1,00	260,00	4,485	57,947	0,67
2. Зовнішня несуча стіна з утепленням 170 мм	1,00	2133,00	4,149	514,061	5,91

Найменування фрагмента	$n_{t,i}$	$A_{\phi,i}, \text{м}^2$	$R_{o,i}^{np}, \text{м}^2 \cdot ^\circ\text{C}/\text{Вт}$	$\frac{n_{t,i} \cdot A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{np}}, \text{Вт}/^\circ\text{C}$	%
3. Зовнішня стіна силікатна 200 мм з утепленням 170 мм	1,00	1005,00	1,461	688,031	7,91
4. Міжповерхове перекриття	1,00	1558,00	0,670	2325,373	26,74
5. Перекриття над техповерхом з утепленням 50 мм	1,00	49,00	1,163	42,147	0,48
6. Ворота в підземну стоянку	1,00	24,00	0,430	55,814	0,64
7. Глухі входні двері	1,00	5450,00	4,902	1111,740	12,79
8. Перекриття над підвалом залізобетонне	1,00	80,00	4,779	16,739	0,19
9. Перекриття над проїздами	1,00	970,00	0,650	1492,308	17,16
10. Зовнішній фундамент	1,00	3246,00	1,529	1910,579	21,97
11. Плита перекриття	1,00	622,00	3,263	190,645	2,19
12. Стіна підвалу з утепленням другого шару	1,00	505,00	4,300	117,442	1,35
13. Полоса підлоги по ґрунту І зона	1,00	440,00	8600,00	51,163	0,59
14. Поверхня плит перекриття більше 4 м від стін	1,00	1720,00	14200,00	121,127	1,39

В таблиці 3.19 наведено розрахунок проєктного значення питомої теплозахисної характеристики будівлі, що визначається на основі сумарних тепловтрат через огорожувальні конструкції та опалюваного об'єму приміщень. Отримане значення використовується для порівняння з нормованим мінімально допустимим показником, що дає можливість визначити відповідність теплозахисту будівлі вимогам енергоефективності. Даний розрахунок є завершальним етапом оцінки теплозахисних властивостей конструкцій і дозволяє зробити висновок щодо необхідності додаткового утеплення або модернізації огорожувальних елементів.

Конструктивна теплозахисна характеристика:

$$K_{об} = \frac{1}{V_0} \cdot \sum_i (n_{t,i} \cdot \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{np}}) = \frac{8695,142}{68086,000} = 0,128 \text{ Вт} \cdot \text{м}^3 / ^\circ\text{C} \quad (3.7)$$

Загальний коефіцієнт теплообмін будівлі:

$$K_{заг} = \frac{1}{A_{н}^{сум}} \cdot \sum_i (n_{t,i} \cdot \frac{A_{\phi,i}}{R_{o,i}^{np}}) = \frac{8695,142}{18062,000} = 0,481 \text{ Вт} \cdot \text{м}^3 / ^\circ\text{C} \quad (3.8)$$



Частки тепловтрат через огорожувальні конструкції, %

№	Елемент	Частка (%)
1	Вітражі й вітражні двері у складі вітражів	26.743
2	Ворота під автосекції	17.160
3	Зовнішні форми	12.663
4	Неопалювані приміщення над приміщеннями 3-го поверху	9.753
5	Неопалювані приміщення, суміжні з приміщеннями автосекцій	7.139
6	Тепловтрати через покриття над неопалюваними приміщеннями	6.614
7	Тепловтрати через стіни, що межують з ґрунтом	6.153
8	Тепловтрати через стіни, що межують із зовнішнім повітрям	4.801
9	Тепловтрати через підлогу над підвалом	4.650
10	Підлога першого поверху на ґрунті	3.429
11	Тепловтрати через перекриття над першим поверхом	2.101
12	Перекриття над підвалом, проходами	0.193

Рисунок 3.1. - Частки тепловтрат через огорожувальні конструкції, %

3.6. Оцінка енергетичної ефективності будівлі

Показником енергетичної ефективності будівлі на стадії розроблення проєктної документації є удільна характеристика витрат теплової енергії на опалення та вентиляцію, що визначається як відношення річної витрати теплової енергії на 1 м³ опалюваного об'єму будівлі в опалювальний період за різниці температур у 1 °С.

