

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

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В МЕРЕЖАХ
ПРОМИСЛОВИХ ТА КОМУНАЛЬНИХ СПОЖИВАЧІВ ІЗ
ЗАСТОСУВАННЯМ НОРМАТИВНИХ І РОЗРАХУНКОВИХ МЕТОДИК

(тема кваліфікаційної роботи)

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

Спеціальності: 141 Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка

_____/Олексій СИМОНОВ
(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)

**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 Енергетична безпека

**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 Олексію СИМОНОВУ

1. Тема «Дослідження втрат електроенергії в мережах промислових та комунальних споживачів із застосуванням нормативних і розрахункових методик»

затверджена наказом по університету № 4801-5/3665 від «06» жовтня 2025 р.

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

3. Вихідні дані до роботи/проєкту: рівні напруг, тип мережі, довжина ЛЕП, номінальні потужності та коефіцієнти завантаження трансформаторів, графіки електричних навантажень, статистичні дані комерційного обліку електричної енергії.

4. Зміст роботи/проєкту (перелік питань, які належить розробити):
ВСТУП; РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ; РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ; РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОГО ТА КОМУНАЛЬНОГО СПОЖИВАЧІВ; 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)

Олексій СИМОНОВ

(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)

Олексій СИМОНОВ

(ім'я, прізвище)

РЕФЕРАТ

до магістерської роботи на тему

«Дослідження втрат електроенергії в мережах промислових та комунальних споживачів із застосуванням нормативних і розрахункових методик»

СИМОНОВА ОЛЕКСІЯ

Магістерська робота виконана на 83 сторінок, містить 7 таблиць, 3 рисунка, що характеризують результати дослідження, використано літературних джерел 23.

Проблема зниження втрат електроенергії (ЕЕ) є критичною для підвищення енергоефективності національної економіки, забезпечення надійності електропостачання та зменшення фінансового навантаження на споживачів. Значна частина втрат припадає саме на електричні мережі кінцевих споживачів - промислових підприємств та комунальних об'єктів. Комплексний підхід, що охоплює як нормативні, так і точні розрахункові методики, є необхідним для ефективного управління енергоресурсами.

Технологічні (технічні) включають втрати на нагрів проводів та кабелів, а також втрати в силових трансформаторах. Комерційні (нетехнічні) втрати пов'язані з неточностями обліку, помилками при зніманні показань, а також із несанкціонованим підключенням до мережі (крадіжками ЕЕ). Для промислових мереж типовими є високі технологічні втрати, тоді як у комунальних мережах часто переважають комерційні втрати.

Практична частина роботи включає моделювання та розрахунок втрат для двох типів споживачів – промислові та побутові споживачі. Результати дослідження підтверджують необхідність застосування індивідуальних стратегій зниження втрат для кожного типу мереж.

Для мінімізації втрат пропонуються технічні та організаційні заходи.

ВТРАТИ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ, РОЗРАХУНОК ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ,
НОРМАТИВНІ МЕТОДИКИ, СПОЖИВАЧІ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ,
ПРОМИСЛОВІ ПІДПРИЄМСТВА

ABSTRACT

to a master's thesis on

«Research of electricity losses in networks of industrial and communal consumers using regulatory and calculation methods»

SYMONOV OLEKSII

The master's work is executed on 83 pages, contains 7 tables, 3 drawings, which characterize the results of research, additions, used literary sources 23.

The problem of reducing electricity losses (EE) is critical for increasing the energy efficiency of the national economy, ensuring the reliability of electricity supply and reducing the financial burden on consumers. A significant part of the losses falls precisely on the electrical networks of end consumers - industrial enterprises and communal facilities. A comprehensive approach, covering both normative and precise calculation methods, is necessary for effective management of energy resources.

Technological (technical) includes losses for heating wires and cables, as well as losses in power transformers. Commercial (non-technical) losses are associated with accounting inaccuracies, errors when taking readings, as well as unauthorized connection to the network (EE theft). High technological losses are typical for industrial networks, while commercial losses often prevail in utility networks.

The practical part of the work includes modeling and calculating losses for two types of consumers – industrial and household consumers. The results of the study confirm the need to apply individual loss reduction strategies for each type of network.

Technical and organizational measures are proposed to minimize losses.

ELECTRICITY LOSSES, CALCULATION OF ELECTRICITY LOSSES,
REGULATORY METHODS, ELECTRICITY CONSUMERS, INDUSTRIAL
ENTERPRISES

ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ	8
ВСТУП	9
РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ	12
1.1. Поняття втрат електроенергії та їх класифікація	12
1.1.1. Класифікація втрат електроенергії за характером виникнення	12
1.1.2. Класифікація технічних втрат за складовими	13
1.1.3. Класифікація втрат за місцем виникнення	13
1.1.4. Класифікація втрат за можливістю обліку та контролю	14
1.1.5. Значення класифікації втрат для енергоефективності	14
1.2. Фізичні причини виникнення втрат у лініях електропередач і трансформаторах	15
1.2.1. Втрати електроенергії у лініях електропередач	15
1.2.2. Втрати електроенергії у трансформаторах	17
1.2.3. Вплив умов експлуатації на величину втрат	18
1.2.4. Узагальнені співвідношення втрат у мережі	18
1.3. Основні фактори, що впливають на рівень втрат електроенергії	19
1.3.1. Технічні фактори	19
1.3.2. Експлуатаційні фактори	21
1.3.3. Організаційні фактори	22
1.3.4. Зовнішні фактори	22
1.3.5. Взаємозв'язок факторів і їх комплексний вплив	23
1.4. Структура електричних мереж промислових і комунальних споживачів	24
1.4.1. Загальна характеристика електричних мереж споживачів	24

1.4.2. Структура електричних мереж промислових споживачів	25
1.4.3. Структура електричних мереж комунальних споживачів	26
1.4.4. Особливості побудови та експлуатації мереж	27
1.4.5. Порівняння структур промислових і комунальних мереж	28
1.5. Нормативно-правова база з оцінювання та регулювання втрат електроенергії в Україні	29
1.5.1. Законодавчі акти України	30
1.5.2. Підзаконні акти та регуляторні документи	31
1.5.3. державні стандарти та методичні документи	31
1.5.4. Європейські директиви та міжнародна інтеграція	32
1.5.5. Практичне застосування нормативної бази	33
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1	34
РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ	37
2.1. Огляд нормативних методик оцінки втрат електроенергії	37
2.1.1. Призначення та принципи нормативних методик	37
2.1.2. Основні нормативні документи з оцінювання втрат електроенергії	38
2.1.3. Структура нормативного розрахунку втрат електроенергії	39
2.1.4. Нормативні рівні втрат у різних класах напруг	40
2.1.5. Переваги та обмеження нормативних методик	40
2.2. Розрахункові методи визначення втрат у розподільних мережах	41
2.3. Порівняльна характеристика нормативних і розрахункових підходів	42
2.4. Аналіз точності та обмежень існуючих методик	45

2.5. Обґрунтування вибору методики для проведення подальших досліджень	47
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2	49
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОГО ТА КОМУНАЛЬНОГО СПОЖИВАЧІВ	51
3.1. Характеристика досліджуваних об'єктів електропостачання	51
3.2. Аналіз електричних схем живлення та параметрів мереж	52
3.3. Розрахунок втрат електроенергії з використанням розрахункових формул	54
3.4. Оцінка впливу технічного стану обладнання на втрати електроенергії	56
3.5. Результати розрахунків	59
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3	64
РОЗДІЛ 4. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ	66
4.1. Аналіз технічних і організаційних заходів щодо зменшення втрат електроенергії	66
4.2. Оптимізація режимів навантаження та компенсація реактивної потужності	68
4.3. Використання енергоощадних технологій і сучасних систем моніторингу	70
4.4. Впровадження автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ)	72
ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4	76
ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ	78
СПИСОК ПОСИЛАНЬ	81

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

ДСТУ – державний стандарт України

ГПП - головна понижувальна підстанція

ЦТП - цехова трансформаторна підстанція

ТП - трансформаторна підстанція

РТП - районні трансформаторні підстанції

НКРЕКП - Національна комісія, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг

ОСР - оператори систем розподілу

КСР - кодекс систем розподілу

КСП - кодекс системи передачі

STATCOM – статичний компенсатор реактивної потужності

ІТП - індивідуальний тепловий пункт

ПЗПД - пристрої збору та передачі даних

ВСТУП

Актуальність.