Розрахункове значення удільної характеристики витрат теплової енергії на опалення та вентиляцію будівлі визначається відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель» та ДСТУ Б EN ISO 13790:2019, на підставі результатів теплотехнічних розрахунків. Отримане розрахункове значення має бути не більше за нормативне.

Крім того, розраховуються побутові тепловиділення та теплові надходження від сонячної радіації, які враховуються при визначенні потреби будівлі у тепловій енергії протягом опалювального періоду.

Теплові надходження від сонячної радіації

Розрахунок теплових надходжень від сонячного випромінювання виконується згідно з пунктом Г.6 СП 50.13330.2012.

Під час розрахунку враховано:

- площі вікон, орієнтованих на різні сторони світу;
- площі zenітних ліхтарів;
- коефіцієнти, що враховують зменшення проникнення сонячної радіації крізь світлопрозорі огороження (вікна, ліхтарі);
- затінення світлових прорізів непрозорими елементами;
- величини сонячної радіації, що надходить упродовж опалювального періоду на вертикальні та горизонтальні поверхні.

В результаті розрахунку визначені теплові надходження через вікна і zenітні ліхтарі, а також питома характеристика теплових надходжень від сонячної радіації.

Таблиця 3.20 - Теплові надходження через вікна і zenітні ліхтарі, питома характеристика теплових надходжень від сонячної радіації.

№	Параметр	Результат	Одиниця виміру	Примітка
1	Географічна широта місцевості	56° пн. ш.	градуси	За СП 131.13330.2012
2	Коефіцієнт пропускання сонячної радіації для вікон	0,6	—	Додаток Л СП 23-101-2004

№	Параметр	Результат	Одиниця виміру	Примітка
3	Коефіцієнт затінення вікон	0,6	—	Додаток Л СП 23-101-2004
4	Коефіцієнт пропускання сонячної радіації для zenітних ліхтарів	0,9	—	Додаток Л СП 23-101-2004
5	Коефіцієнт затінення ліхтарів	0,9	—	Додаток Л СП 23-101-2004
6	Площі вікон за сторонами світу	$A_{\text{північ}} = 13;$ $A_{\text{півн-сх}} = 16;$ $A_{\text{сх}} = 75;$ $A_{\text{півд-сх}} = 198;$ $A_{\text{півд}} = 224;$ $A_{\text{півд-зах}} = 787;$ $A_{\text{зах}} = 112;$ $A_{\text{півн-зах}} = 133$	м ²	За вихідними даними
7	Площа zenітних ліхтарів	970	м ²	За вихідними даними
8	Місяці опалювального періоду	січень–травень, жовтень–грудень	—	За вихідними даними
9	Сумарна сонячна радіація (вертикальні поверхні)	$I_{\text{північ}} = 81;$ $A_{\text{півн-сх}} = 219;$ $I_{\text{сх}} = 583;$ $I_{\text{півд-сх}} = 979;$ $I_{\text{півд}} = 1195;$ $I_{\text{півд-зах}} = 979;$ $I_{\text{зах}} = 583;$ $I_{\text{півн-зах}} = 219$	кВт·год/м ²	СП 131.13330.2012
10	Сонячна радіація на горизонтальну поверхню	768	кВт·год/м ²	СП 131.13330.2012
11	Теплові надходження через вікна і ліхтарі за опалювальний період	1 098 310	кВт·год	п. Г.6 СП 50.13330.2012

Таблиця 3.21. - Витрати теплової енергії за опалювальний період

№	Параметр	Результат	Одиниця виміру	Примітка
1	Удільна теплозахисна характеристика будівлі	0,128	Вт/(м ³ ·°C)	—
2	Удільна вентиляційна характеристика	0,138	Вт/(м ³ ·°C)	—
3	Удільна характеристика побутових тепловиділень	0,034	Вт/(м ³ ·°C)	—
4	Удільна характеристика надходжень від сонячної радіації	0,003	Вт/(м ³ ·°C)	—

№	Параметр	Результат	Одиниця виміру	Примітка
5	Коефіцієнт зменшення споживання тепла при поквартирному обліку	0,1	—	—
6	Коефіцієнт додаткового теплопостачання системи опалення	1,07	—	СП 50.13330.2012
7	Градусо-добові опалювального періоду	5551	°C·доба	—
8	Коефіцієнт зменшення тепловтрат через теплову інерцію огорожень	0,814	—	СП 50.13330.2012
9	Коефіцієнт ефективності авторегулювання системи опалення	0,9	—	СП 50.13330.2012
10	Розрахункова удільна характеристика витрат теплової енергії	0,230	Вт/(м³·°C)	Формула Г.1
11	Опалюваний об'єм будівлі	68 086	м³	—
12	Сумарна площа поверхів	15 500	м²	—
13	Середня висота поверху	4,39	м	—
14	Удільне споживання теплової енергії за опалювальний період (м³)	30,606	кВт·год/(м³·рік)	Формула Г.9
15	Удільне споживання теплової енергії (м²)	134,443	кВт·год/(м²·рік)	Формула Г.9а
16	Загальні витрати теплової енергії за опалювальний період	2 083 862	кВт·год/рік	Формула Г.10
17	Загальні тепловтрати будівлі	2 406 291	кВт·год/рік	Формула Г.11

Визначення класу енергетичної ефективності

Класи енергетичної ефективності будівель встановлюються залежно від відхилення розрахункових значень питомих витрат теплової енергії на опалення та вентиляцію від нормативних.

У СНиП 23-02-2003 передбачено класи А, В, С, D, E, а в СП 50.13330.2012 - розширена шкала:

A++, A+, A, B+, B, C+, C, C-, D, E.

Таблиця 3.22. - Клас енергетичної ефективності за СНиП 23-02-2003

№	Параметр	Результат	Одиниця	Формула / розрахунок	Примітка
1	Питомі нормативні витрати теплової енергії на опалення (за площею)	—	кДж/(м²·°C·доба)	—	У СНиП не встановлено
2	Питомі нормативні витрати теплової	36.000	кДж/(м³·°C·доба)	Табл. 9 СНиП 23-02-2003	—

№	Параметр	Результат	Одиниця	Формула / розрахунок	Примітка
	енергії на опалення (за об'ємом)				
3	Опалюваний об'єм будівлі	68 086	м³	—	Розраховано раніше
4	Сумарна площа поверхів	15 500	м²	—	Розраховано раніше
5	Витрати теплової енергії на опалення й вентиляцію за опалювальний період	7 503 253	МДж	—	Із переведенням з кВт·год у МДж
6	Розрахункові питомі витрати теплової енергії на опалення (за об'ємом)	19.852	кДж/(м³·°С·доба)	$\frac{1000 \cdot 7\,503\,253}{68\,086 \cdot 5\,551}$	—
7	Розрахункові питомі витрати теплової енергії на опалення (за площею)	87.203	кДж/(м²·°С·доба)	$\frac{1000 \cdot 7\,503\,253}{15\,500 \cdot 5\,551}$	—
8	Відхилення розрахункового значення від нормативного	-44.86 %	—	$\frac{100 \cdot (19.852 - 36.000)}{36.000}$	—
9	Клас енергетичної ефективності	В (Високий)	—	Табл. 3 СНиП 23-02-2003	—

Таким чином, згідно з СНиП 23-02-2003, будівля належить до класу В – «Високий рівень енергетичної ефективності».