Сучасний етап розвитку енергетики характеризується зростанням обсягів електроспоживання, підвищенням вимог до надійності, якості та ефективності електропостачання. В умовах постійного зростання цін на енергоносії та необхідності зменшення впливу енергетичного сектору на довкілля питання раціонального використання електроенергії набуває особливої актуальності. Одним із ключових напрямів підвищення енергоефективності електроенергетичних систем є зниження втрат електроенергії в розподільних мережах, що дозволяє скоротити витрати на генерацію, транспортування та споживання електроенергії без додаткового введення нових потужностей.

Втрати електроенергії в електричних мережах є неминучим фізичним явищем, однак їхній рівень може істотно відрізнятись залежно від технічного стану обладнання, режимів навантаження, структури мережі, якості монтажу та експлуатації. Особливої уваги потребують мережі промислових та комунальних споживачів, оскільки саме в цих системах часто спостерігається значна частка неконтрольованих або наднормативних втрат, зумовлених застарілим обладнанням, низькою культурою експлуатації, а також відсутністю сучасних систем моніторингу та обліку електроенергії.

Для достовірного визначення величини втрат електроенергії застосовуються нормативні та розрахункові методики, які базуються на аналітичних, експериментальних та статистичних підходах. Нормативні методики дозволяють оцінити втрати за встановленими державними чи галузевими стандартами, тоді як розрахункові базуються на реальних технічних параметрах мережі та режимах її роботи. Порівняння результатів, отриманих за різними методами, дає змогу оцінити точність існуючих нормативів, виявити невраховані фактори та сформулювати обґрунтовані рекомендації щодо підвищення ефективності енергопостачання.

На сьогодні в Україні питання енергозбереження та підвищення енергетичної ефективності регламентується низкою нормативно-правових

актів, серед яких Закон України «Про енергозбереження», Закон «Про енергетичну ефективність», ДСТУ та галузеві стандарти. Водночас існуюча практика оцінювання втрат електроенергії потребує удосконалення, зокрема - адаптації розрахункових методик до сучасних умов експлуатації мереж та впровадження новітніх інтелектуальних систем керування.

Метою дослідження є дослідження втрат електроенергії в мережах промислових та комунальних споживачів із застосуванням нормативних і розрахункових методик, а також розроблення практичних рекомендацій щодо їх зниження та підвищення енергоефективності систем електропостачання.

Об'єктом дослідження є електричні мережі промислових та комунальних споживачів, що функціонують у системах розподілу електроенергії на середній та низькій напрузі.

Предметом дослідження є втрати електроенергії у мережах різного рівня напруги, методи їх оцінювання та шляхи мінімізації на основі нормативних і розрахункових підходів.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі передбачено розв'язання таких **основних завдань**:

- ✓ Проаналізувати сучасний стан і тенденції розвитку систем електропостачання промислових та комунальних об'єктів.
- ✓ Розглянути фізичну природу втрат електроенергії в елементах мережі та класифікувати їх за видами.
- ✓ Дослідити існуючі нормативні та розрахункові методики визначення втрат електроенергії в мережах різних рівнів напруги.
- ✓ Провести порівняльний аналіз результатів оцінки втрат, отриманих за нормативними та розрахунковими методами.
- ✓ Виконати розрахунок втрат електроенергії для конкретного об'єкта (промислового чи комунального споживача) з урахуванням його технічних характеристик.
- ✓ Виявити основні фактори, що впливають на рівень втрат, і запропонувати технічні та організаційні заходи щодо їх зниження.

✓ Оцінити економічний ефект від впровадження запропонованих рішень і сформулювати висновки щодо підвищення енергетичної ефективності мереж.

В результаті виконання роботи передбачається отримати науково обґрунтовані результати, що дозволять підвищити точність оцінки втрат електроенергії, оптимізувати режими роботи електричних мереж та забезпечити зменшення енерговитрат у промислово-комунальному секторі.

Магістерська кваліфікаційна робота на тему «Дослідження втрат електроенергії в мережах промислових та комунальних споживачів із застосуванням нормативних і розрахункових методик» складається з таких частин: перелік умовних позначень, вступ, чотири розділи, висновки, список посилань.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ТЕОРЕТИЧНИХ ОСНОВ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖАХ

1.1. Поняття втрат електроенергії та їх класифікація

Втрати електроенергії є невід’ємною частиною процесу її передачі та розподілу від джерел генерації до кінцевих споживачів. Вони виникають унаслідок фізичних процесів, що супроводжують перетворення та транспортування електроенергії в елементах електричної мережі — лініях електропередачі, трансформаторах, розподільних пристроях, кабельних трасах тощо.

Під втратами електроенергії розуміють ту частину електричної енергії, не доходить до споживачів унаслідок її перетворення на інші види енергії (переважно теплову) під час протікання електричного струму через елементи мережі. У найзагальнішому вигляді втрати можна визначити як різницю між кількістю електроенергії, що подається в електричну мережу, та кількістю, яка фактично споживається навантаженням:

$$\Delta W = W_{\text{перед}} \cdot W_{\text{спож}} \quad (1.1.)$$

де

ΔW - втрати електроенергії, кВт·год;

$W_{\text{перед}}$ - електроенергія, подана в мережу;

$W_{\text{спож}}$ - електроенергія, відпущена споживачам.

Залежно від природи виникнення втрат, їхнього характеру та можливості вимірювання, у практиці енергетики прийнято здійснювати класифікацію втрат електроенергії за кількома ознаками.

1.1.1. Класифікація втрат електроенергії за характером виникнення

За фізичною природою втрати електроенергії поділяються на:

Технічні втрати - зумовлені фізичними процесами в елементах електричної мережі. Вони виникають під час проходження електричного струму через активний опір провідників, у магнітопроводах трансформаторів,

у комутаційних апаратах тощо. Технічні втрати є неминучими, однак їх рівень може бути оптимізований завдяки правильному проєктуванню, експлуатації та модернізації мережі.

Нетехнічні втрати - це втрати, не пов'язані безпосередньо з фізичними процесами в мережі. Вони виникають через недосконалість системи обліку електроенергії, помилки вимірювань, несанкціоноване підключення до мережі або крадіжки електроенергії. Такі втрати не мають природного характеру і підлягають виявленню та усуненню організаційними заходами.

1.1.2. Класифікація технічних втрат за складовими

Технічні втрати, у свою чергу, поділяються на постійні та змінні:

Постійні втрати не залежать від навантаження мережі та мають місце навіть тоді, коли споживання електроенергії відсутнє. Вони зумовлені магнітними втратами у сталевих осердях трансформаторів, струмами холостого ходу, роботою допоміжного обладнання, витоками через ізоляцію тощо.

Змінні втрати залежать від величини струму навантаження і визначаються за законом Джоуля–Ленца. Вони пропорційні квадрату струму і активному опору елемента:

$$P_{\text{ВТ}} = I^2 \cdot R \quad (1.2)$$

Основними джерелами змінних втрат є активний опір ліній електропередачі, обмоток трансформаторів, шин і з'єднань.

У практиці експлуатації розподільних мереж технічні втрати зазвичай становлять 5–15 % від загального обсягу переданої електроенергії, залежно від довжини ліній, рівня напруги, схеми живлення та режимів навантаження.

1.1.3. Класифікація втрат за місцем виникнення

Втрати електроенергії розподіляються також за місцем їх утворення у структурі електричної системи:

- ✓ у повітряних та кабельних лініях електропередачі (активні втрати в провідниках, коронні втрати, витоки в ізоляції);
- ✓ у трансформаторах (втрати холостого ходу, втрати короткого замикання);
- ✓ у розподільних пристроях та комутаційній апаратурі;
- ✓ у системах обліку і вимірювань (через похибки лічильників, трансформаторів струму і напруги);
- ✓ у споживачів (реактивна потужність, несиметрія навантаження, гармонічні спотворення).

1.1.4. Класифікація втрат за можливістю обліку та контролю

Залежно від можливості кількісного визначення втрати поділяються на:

Облікові (вимірювані) - ті, що можуть бути визначені на основі даних приладів обліку електроенергії;

Необлікові (невимірювані) - втрати, які не піддаються прямому вимірюванню та визначаються шляхом розрахунків або балансового методу.

З метою управління ефективністю роботи мереж застосовується поняття балансових втрат, тобто різниці між відпущеною та реалізованою електроенергією за певний період.