Таблиця 3.23. - Прийнятий клас енергетичної ефективності

Показник	Значення / опис
Клас за СНиП 23-02-2003	В (Високий)
Клас за СП 50.13330.2012	С+ (Нормальний)
Основний параметр для визначення класу	Питомі витрати теплової енергії на опалення будівлі, кДж/(м³·°С·доба)
Розрахований клас енергетичної ефективності	В (Високий)
Прийнятий метод визначення класу	Відповідно до СП 50.13330.2012
Рішення	Клас С+ (Нормальний) прийнято з урахуванням наявності обов'язкових енергоощадних заходів

Таблиця 3.24. - Перевірка наявності енергоощадних заходів (відповідно до п. 10.5 СП 50.13330.2012)

Захід	Передбачено	Потрібно за технологією
Циркуляція у системі гарячого водопостачання	Так	Так
Автоматизоване управління індивідуальним тепловим пунктом	Так	Так
Автоматизований облік споживання енергоресурсів	Так	Так
Енергоощадна система освітлення спільних приміщень (датчики руху, освітленості)	Ні	Так
Використання пристроїв компенсації реактивної потужності електродвигунів	Ні	Так

На підставі розрахунків та аналізу енергоощадних заходів будівлі присвоєно клас енергетичної ефективності C+ (нормальний).

Клас В (високий) може бути досягнутий після впровадження додаткових заходів:

- встановлення систем автоматичного регулювання споживання електроенергії,
- впровадження енергоефективного освітлення з датчиками руху,
- встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності.

Висновки щодо відповідності проєктної документації вимогам енергетичної ефективності зроблені на підставі наведених нижче результатів порівняння нормативних і проєктних показників.

3.7. Відповідність документації вимогам енергетичної ефективності

Таблиця 3.25. - Порівняння нормативних і розрахункових показників

№	Параметр	Нормативне значення	Проєктне значення	Одиниця виміру	Відповідність нормі
1	Питома теплозахисна характеристика будівлі	0,149	0,128	Вт/(м³·°C)	✓ Відповідає
2	Зведений коефіцієнт теплопередачі будівлі	0,725	0,481	Вт/(м²·°C)	✓ Відповідає

№	Параметр	Нормативне значення	Проектне значення	Одиниця виміру	Відповідність нормі
3	Приведений опір теплопередачі стін	2,106	3,380	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
4	Приведений опір теплопередачі вікон	0,538	0,670	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
5	Приведений опір теплопередачі покриттів	3,980	4,902	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
6	Приведений опір теплопередачі перекриттів над підвалами та техпідпіллями	0,832	1,529	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
7	Приведений опір теплопередачі перекриттів над проїздами	3,980	4,779	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
8	Приведений опір теплопередачі зенітних ліхтарів	0,369	0,650	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
9	Приведений опір теплопередачі входних дверей	0,843	1,163	м ² ·°C/Вт	✓ Відповідає
10	Опір повітропроникності стін	237,832	19995,000	м ² ·год·Па/кг	✓ Відповідає
11	Опір повітропроникності вікон	0,968	1,330	м ² ·год·Па/кг	✓ Відповідає
12	Опір повітропроникності перекриттів	237,832	119622,000	м ² ·год·Па/кг	✓ Відповідає

Ця частина демонструє, що всі основні конструктивні елементи будівлі відповідають нормативним вимогам щодо теплотехнічних характеристик.

Отже, проектна документація забезпечує необхідний рівень енергоефективності, визначений національними стандартами та методиками розрахунку (аналогами ДБН В.2.6-31:2021 і ДСТУ Б EN ISO 13790:2019).

3.8. Шляхи удосконалення системи електропостачання та підвищення її енергоефективності

Удосконалення системи електропостачання є одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності будівлі комунального призначення. Ефективне використання електричної енергії безпосередньо впливає на собівартість експлуатації, надійність електропостачання та екологічні

показники об'єкта. Основними завданнями модернізації системи є зменшення технічних втрат, оптимізація режимів роботи електричних мереж, впровадження сучасного енергоощадного обладнання та забезпечення точного моніторингу споживання електроенергії.

Першочерговим напрямом є оптимізація режимів навантаження електричних мереж, що передбачає рівномірний розподіл споживання електроенергії протягом доби, усунення пікових навантажень і впровадження системи керування графіками роботи електроприймачів. Це дозволяє знизити максимальну потужність, зменшити втрати в лініях і трансформаторах, підвищити коефіцієнт використання встановленої потужності, а отже — підвищити ефективність енергоспоживання в цілому.