1.1.5. Значення класифікації втрат для енергоефективності

Класифікація втрат електроенергії є основою для їх аналізу, оцінювання та управління. Вона дозволяє:

- ✓ виявити основні причини енергетичних втрат;
- ✓ визначити пріоритетні напрями їх зниження;
- ✓ обґрунтувати вибір методик розрахунку втрат для різних ділянок мережі;
- ✓ забезпечити підвищення загальної енергетичної ефективності системи електропостачання.

Таким чином, глибоке розуміння природи та структури втрат електроенергії є необхідною передумовою для розроблення дієвих заходів щодо їх мінімізації та раціонального використання електричної енергії у промисловому й комунальному секторах.

1.2. Фізичні причини виникнення втрат у лініях електропередач і трансформаторах

Передача електричної енергії від джерела генерації до споживачів завжди супроводжується певними втратами, обумовленими фізичними властивостями матеріалів, через які протікає електричний струм, та процесами перетворення енергії в елементах електричної системи. Основними джерелами втрат у мережах є лінії електропередач (ЛЕП) та силові трансформатори, які становлять значну частку елементів системи розподілу.

Відповідно до фізичної природи, втрати в цих елементах поділяють на активні (теплові), реактивні (внаслідок наявності індуктивностей і ємностей), а також додаткові, пов'язані з неідеальністю обладнання, умовами навколишнього середовища та несиметрією навантажень.

1.2.1. Втрати електроенергії у лініях електропередач

1. Активні втрати

Основною фізичною причиною втрат у лініях є перетворення електричної енергії на теплову при проходженні струму через провідники, які мають активний опір R . Згідно із законом Джоуля–Ленца, потужність втрат визначається виразом:

$$P_{\text{ВТ}} = I^2 \cdot R, \quad (1.3.)$$

а енергія втрат за певний період часу t - формулою

$$W_{\text{ВТ}} = I^2 \cdot R \cdot t \quad (1.4)$$

Отже, величина втрат у провідниках прямо пропорційна квадрату струму навантаження і активному опору лінії. Опір залежить від матеріалу провідника, його довжини l , перерізу S і питомого опору ρ :

$$R = \rho \cdot \frac{l}{S} \quad (1.5)$$

Для зниження втрат у ЛЕП застосовують провідники з низьким питомим опором (мідь, алюміній, сталєво-алюмінієві сплави), збільшують переріз або підвищують робочу напругу, що зменшує струм при однаковій потужності.

2. Реактивні втрати

Лінії електропередач мають не лише активний, а й індуктивний та ємнісний опір, що призводить до появи реактивної потужності. Вона не споживає енергії, але спричиняє додаткове навантаження на систему, збільшуючи струм у провідниках, а отже, і активні втрати.

Реактивна складова виникає внаслідок індуктивності проводів (через магнітні поля навколо них) і ємності між проводами та землею. У довгих лініях, особливо високовольтних, реактивні втрати суттєво впливають на загальний баланс потужності. Для їх зменшення застосовують компенсацію реактивної потужності за допомогою батарей конденсаторів або синхронних компенсаторів.

3. Додаткові втрати в лініях

До додаткових втрат належать:

- ✓ коронні втрати - виникають у повітряних лініях високої напруги при іонізації повітря навколо проводів. Енергія витрачається на утворення коронного розряду, що супроводжується світінням і шумом. Рівень втрат зростає зі збільшенням напруги, вологості повітря та забруднення ізоляції;
- ✓ втрати на витік - у кабельних лініях відбувається частковий витік струму через ізоляцію, який зростає при її старінні, пошкодженні чи підвищеній вологості;
- ✓ втрати в з'єднаннях та контактних зонах, що обумовлені перехідним опором на муфтах, з'єднувальних затискачах, комутаційній апаратурі;

✓ втрати через несиметрію фаз і спотворення форми напруги - особливо актуальні в мережах низької напруги з великою кількістю нелінійних споживачів (електронні пристрої, перетворювачі, частотні регулятори).

1.2.2. Втрати електроенергії у трансформаторах

Силові трансформатори, що забезпечують узгодження рівнів напруги в системі електропостачання, також є джерелом значних енергетичних втрат. За фізичною природою втрати в трансформаторі поділяються на втрати холостого ходу і втрати короткого замикання.

1. Втрати холостого ходу

Виникають у магнітопроводі трансформатора під дією змінного магнітного потоку навіть тоді, коли навантаження відсутнє. Ці втрати складаються з:

- ✓ втрат на гістерезис, зумовлених перемагнічуванням феромагнітного матеріалу осердя при кожній зміні напрямку потоку;
- ✓ втрат на вихрові струми (струми Фуко), що індукуються в масивних частинах осердя під дією змінного магнітного поля.

Зменшити втрати холостого ходу можна шляхом застосування електротехнічної сталі з низькими магнітними втратами, виготовлення осердя з тонких ізольованих листів, а також використання сучасних матеріалів — аморфних або нанокристалічних сплавів.

2. Втрати короткого замикання

Ці втрати залежать від навантаження трансформатора та пропорційні квадрату струму, що протікає через обмотки:

$$P_{\text{ВТк.з.}} = I^2 \cdot R_{\text{обм}}, \quad (1.6.)$$

де $R_{\text{обм}}$ - активний опір обмоток.

До втрат короткого замикання відносять:

- ✓ активні втрати в обмотках, зумовлені тепловим нагріванням провідників;

- ✓ додаткові втрати у конструкційних елементах (стяжки, ярма, бак), спричинені розсіюванням магнітного потоку;
- ✓ втрати в контактних з'єднаннях та виводах.

Для зменшення таких втрат використовують провідники з низьким питомим опором (мідь, алюміній), оптимізують геометрію обмоток і конструкцію магнітопроводу.

1.2.3. Вплив умов експлуатації на величину втрат

Втрати в елементах мережі значною мірою залежать від зовнішніх умов та режиму роботи системи. До основних впливаючих факторів належать:

- ✓ температура навколишнього середовища, що змінює питомий опір матеріалів (для алюмінію й міді зростає приблизно на 0,4 % на кожен градус);
- ✓ ступінь завантаження ліній та трансформаторів - при перевантаженні втрати збільшуються пропорційно квадрату струму;
- ✓ напруга живлення - зменшення робочої напруги призводить до збільшення струму при тій самій потужності, що підвищує активні втрати;
- ✓ якість монтажу та технічний стан обладнання - наявність поганих контактів, старіння ізоляції, забруднення, вібрації тощо підвищують рівень втрат.

1.2.4. Узагальнені співвідношення втрат у мережі

У загальному вигляді сумарні втрати електроенергії в лінії електропередач і трансформаторі можна подати як:

$$P_{\Sigma} = P_{\text{ліній}} + P_{\text{тр.х.х.}} + P_{\text{тр.кз}} + P_{\text{дод}}, \quad (1.7)$$

де

$P_{\text{ліній}}$ - активні втрати в провідниках лінії;

$P_{\text{тр.х.х.}}$ - втрати холостого ходу трансформатора;

$P_{\text{тр.кз}}$ - втрати короткого замикання;

$P_{\text{дод}}$ - додаткові втрати (корона, витоки, контакти тощо).

Аналіз і точне визначення кожної складової дозволяють обґрунтовано оцінити енергетичну ефективність системи електропостачання та визначити напрями її вдосконалення.

Фізичні причини втрат електроенергії у лініях і трансформаторах зумовлені насамперед тепловими процесами, магнітними явищами та неідеальністю матеріалів. Розуміння цих процесів є основою для розроблення методів зниження втрат — підвищення напруги передачі, оптимізації навантаження, покращення технічного стану обладнання, впровадження компенсаційних пристроїв і нових енергоефективних матеріалів.

1.3. Основні фактори, що впливають на рівень втрат електроенергії

Рівень втрат електроенергії в системах розподілу є комплексним показником, що залежить від великої кількості технічних, експлуатаційних, організаційних та зовнішніх факторів. Їхній вплив проявляється як на фізичному рівні - через зміну струмів, напруг, опорів і потужностей, так і на управлінському - через особливості обліку, планування та експлуатації електричних мереж.

Розуміння природи цих факторів є ключовою умовою для розроблення ефективних заходів із зниження втрат та підвищення енергетичної ефективності електропостачання промислових і комунальних споживачів.

1.3.1. Технічні фактори

Технічні фактори визначають фізичну величину втрат у елементах електричної мережі та безпосередньо пов'язані з конструктивними особливостями та технічним станом обладнання.

До основних із них належать:

Опір елементів мережі.

Втрати електроенергії пропорційні квадрату струму і активному опору провідників ($P_{\text{вт}} = I^2 \cdot R$). Опір залежить від матеріалу, довжини та перерізу провідників. Чим більший опір лінії, тим більші втрати. Тому використання

проводів із більшим перерізом або з матеріалів із меншим питомим опором (мідь, алюмінієві сплави) сприяє зменшенню втрат.

Рівень робочої напруги.

При передачі тієї самої потужності з підвищенням напруги зменшується струм у лінії, а отже - і втрати, які залежать від I^2 . Це є одним з основних принципів високовольтної передачі енергії. У низьковольтних мережах втрати, як правило, становлять найбільшу частку.

Довжина ліній електропередач.

Чим більша довжина лінії, тим більший її активний опір і, відповідно, вищі втрати. У розгалужених мережах комунального типу із значними протяжностями кабельних трас втрати можуть досягати істотних величин, особливо при малих перерізах проводів.

Стан ізоляції та контактних з'єднань.

Пошкодження або старіння ізоляції викликає витіки струму, а поганий контакт - локальний нагрів і підвищення перехідного опору. Ці явища призводять до додаткових теплових втрат і навіть аварійних ситуацій.

Завантаження трансформаторів.

Робота трансформаторів із перевантаженням спричиняє зростання втрат короткого замикання (пропорційно I^2), а робота з недовантаженням нераціональне споживання електроенергії через постійні втрати холостого ходу. Оптимальне навантаження становить близько 70–80 % номінальної потужності.

Реактивна потужність у мережі.

Наявність реактивної складової збільшує повний струм у лініях без корисного виконання роботи, що спричиняє додаткові активні втрати. Компенсація реактивної потужності за допомогою конденсаторних батарей або синхронних компенсаторів дозволяє знизити втрати до 10–15 %.

Гармонічні спотворення та несиметрія навантаження.

Наявність вищих гармонік у струмах збільшує діюче значення струму, а отже - і втрати. Несиметрія фаз у трифазних системах спричиняє додаткові втрати в нульовому проводі та трансформаторах.

Якість електроенергії.

Коливання напруги, флікер, перекоси фаз або частотні спотворення можуть призводити до погіршення режиму роботи електрообладнання, збільшення нагріву і втрат.

1.3.2. Експлуатаційні фактори

До експлуатаційних факторів відносяться умови, у яких функціонує система електропостачання, та режими її роботи. Основні з них:

Режими навантаження мережі.

Втрати змінюються в залежності від добового та сезонного графіка навантаження. Під час пікових годин, коли струми максимальні, втрати можуть збільшуватися в кілька разів.

Температура навколишнього середовища.

Підвищення температури збільшує питомий опір провідників. Для мідних та алюмінієвих проводів цей коефіцієнт становить приблизно 0,004 на 1 °C, тобто при підвищенні температури на 25 °C опір зростає майже на 10 %.

Якість технічного обслуговування.

Несвоєчасне очищення ізоляторів, підтяжка з'єднань, перевірка стану контактів або діагностика трансформаторів мають істотний вплив на рівень втрат. Неналежне обслуговування спричиняє збільшення перехідних опорів і виникнення локальних перегрівів.

Балансування навантажень.

Рівномірний розподіл фазних струмів у трифазних системах дозволяє мінімізувати втрати. Несиметричне навантаження створює додаткові струми у нульовому проводі, що призводить до перевантаження окремих фаз і підвищення втрат.

Стан електрообліку.

Некалібровані або застарілі прилади обліку спричиняють помилки у вимірюваннях, які відносяться до нетехнічних втрат. Використання сучасних систем АСКОЕ (автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії) значно підвищує точність оцінки балансу електроенергії.

1.3.3. Організаційні фактори

До організаційних факторів належать чинники, пов'язані з управлінням електричними мережами, плануванням режимів роботи та дотриманням нормативних вимог:

Раціональність схем електропостачання.

Надлишкова довжина мереж, дублювання ліній, неефективні схеми підключення споживачів можуть збільшити втрати. Оптимізація структури мережі дозволяє скоротити шлях передачі енергії та знизити втрати.

Планування графіків навантаження.

Згладжування пікових навантажень і вирівнювання графіка споживання забезпечують стабільний режим роботи мережі, що зменшує теплові втрати та підвищує ККД трансформаторів.

Контроль за несанкціонованими підключеннями.

Крадіжки електроенергії, підключення поза обліком або втручання у роботу лічильників створюють значні нетехнічні втрати, особливо у комунальному секторі.

Кваліфікація персоналу.

Недостатній рівень знань з експлуатації електричних мереж часто призводить до неправильних дій під час обслуговування, що підвищує ризик додаткових втрат.

1.3.4. Зовнішні фактори

Зовнішні умови також мають суттєвий вплив на рівень втрат електроенергії:

Кліматичні умови - температура, вологість, дощ, ожеледь, вітер і запиленість впливають на стан ізоляції, провідників та опор. У вологому середовищі збільшуються витоки струму й коронні втрати.

Техногенне та електромагнітне забруднення - призводить до погіршення якості ізоляції та появи паразитних струмів.

Стан навколишнього середовища - агресивні середовища (соляні тумани, промислові викиди) прискорюють старіння елементів мережі.

1.3.5. Взаємозв'язок факторів і їх комплексний вплив

Фактори, що впливають на втрати електроенергії, діють взаємопов'язано. Наприклад, перевантаження ліній спричиняє підвищення температури провідників, що збільшує опір і, відповідно, втрати. Несиметрія навантаження, у свою чергу, підвищує струми у нейтральних провідниках, викликаючи додаткові нагріви та спотворення напруги.

Тому для ефективного зниження втрат необхідно застосовувати системний підхід, що поєднує технічні, організаційні та експлуатаційні заходи: модернізацію обладнання, автоматизований моніторинг стану мережі, регулярні енергетичні аудити, впровадження засобів компенсації реактивної потужності та підвищення культури експлуатації.

Рівень втрат електроенергії визначається комплексом факторів - технічних, експлуатаційних, організаційних і зовнішніх. Найбільший вплив мають активний опір елементів мережі, навантаження, реактивна потужність і стан обладнання. Врахування всіх цих факторів при проектуванні, модернізації та експлуатації систем електропостачання дає змогу мінімізувати втрати, підвищити надійність роботи мереж і забезпечити енергетичну ефективність у промисловому та комунальному секторах.

1.4. Структура електричних мереж промислових і комунальних споживачів

Електричні мережі промислових і комунальних споживачів є складними багаторівневими системами, призначеними для приймання, розподілу та споживання електроенергії від системи зовнішнього електропостачання. Від структури та параметрів цих мереж залежать надійність енергопостачання, рівень втрат електроенергії, ефективність роботи обладнання та загальна енергоефективність об'єкта.

Основним завданням побудови структури електричних мереж є забезпечення оптимальної подачі електроенергії споживачам з урахуванням потужності навантажень, їхньої категорії за надійністю, конфігурації території, а також економічних та експлуатаційних вимог.

1.4.1. Загальна характеристика електричних мереж споживачів

Електричні мережі споживачів поділяються за призначенням на зовнішні та внутрішні:

Зовнішні електричні мережі - це мережі, які з'єднують споживача з джерелом електропостачання (електростанцією або підстанцією енергопостачальної компанії). Вони працюють на середніх і високих рівнях напруги (6–110 кВ) і забезпечують підведення потужності до ввідних підстанцій підприємства чи району.

Внутрішні електричні мережі - це розподільні системи всередині підприємства, населеного пункту або будівлі, які здійснюють подачу електроенергії безпосередньо до електроприймачів. Напруга таких мереж зазвичай становить 0,4–10 кВ.

Структура мереж формується за ієрархічним принципом - від високовольтних підстанцій до локальних розподільних щитів та споживачів. У загальному вигляді мережа може містити такі основні елементи:

✓ джерело електроживлення (енергосистема, власна електростанція);

- ✓ головну понижувальну підстанцію (ГПП);
- ✓ розподільні мережі середньої напруги (6–35 кВ);
- ✓ трансформаторні підстанції цехового або районного рівня;
- ✓ розподільні мережі низької напруги (0,4 кВ);
- ✓ електроприймачі - технологічне, освітлювальне та побутове обладнання.