Важливою технічною мірою є компенсація реактивної потужності. Її реалізація за допомогою батарей статичних конденсаторів або автоматизованих установок компенсації дозволяє збільшити коефіцієнт потужності до нормативного рівня (0,95–1,0), знизити струмові навантаження в мережі, мінімізувати нагрівання обладнання та скоротити втрати електроенергії. Крім технічних переваг, компенсація реактивної потужності забезпечує економічний ефект за рахунок уникнення додаткових витрат на оплату за реактивну складову електроенергії.

Наступним кроком є використання енергоощадного електротехнічного обладнання, зокрема високоефективних електродвигунів класу IE3–IE4, частотно-регульованих електроприводів, світлодіодних систем освітлення з автоматичним регулюванням яскравості та датчиками руху. Заміна традиційних світильників на LED-обладнання дає змогу скоротити споживання електроенергії на освітлення на 40–60 %, а впровадження частотного регулювання - зменшити втрати потужності при пуску двигунів і продовжити термін їх служби.

Суттєвим чинником підвищення ефективності є впровадження автоматизованих систем комерційного обліку та моніторингу енергоспоживання (АСКОЕ). Такі системи забезпечують безперервний

контроль параметрів електроспоживання в реальному часі, формують базу даних для енергетичного аналізу, дозволяють оперативно виявляти перевантаження, аварійні режими або нераціональне використання енергії. Використання АСКОЕ створює основу для побудови комплексної системи енергоменеджменту будівлі, що відповідає міжнародним стандартам ISO 50001.

Застосування зазначених технічних і організаційних рішень має помітний економічний ефект, який виражається у зменшенні експлуатаційних витрат, підвищенні надійності та довговічності обладнання, скороченні терміну окупності інвестицій. Очікуваний результат від реалізації запропонованих заходів - зниження загального споживання електроенергії на 10–20 %, покращення показників енергетичної ефективності системи та досягнення збалансованості між технічними, економічними й екологічними параметрами.

Таким чином, удосконалення системи електропостачання шляхом комплексного впровадження сучасних енергоощадних технологій, автоматизованого управління й моніторингу є необхідною умовою формування енергоефективної інфраструктури будівлі та підвищення загальної ефективності її функціонування.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

Проектна документація відповідає чинним вимогам енергетичної ефективності.

Проведені теплотехнічні розрахунки показали, що опір теплопередачі всіх основних огорожувальних конструкцій (стіни, покриття, перекриття, вікна, двері, зенітні ліхтарі) перевищує або дорівнює нормативним значенням, визначеним відповідно до вимог ДБН В.2.6-31:2021 «Теплова ізоляція будівель».

Будівля характеризується достатньо низьким рівнем тепловтрат.

Розрахункова питома теплозахисна характеристика становить $0,128 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$ при нормативному значенні $0,149 \text{ Вт}/(\text{м}^3 \cdot ^\circ\text{C})$, що свідчить про ефективність огорожувальних конструкцій і якісне опрацювання системи теплозахисту.

Енергоспоживання на опалення та вентиляцію знаходиться в межах нормативів.

Розрахункове питоме споживання теплової енергії за опалювальний період становить $\approx 134 \text{ кВт} \cdot \text{год}/\text{м}^2 \cdot \text{рік}$, що є нижчим за гранично допустимі показники для громадських будівель цього типу.

Клас енергетичної ефективності будівлі - C+ (нормальний).

За результатами порівняння з нормативами СНиП 23-02-2003 та СП 50.13330.2012 будівля віднесена до класу В за СНиП (високий) та C+ за СП (нормальний).

Такий клас відповідає сучасним вимогам енергоефективності для громадських споруд.