1.4.2. Структура електричних мереж промислових споживачів

Промислові підприємства, як правило, мають власну розвинену систему електропостачання, що охоплює декілька рівнів напруги. Її основні особливості такі:

Джерело живлення.

Підприємства отримують електроенергію від енергосистеми через одну або кілька головних понижувальних підстанцій (ГПП), які приймають напругу 35, 110 або 150 кВ і понижують її до 6–10 кВ. На великих заводах ГПП часто мають два незалежні вводи від різних ліній для підвищення надійності.

Розподільна мережа середньої напруги (6–10 кВ).

Вона здійснює передачу електроенергії від ГПП до цехових трансформаторних підстанцій (ЦТП) або безпосередньо до потужних споживачів (наприклад, електродвигунів великої потужності, компресорів, насосів).

Мережі цього рівня можуть виконуватися у вигляді кабельних або повітряних ліній. Залежно від важливості споживачів застосовують різні схеми живлення - радіальні, кільцеві, магістральні або комбіновані.

Трансформаторні підстанції (ТП).

Вони понижують напругу з 6–10 кВ до 0,4 кВ і розподіляють її між робочими ділянками, цехами або окремими технологічними установками.

Для забезпечення енергетичної ефективності важливим є правильний вибір кількості та потужності трансформаторів, їхнього розміщення та завантаження.

Розподільна мережа низької напруги (0,4 кВ).

Цей рівень обслуговує безпосередньо виробниче обладнання, освітлення, системи вентиляції, автоматизації тощо.

У ній найчастіше виникають найбільші втрати електроенергії через малі перерізи провідників, великі довжини ліній та асиметрію навантаження.

Системи резервного та аварійного живлення.

Для споживачів I категорії за надійністю передбачаються автономні джерела - дизель-генератори, акумуляторні батареї або незалежні вводи від інших підстанцій.

Структура електропостачання промислового підприємства повинна забезпечувати:

- ✓ мінімальні втрати енергії на всіх рівнях;
- ✓ надійність електроживлення технологічних процесів;
- ✓ можливість гнучкого регулювання навантаження та компенсації реактивної потужності;
- ✓ безпеку персоналу та обладнання.

1.4.3. Структура електричних мереж комунальних споживачів

Комунальні споживачі - це житлові будинки, лікарні, школи, об'єкти торгівлі, транспорту та соціальної інфраструктури, які отримують електроенергію від міських або районних розподільних мереж. Структура таких мереж має свої особливості, обумовлені територіальною розосередженістю навантажень та потребою у високій надійності постачання.

Основні елементи комунальних мереж:

- ✓ Районні трансформаторні підстанції (РТП) - приймають електроенергію напругою 35 або 10 кВ від міської підстанції та знижують її до 10/0,4 кВ для розподілу між споживачами району. У великих містах РТП можуть бути об'єднані у кільцеві схеми для забезпечення двостороннього живлення.

✓ Розподільні мережі 10 кВ - подають електроенергію до житлових кварталів, мікрорайонів і об'єктів громадського призначення. Часто виконуються кабельними лініями, що зменшує втрати на витік і підвищує надійність.

Трансформаторні підстанції типу КТП (комплектні трансформаторні підстанції) - понижують напругу з 10 до 0,4 кВ і забезпечують живлення споживачів низьковольтних мереж. Розташовуються безпосередньо поблизу будівель або груп об'єктів.

✓ Розподільні мережі 0,4 кВ - забезпечують подачу електроенергії до житлових будинків, офісів, освітлення вулиць, систем опалення, водопостачання тощо. Цей рівень є найбільш розгалуженим і має найбільшу кількість відгалужень, тому саме тут спостерігаються найвищі питомі втрати.

✓ Внутрішньобудинкові мережі - включають стояки, квартирні вводи, розподільні щити, електроосвітлення та побутові прилади. Вони утворюють кінцеву ланку системи електропостачання.

Комунальні мережі характеризуються значною кількістю споживачів з невеликим навантаженням, але великою довжиною ліній, що призводить до підвищення втрат електроенергії, особливо при низькому коефіцієнті потужності.

1.4.4. Особливості побудови та експлуатації мереж

При проектуванні і експлуатації мереж промислових та комунальних споживачів необхідно враховувати такі особливості:

- категорії надійності споживачів згідно з ПУЕ;
- розосередженість навантажень - промислові споживачі зосереджені локально, а комунальні - територіально розподілені;
- умови навколишнього середовища - температура, вологість, запиленість;
- можливість резервування та автоматичного повторного включення;
- застосування сучасних систем керування (АСУ ТП, SCADA, АСКОВЕ);

- компенсацію реактивної потужності для підвищення коефіцієнта потужності;
- мінімізацію втрат енергії шляхом оптимізації перерізів проводів, скорочення довжин ліній, раціонального розміщення трансформаторів і підстанцій.

1.4.5. Порівняння структур промислових і комунальних мереж

Таблиця 1.1. - Порівняння структур промислових і комунальних мереж

Параметр	Промислові мережі	Комунальні мережі
Тип навантаження	Технологічне, двигуни, механізми	Освітлення, побутові прилади, опалення
Рівень напруги	0,4–110 кВ	0,4–35 кВ
Характер розташування споживачів	Компактне	Розосереджене
Схема живлення	Радіальна або кільцева	Переважно радіальна
Рівень втрат	Нижчий (через більшу концентрацію потужності)	Вищий (через довгі лінії та мале навантаження)
Можливість резервування	Висока	Обмежена
Система обліку	Автоматизована (АСКОЕ, SCADA)	Часто частково автоматизована

Структура електричних мереж промислових і комунальних споживачів має суттєві відмінності, обумовлені характером навантажень, масштабом споживання та вимогами до надійності. Промислові мережі зорієнтовані на забезпечення потужних технологічних процесів із мінімальними втратами, тоді як комунальні - на масове електропостачання розосереджених побутових і соціальних об'єктів.

Раціональна побудова структури мереж із урахуванням особливостей кожної категорії споживачів є ключовим чинником зниження втрат електроенергії, підвищення енергетичної ефективності та надійності електропостачання.

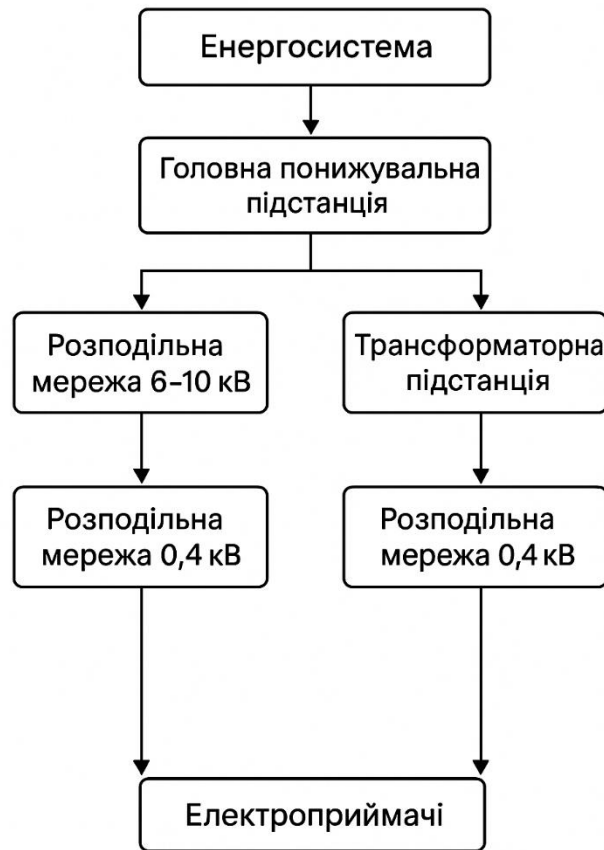


Рисунок 1.1. – Структура електричних мереж промислового споживача

1.5. Нормативно-правова база з оцінювання та регулювання втрат електроенергії в Україні

Система нормативно-правового забезпечення в галузі енергетики України спрямована на створення умов для ефективного використання паливно-енергетичних ресурсів, підвищення енергетичної безпеки держави та забезпечення справедливих обліку електричної енергії. Важливою складовою цієї системи є регулювання питань, пов'язаних із втратами електроенергії в мережах, їхнім обліком, оцінюванням і допустимими рівнями.

Нормативна база формується на основі законів України, підзаконних актів, державних стандартів, кодексів систем, а також методичних документів, затверджених Міністерством енергетики та Національною комісією, що здійснює державне регулювання у сферах енергетики та комунальних послуг (НКРЕКП).

1.5.1. Законодавчі акти України

1. Закон України «Про ринок електричної енергії» (2017 р.)

Цей закон є основоположним документом, який визначає засади функціонування ринку електричної енергії в Україні. Він регламентує взаємовідносини між учасниками ринку, механізми обліку, балансування та розподілу електроенергії, а також питання втрат у мережах. Зокрема, у статтях 42–45 визначено:

- ✓ обов'язки операторів систем розподілу (ОСР) щодо зменшення технічних втрат;
- ✓ вимоги до точності обліку електроенергії;
- ✓ порядок балансування енергетичних систем і визначення комерційних втрат.

2. Закон України «Про енергозбереження» (1994 р.)

Цей закон встановлює основні принципи державної політики в галузі раціонального використання енергетичних ресурсів. У ньому визначено:

- ✓ необхідність контролю та нормування втрат енергії в технологічних процесах;
- ✓ вимогу до підприємств щодо розроблення енергетичних балансів та енергетичних аудитів;
- ✓ зобов'язання впроваджувати заходи, спрямовані на зменшення втрат енергії.

3. Закон України «Про енергоефективність» (2021 р.)

Новий рамковий закон, який гармонізує українське законодавство з європейським у сфері енергоефективності. Він визначає:

- ✓ загальні принципи державної політики енергоефективності;
- ✓ систему моніторингу енергоспоживання та втрат;
- ✓ обов'язковість енергоаудитів підприємств та впровадження систем енергоменеджменту.

1.5.2. Підзаконні акти та регуляторні документи

1. Кодекс систем розподілу (КСР)

Затверджений постановою НКРЕКП №310 від 14.03.2018 р., КСР визначає технічні, організаційні та економічні умови функціонування системи розподілу. У документі передбачено:

- ✓ порядок розрахунку технологічних втрат електроенергії у мережах різних рівнів напруги;
- ✓ розмежування технічних і комерційних втрат;
- ✓ вимоги до вимірювального обладнання, його класів точності;
- ✓ методику балансування електроенергії між виробниками, операторами та споживачами.

2. Кодекс системи передачі (КСП)

Затверджений постановою НКРЕКП №309 від 14.03.2018 р., регулює діяльність НЕК «Укренерго». У ньому визначено принципи оцінки втрат у магістральних лініях електропередачі та нормативні показники ефективності для оператора системи передачі.

3. Порядок розрахунку нормативних технологічних втрат електричної енергії у мережах

Розроблений Міненерго України. Цей документ визначає:

- ✓ методи розрахунку нормативних втрат для повітряних і кабельних ліній, трансформаторів, розподільних пристроїв;
- ✓ допустимі рівні втрат залежно від напруги, конфігурації мережі та типу обладнання;
- ✓ вимоги до звітності енергопостачальних компаній щодо втрат.

1.5.3. Державні стандарти та методичні документи

Для розрахунку, нормування та аналізу втрат електроенергії в Україні застосовуються такі основні стандарти та методики:

ДСТУ EN 50160:2014 - «Характеристики напруги електропостачання у розподільних електричних мережах».

Визначає параметри якості електроенергії, від яких залежить рівень втрат (напруга, частота, симетрія, гармоніки).

ДСТУ ISO 50001:2020 - «Системи енергоменеджменту».

Передбачає створення на підприємствах системи моніторингу енергоспоживання, включно з контролем втрат у мережах.

Методика визначення технологічних втрат електроенергії у мережах розподільних електричних систем (затверджена Міненерго).

Містить формули та алгоритми для обчислення втрат у лініях і трансформаторах, враховуючи навантаження, довжину, переріз та тип провідників.

ПУЕ (Правила улаштування електроустановок).

У розділах 1.3, 1.4, 1.7 і 2.5 встановлено технічні вимоги до проектування, прокладання та експлуатації мереж, спрямовані на мінімізацію втрат електроенергії.

1.5.4. Європейські директиви та міжнародна інтеграція

Україна як член Енергетичного Співтовариства ЄС зобов'язана імплементувати європейські нормативні документи у сфері енергетики, зокрема:

Директива 2012/27/ЄС про енергоефективність - встановлює обов'язкові національні цілі зі зниження енергоспоживання та втрат;

Директива 2009/72/ЄС - про спільні правила внутрішнього ринку електроенергії, яка визначає вимоги до обліку та звітності щодо втрат у системах передачі й розподілу;

Регламент (ЄС) № 543/2013 - передбачає створення національних систем моніторингу енергетичних балансів і втрат електроенергії.

Імплементация цих документів у національне законодавство сприяє гармонізації української енергетичної політики з європейськими стандартами, підвищує прозорість і ефективність роботи енергетичних компаній.

1.5.5. Практичне застосування нормативної бази

На практиці оцінка та регулювання втрат електроенергії здійснюються відповідно до таких процедур:

- ✓ розрахунок нормативних втрат згідно з методиками Міненерго;
- ✓ порівняння фактичних втрат із нормативними для оцінки ефективності роботи ОСР;
- ✓ регулювання тарифів на розподіл електроенергії НКРЕКП із урахуванням рівня втрат;
- ✓ проведення енергетичних аудитів та інвестиційних програм зі зниження втрат у мережах.

Усі оператори системи розподілу зобов'язані щорічно подавати до НКРЕКП звіт про втрати електроенергії, який містить дані про:

- ✓ загальні та технологічні втрати;
- ✓ питомі втрати за рівнями напруги;
- ✓ виконані заходи з енергоефективності.

Нормативно-правова база України у сфері оцінювання та регулювання втрат електроенергії є комплексною та багаторівневою. Вона охоплює законодавчі, регуляторні, технічні та методичні документи, що визначають принципи, правила та критерії ефективного використання електроенергії.

Дотримання цих норм є обов'язковою умовою для операторів систем розподілу та споживачів, а їх реалізація сприяє:

- ✓ підвищенню енергетичної ефективності країни,
- ✓ зниженню втрат електроенергії в мережах,
- ✓ покращенню якості електропостачання,
- ✓ досягненню європейських стандартів енергетичного менеджменту.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 1:

Втрати електроенергії є невід'ємною частиною процесу її передачі та розподілу в електричних мережах. Вони виникають у результаті перетворення частини електричної енергії на інші види - теплову, електромагнітну або хімічну - під час проходження струму через елементи системи.

Класифікація втрат дозволяє систематизувати їх за походженням і характером прояву:

- ✓ технічні втрати, що зумовлені фізичними процесами у провідниках, трансформаторах та іншому обладнанні;
- ✓ нетехнічні (комерційні) втрати, які виникають унаслідок похибок вимірювання, обліку чи несанкціонованого споживання.

Також виділяють постійні (втрати холостого ходу) і змінні (пропорційні навантаженню) складові. Чітке розмежування видів втрат є необхідним для їхнього коректного обліку, аналізу та розроблення заходів щодо їх зниження.

Основними фізичними причинами виникнення втрат електроенергії є електричний опір провідників та елементів кола, а також магнітні та діелектричні явища в трансформаторах і кабельних лініях.

У лініях електропередач втрати зумовлені:

- ✓ нагріванням провідників (активні втрати, $P = I^2 \cdot R$);
- ✓ струмами витоку через ізоляцію;
- ✓ коронними розрядами при високих напругах.

У трансформаторах виникають:

- ✓ втрати холостого ходу (у сталевому осерді - магнітні втрати, гістерезисні та вихрових струмів);
- ✓ втрати короткого замикання (активні втрати в обмотках при навантаженні).

Таким чином, втрати електроенергії мають чітко визначену фізичну природу, і їхній рівень залежить від електричних параметрів, навантаження, напруги та технічного стану обладнання.

На рівень втрат електроенергії впливає сукупність технічних, експлуатаційних, організаційних та зовнішніх факторів.

До технічних належать опір елементів мережі, напруга, довжина ліній, завантаження трансформаторів і рівень реактивної потужності.

Експлуатаційні фактори включають температуру навколишнього середовища, режим навантаження, якість технічного обслуговування, балансування фаз.

Організаційні - це раціональність схем живлення, облік, управління навантаженнями, контроль за втручанням у лічильники.

Зовнішні - кліматичні умови, забруднення ізоляції, техногенні впливи.