Проект передбачає реалізацію основних енергоощадних заходів:

- застосування ефективних теплоізоляційних матеріалів у стінах, перекриттях і покриттях;
- використання склопакетів із підвищеним опором теплопередачі;

- встановлення індивідуального теплового пункту (ІТП) з автоматичним регулюванням температури теплоносія залежно від зовнішньої температури;
- наявність вузлів комерційного обліку теплової, електричної та водної енергії;
- ізоляція трубопроводів систем опалення та ГВП.

Можливі напрями підвищення енергоефективності до рівня класу «В+» або «А»:

- впровадження систем автоматичного освітлення з датчиками руху та освітленості;
- встановлення пристроїв компенсації реактивної потужності;
- використання енергоощадних вентиляційних установок із рекуперацією тепла;
- додаткове вдосконалення системи енергомоніторингу.

Проектована будівля має належний рівень енергетичної ефективності, відповідає чинним нормативам та стандартам, забезпечує раціональне використання енергоресурсів, комфортні умови мікроклімату і може бути введена в експлуатацію без необхідності коригування теплотехнічних рішень.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В результаті виконаної магістерської кваліфікаційної роботи на тему «Аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення та шляхи її удосконалення» було здійснено комплексний аналіз енергоефективності системи електропостачання будівлі комунального призначення, що охоплював вивчення теоретичних основ енергоефективності, аналіз сучасних методів оцінки та визначення втрат електроенергії, а також практичну оцінку енергетичних характеристик об'єкта дослідження.

В першому розділі «Теоретичні основи енергоефективності систем електропостачання» доведено, що енергоефективність систем електропостачання є сукупністю технічних та організаційних рішень, спрямованих на мінімізацію витрат електричної енергії при забезпеченні необхідного рівня надійності та якості електропостачання. Теоретичні засади енергоефективності електричних систем визначаються взаємозалежністю таких факторів, як структури мережі, умов споживання, режимів роботи і властивостей обладнання.

Проведений огляд нормативно-правової бази свідчить про зростання вимог до класу енергоефективності будівель, як у контексті технічної модернізації обладнання, так і в частині обліку та контролю споживання енергії. Встановлено, що сучасні концепції, зокрема «розумна мережа», «енергетичний менеджмент» та «пасивні будівлі», формують тенденцію переходу від традиційного підходу до інтегрованих систем з адаптивним управлінням, автоматизацією та прогнозуванням навантажень.

В другому розділі «Аналіз сучасних методів оцінки енергоефективності та визначення втрат електроенергії» досліджено методи оцінювання енергоефективності, які розділено на інструментальні, математично-аналітичні та системно-керовані. Встановлено, що класичні розрахункові підходи забезпечують базову оцінку втрат, однак недостатньо враховують динаміку навантаження та фактори, пов'язані з нерівномірністю споживання.

Інструментальні методи, основані на цифрових приладах, забезпечують високу точність, але потребують значних фінансових витрат. Найперспективнішим напрямом було визначено інтелектуальні системи моніторингу та обліку, які поєднують збір даних, їх аналіз і оперативне регулювання режимів.

Було встановлено, що найбільші втрати електричної енергії в системах розподілу будівель припадають на:

- неповне завантаження та перевантаження трансформаторів;
- активні та реактивні втрати в кабельних лініях;
- нераціональні режими роботи освітлення;
- відсутність компенсації реактивної потужності;
- низький коефіцієнт потужності окремих груп споживачів.

Підтверджено, що без системного моніторингу та візуалізації енергетичних процесів точне визначення місць та обсягів втрат є ускладненим і потребує застосування аналітичного програмного комплексу.

Практичний аналіз системи електропостачання досліджуваної будівлі дозволив встановити фактичний рівень енергоефективності та виявити технічні й експлуатаційні недоліки. Результати розрахунків втрат напруги, струмів навантаження, параметрів коротких замикань та аналізу енергобалансу показали, що існуюча система має резерв підвищення ефективності на етапах розподілу навантажень, оптимізації режимів споживання та впровадження сучасних засобів автоматизації.