Комплексний підхід до врахування цих факторів є передумовою ефективного управління енергетичними втратами. Системна модернізація, автоматизований облік і компенсація реактивної потужності дозволяють суттєво знизити сумарні втрати електроенергії.

Електричні мережі промислових і комунальних споживачів мають багаторівневу структуру, яка включає елементи від джерела живлення до кінцевих приймачів. Залежно від призначення та рівня напруги виділяють високовольтні, розподільні та внутрішні мережі.

Для промислових підприємств характерна наявність власних трансформаторних підстанцій, систем внутрішнього розподілу, резервних ліній і пристроїв компенсації реактивної потужності.

У комунальному секторі переважають розгалужені низьковольтні мережі, що обслуговують житлові будинки, об'єкти інфраструктури та адміністративні споруди.

Структура мереж безпосередньо впливає на рівень втрат: чим більша протяжність ліній, менший переріз провідників та гірше збалансоване навантаження - тим вищі втрати електроенергії. Тому проектування та експлуатація мереж повинні базуватися на принципах енергетичної оптимізації, надійності та економічності.

У результаті проведеного аналізу встановлено, що втрати електроенергії є комплексним показником, який відображає ефективність роботи всієї системи електропостачання. Їхня природа зумовлена як фізичними процесами, що відбуваються у провідниках і трансформаторах, так і техніко-організаційними умовами експлуатації мереж.

Систематизація видів втрат показала, що основну частку становлять технічні втрати, пов'язані з опором елементів, рівнем напруги та навантаження, тоді як нетехнічні втрати є результатом недосконалого обліку або несанкціонованого споживання.

Визначено, що структура електричних мереж промислових і комунальних споживачів безпосередньо впливає на рівень втрат, а підвищення ефективності їхньої роботи можливе за рахунок:

- ✓ оптимізації схем живлення та зменшення протяжності ліній;
- ✓ удосконалення систем контролю та обліку;
- ✓ впровадження автоматизованих систем управління енергоспоживанням;
- ✓ регулярного моніторингу технічного стану мереж і трансформаторів.

Отже, теоретичні засади втрат електроенергії становлять базу для подальших досліджень у напрямку кількісного аналізу, оцінки енергоефективності мереж та розроблення практичних заходів зі зниження втрат, що розглядатимуться у наступних розділах роботи.

РОЗДІЛ 2. МЕТОДИКИ ВИЗНАЧЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ЇХ АНАЛІЗ

2.1. Огляд нормативних методик оцінки втрат електроенергії

Оцінювання втрат електроенергії в електричних мережах є важливою складовою управління енергоефективністю підприємств та енергетичних систем загалом. В сучасній практиці розрізняють нормативні та розрахункові методики визначення втрат.

Нормативні методики базуються на чинних державних стандартах, методичних рекомендаціях Міністерства енергетики України, Кодексах систем передачі та розподілу, а також на міжнародних нормах і директивах ЄС, адаптованих до українського законодавства.

Метою застосування нормативних методик є встановлення обґрунтованих орієнтирів для оцінки фактичних втрат електроенергії, визначення допустимих рівнів втрат у різних типах мереж і обґрунтування планових показників енергоефективності операторів систем розподілу та промислових споживачів.

2.1.1. Призначення та принципи нормативних методик

Нормативні методики дозволяють оцінювати втрати електроенергії без проведення детальних експериментальних вимірювань, використовуючи усереднені коефіцієнти, параметри мереж та характеристики обладнання.

Їхні основні принципи такі:

1. Єдність підходів - оцінка втрат має проводитися за уніфікованими правилами, що забезпечують порівнянність результатів між різними підприємствами та операторами.
2. Прозорість та обґрунтованість - усі вихідні дані (довжина ліній, переріз провідників, тип трансформаторів) повинні бути підтверджені технічною документацією.

3. Нормативність - результати оцінювання порівнюються з установленими нормативними втратами, затвердженими Міністерством енергетики або НКРЕКП.

4. Адаптивність - методики допускають уточнення нормативів залежно від місцевих умов (температурного режиму, рівня напруги, завантаженості мережі тощо).

2.1.2. Основні нормативні документи з оцінювання втрат електроенергії

В нормативній практиці України застосовується низка документів, що визначають методики розрахунку втрат електроенергії:

1. «Методика визначення технологічних втрат електричної енергії у мережах електропередачі та розподілу», затверджена Міністерством енергетики України. Цей документ є базовим і встановлює порядок визначення нормативних технологічних втрат у лініях та трансформаторах усіх рівнів напруги. Методика передбачає обчислення втрат у кожній ділянці мережі окремо та сумування їх за результатами балансового розрахунку.

2. Кодекс систем розподілу (КСР), затверджений постановою НКРЕКП №310 від 14.03.2018 р. Визначає вимоги до розрахунку нормативних і фактичних втрат, порядок їхнього врахування під час планування тарифів, а також встановлює критерії допустимих відхилень.

3. Порядок формування та подання звітності щодо втрат електроенергії операторами систем розподілу, затверджений НКРЕКП. Регламентує, як підприємства повинні проводити оцінку втрат, які дані збираються, і як вони мають звітувати про рівень енергоефективності мереж.

4. ДСТУ EN 50160:2014 «Характеристики напруги електропостачання у розподільних електричних мережах». Хоча цей стандарт безпосередньо не встановлює методи розрахунку втрат, він визначає якісні параметри напруги, які впливають на енергетичні втрати (наприклад, коливання, гармоніки, асиметрія фаз).

5. ДСТУ ISO 50001:2020 «Системи енергоменеджменту». Визначає загальні підходи до створення системи контролю, моніторингу та аналізу енергетичних втрат у межах підприємств.

2.1.3. Структура нормативного розрахунку втрат електроенергії

Згідно з Методикою Міненерго, загальні технологічні втрати електроенергії у мережі ($W_{\text{тех}}$) визначаються як сума втрат у її основних елементах:

$$W_{\text{тех}} = W_{\text{лін}} + W_{\text{тр}} + W_{\text{доп}}, \quad (2.1.)$$

де

$W_{\text{лін}}$ - втрати в лініях електропередачі;

$W_{\text{тр}}$ - втрати в трансформаторах;

$W_{\text{доп}}$ - втрати в допоміжному обладнанні (шинах, апаратах, вимірювальних трансформаторах тощо).

Для кожної складової визначається власна методика:

Втрати в лініях електропередачі розраховуються за формулою:

$$W_{\text{лін}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot t, \quad (2.2.)$$

де I - середній струм навантаження, R - активний опір лінії, t - час передачі енергії.

Втрати в трансформаторах поділяються на:

- втрати холостого ходу P_0 , що не залежать від навантаження;
- втрати короткого замикання P_k , пропорційні квадрату струму навантаження:

$$W_{\text{тр}} = (P_0 + P_k \cdot \beta^2) \cdot T, \quad (2.3.)$$

де β - відносне навантаження, T - тривалість роботи трансформатора.

Загальні нормативні втрати виражаються у відсотках від поданої електроенергії:

$$\eta_{\text{вт}} = \frac{W_{\text{тех}}}{W_{\text{перед}}} \cdot 100\% \quad (2.4.)$$

2.1.4. Нормативні рівні втрат у різних класах напруги

Залежно від рівня напруги мережі встановлюються орієнтовні значення допустимих технологічних втрат, які враховуються при тарифоутворенні та енергетичному плануванні:

Таблиця 2.1. - Орієнтовні значення допустимих технологічних втрат

Рівень напруги	Тип мережі	Нормативні втрати, % від поданої енергії
110–150 кВ	Магістральні лінії передачі	1,0–2,0
35 кВ	Розподільні лінії середньої напруги	2,0–4,0
6–10 кВ	Розподільні мережі міських і промислових споживачів	3,0–6,0
0,4 кВ	Мережі низької напруги	6,0–12,0

Наведені межі є орієнтовними та залежать від конкретних технічних умов, протяжності мережі, типу провідників і трансформаторного обладнання.

2.1.5. Переваги та обмеження нормативних методик

Переваги:

- ✓ простота розрахунків та можливість застосування для великої кількості об'єктів;
- ✓ уніфікація підходів між різними енергетичними компаніями;
- ✓ можливість порівняльного аналізу між регіонами;
- ✓ використання в системах тарифоутворення та енергетичного аудиту.