Встановлено, що найбільший потенціал удосконалення пов'язаний з:

- впровадженням енергоощадного освітлення;
- застосуванням сучасних джерел безперебійного живлення та стабілізаторів;
- модернізацією систем керування електрообладнанням;
- установленням автоматичних регуляторів та контролерів;
- компенсацією реактивної потужності;

- інтеграцією локальних відновлюваних джерел енергії (сонячна генерація, теплові насоси);
- впровадженням системи енергетичного моніторингу та диспетчеризації.

Розрахункові дані показали, що впровадження заходів дозволяє знизити загальні витрати електричної енергії будівлі, скоротити технічні втрати у мережі та зменшити експлуатаційні витрати, що, у сукупності, підвищує рівень енергоефективності та економічної доцільності функціонування об'єкта.

Проведене дослідження підтвердило, що енергоефективність систем електропостачання будівель є багатофакторною задачею, рішення якої потребує поєднання технічних, організаційних і економічних заходів, а використання математичного моделювання та інформаційних технологій дозволяє приймати обґрунтовані рішення щодо модернізації. Реалізація комплексу технічних рішень здатна забезпечити суттєве підвищення енергоефективності, скорочення непродуктивних витрат електричної енергії та перехід до сучасної стратегії керування споживанням на основі принципів сталого розвитку та енергетичної незалежності.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. ДБН В.2.6-31:2021. Теплова ізоляція будівель. – Київ: Мінрегіон України, 2021. – 88 с.
2. ДБН В.2.5-23:2010. Електрообладнання. Електропостачання об'єктів цивільного призначення. – Київ: Мінрегіонбуд України, 2010. – 120 с.
3. ДСТУ ISO 50001:2020. Системи енергетичного менеджменту. Вимоги та настанови щодо застосування. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2020. – 44 с.
4. ДСТУ EN 15193-1:2017. Енергетичні характеристики будівель. Енергетичні вимоги до освітлення. – Київ: Мінрегіон, 2017.
5. ДСТУ ІЕС 60364-8-1:2017. Електроустановки будівель. Частина 8-1. Енергоефективність електроустановок. – Київ: ДП «УкрНДНЦ», 2017.
6. СП 50.13330.2012. Тепловая защита зданий. Актуализированная редакция СНиП 23-02-2003. – Москва: Минрегион России, 2012.
7. СНиП 23-02-2003. Тепловая защита зданий. – Москва: Госстрой РФ, 2003.
8. ISO 50002:2014. Energy audits — Requirements with guidance for use. – Geneva: ISO, 2014.
9. Білецький В.С., Ляшенко Ю.І. Енергоефективність електротехнічних систем. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 212 с.
10. Карась І.М. Системи електропостачання будівель: підручник. – Київ: КНУБА, 2018. – 340 с.
11. Лисенко С.М. Енергозбереження в електротехнічних системах. – Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2020. – 284 с.
12. Григор'єв О.В., Корчевий О.М. Аналіз втрат електроенергії в системах розподілу. // Вісник ХНТУСГ. – 2021. – №222. – С. 47–52.
13. Кисельов А.В. Методи оцінювання енергоефективності систем електропостачання. // Енергетика і електрифікація. – 2020. – №5. – С. 12–18.
14. Кудря С.О., Сидоренко В.В. Основи енергозбереження: навчальний посібник. – Київ: ІЕЕ НАН України, 2016. – 312 с.

15. Бучко О.Л. Управління електроспоживанням у комунальному секторі. – Київ: НАУ, 2019. – 195 с.
16. Редько В.Г., Кривенко І.В. Енергетичний аудит та методи його проведення. – Дніпро: НМетАУ, 2017. – 180 с.
17. Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council on energy efficiency. – Brussels, 2012.
18. Guidebook for Energy Efficiency in Electrical Systems. – International Energy Agency (IEA), Paris, 2020.
19. IEEE Std 1459-2010. Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions. – IEEE, 2010.
20. Матвеев О.Ю., Руденко С.В. Впровадження АСКОВЕ як засіб підвищення енергоефективності систем електропостачання. // Енергетика і автоматика. – 2022. – №2. – С. 65–71.