Обмеження:

- ✓ усередненість коефіцієнтів, що знижує точність;
- ✓ відсутність урахування короткочасних режимів або асиметрії навантаження;
- ✓ складність адаптації до сучасних умов Smart Grid або енергетичних мікросистем.

Нормативні методики оцінки втрат електроенергії є обов'язковою складовою управління енергетичною ефективністю в Україні. Вони забезпечують базу для:

- ✓ контролю ефективності роботи операторів систем розподілу;
- ✓ планування технічних заходів зі зменшення втрат;
- ✓ тарифного регулювання та економічного стимулювання енергозбереження.

Водночас, для підвищення точності оцінок нормативні методики доцільно поєднувати з розрахунковими та експериментальними підходами, що дозволить враховувати реальні режими роботи мережі, динамічні зміни навантажень і впровадження нових технологій вимірювання.

2.2. Розрахункові методи визначення втрат у розподільних мережах

Втрати електроенергії у розподільних мережах поділяються на технічні та нетехнічні. Технічні втрати зумовлені фізичними процесами, що відбуваються під час передавання електроенергії по проводах, трансформаторах та інших елементах системи, тоді як нетехнічні - це втрати, пов'язані з похибками обліку, несанкціонованим споживанням тощо.

Для визначення технічних втрат використовуються розрахункові методи, що базуються на аналітичному або моделювальному підході. Основні з них такі:

1. Аналітичний метод (спрощений розрахунок)

Застосовується для оцінки втрат у ділянках мережі за відомими параметрами провідників та струмів навантаження.

Формула для втрат потужності у лінії:

$$\Delta P = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (2.5)$$

де

I - струм навантаження, А;

R - активний опір фази лінії, Ом.

Втрати електроенергії за певний період часу:

$$\Delta W = \Delta P \cdot t \quad (2.6.)$$

де t - тривалість передачі енергії, год.

2. Метод еквівалентних навантажень

Використовується у випадках, коли навантаження змінюється в часі. Реальні графіки навантажень замінюють еквівалентними постійними значеннями, що дають ті самі втрати за добу або інший розрахунковий період.

Еквівалентний струм визначається за формулою:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt} \quad (2.7)$$

3. Балансовий метод

Ґрунтується на порівнянні електроенергії, що надійшла в мережу, з тією, що відпущена споживачам. Різниця між цими величинами визначає сумарні втрати, що включають технічні та нетехнічні складові.

$$\Delta W = W_{\text{вхід}} - W_{\text{вихід}} \quad (2.8)$$

4. Імітаційне моделювання (комп'ютерні методи)

Для складних мереж з великою кількістю вузлів застосовують спеціалізовані програми (наприклад, DIgSILENT PowerFactory, ETAP, NEPLAN тощо), які дають змогу визначити втрати на основі моделі електричної мережі, враховуючи топологію, параметри елементів і графіки навантаження.

Таким чином, вибір методу залежить від необхідної точності розрахунків, складності мережі та наявних вихідних даних. У практиці експлуатаційних підприємств найчастіше використовують поєднання аналітичних і балансових методів із застосуванням програмного забезпечення для уточнення результатів.

2.3. Порівняльна характеристика нормативних і розрахункових підходів

У практиці визначення втрат електроенергії в розподільних мережах застосовуються два основні підходи - нормативний та розрахунковий. Обидва

мають спільну мету - оцінити обсяг втрат і забезпечити контроль ефективності функціонування електричних мереж, проте суттєво відрізняються за методологією, точністю та сферою застосування.

Нормативний підхід

Нормативний метод базується на використанні установлених норм втрат, затверджених державними або галузевими документами (наприклад, Методики визначення технологічних витрат електричної енергії в електричних мережах).

Такі норми встановлюються залежно від:

- ✓ типу та класу напруги мережі (0,4; 6; 10; 35 кВ тощо);
- ✓ протяжності ліній та їх конструктивних параметрів;
- ✓ кількості та потужності трансформаторних підстанцій;
- ✓ середнього навантаження та режиму роботи мережі.

Переваги нормативного підходу:

- ✓ простота застосування та відсутність потреби у великій кількості вихідних даних;
- ✓ можливість оперативного контролю втрат на підприємстві;
- ✓ використання у звітності, енергетичному балансі та при тарифоутворенні.

Недоліки:

- ✓ низька точність, оскільки норми усереднені для типових умов;
- ✓ не враховуються реальні режими навантажень і фактичний стан обладнання;
- ✓ не дозволяє ідентифікувати місця підвищених втрат у мережі.

Розрахунковий підхід

Розрахунковий метод ґрунтується на аналітичному або моделювальному визначенні втрат на основі реальних параметрів мережі - довжин ліній, перерізів проводів, опорів, струмів навантажень, втрат у трансформаторах тощо.

Він дозволяє визначити як миттєві, так і середньодобові чи річні втрати з урахуванням змін навантаження в часі.

Переваги розрахункового підходу:

- ✓ висока точність оцінювання втрат;
- ✓ можливість оптимізації режимів роботи мережі;
- ✓ придатність для техніко-економічних розрахунків, проектування і модернізації мереж;
- ✓ дозволяє виділити окремі складові втрат (у лініях, трансформаторах, апаратурі).

Недоліки:

- ✓ потребує великої кількості достовірних вхідних даних;
- ✓ трудомісткий у ручних розрахунках, потребує спеціалізованого ПЗ;
- ✓ складніший для використання у щоденній експлуатаційній діяльності.

Таблиця 2.2. - Порівняльна таблиця підходів

Критерій	Нормативний підхід	Розрахунковий підхід
Джерело даних	Установлені норми	Реальні параметри мережі
Точність	Середня	Висока
Складність виконання	Низька	Висока
Необхідність вимірювань	Необов'язкова	Обов'язкова
Застосування	Звітність, планування	Проектування, оптимізація, діагностика
Можливість деталізації втрат	Немає	Є

Таким чином, нормативний підхід доцільно використовувати для оперативної оцінки та звітності, тоді як розрахунковий підхід - для поглибленого аналізу, проектних розрахунків і технічної оптимізації системи електропостачання.

2.4. Аналіз точності та обмежень існуючих методик

Оцінювання втрат електроенергії у розподільних мережах може виконуватись різними методами, однак кожен з них має певні обмеження та рівень точності, що визначається повнотою вихідних даних, прийнятими спрощеннями та умовами експлуатації електричних мереж.

1. Точність нормативних методик

Нормативні методики ґрунтуються на використанні середніх питомих норм втрат, визначених для типових мереж і режимів їх роботи. Їхня точність зазвичай становить $\pm 10\text{--}20\%$ від фактичних втрат, що пояснюється:

- ✓ узагальненим характером нормативів, які не враховують конкретні умови навантаження;
- ✓ відсутністю корекції на старіння обладнання, фактичний стан ізоляції та контактних з'єднань;
- ✓ спрощеними припущеннями щодо графіків навантаження (вважається постійним або середньодобовим).

Попри це, нормативні методи залишаються ефективними для експрес-оцінки та облікових цілей, однак не підходять для точного енергетичного аналізу.

2. Точність розрахункових (аналітичних) методів

Аналітичні методи базуються на визначенні втрат через розрахунок активних опорів елементів мережі та реальних струмів навантаження. Точність таких методів залежить від якості вхідних даних - вимірюваних струмів, напруг, температури провідників тощо. За наявності достовірних даних похибка може бути в межах $2\text{--}5\%$, але за умови використання усереднених параметрів навантаження похибка зростає до $8\text{--}10\%$.

Основні обмеження аналітичних методів:

- ✓ потреба у великій кількості вимірювальних даних;
- ✓ складність у випадках розгалужених мереж із несиметричними навантаженнями;

✓ необхідність врахування реактивної складової потужності та втрат у трансформаторах, що часто ігнорується при спрощених розрахунках.

3. Обмеження моделювальних методів

Імітаційне моделювання (за допомогою програм типу DIgSILENT PowerFactory, ETAP, NEPLAN) забезпечує найвищу точність - до 1–2 %, проте має такі обмеження:

- ✓ потребує детальної топології мережі, паспортних характеристик обладнання та часових графіків навантаження;
- ✓ висока трудомісткість підготовки моделі;
- ✓ залежність результатів від правильності налаштування алгоритмів розрахунку та вибору математичних моделей елементів.

4. Загальний аналіз похибок

Загалом, точність визначення втрат обмежується впливом таких чинників:

- ✓ недостатня кількість вимірювань у контрольних точках мережі;
- ✓ спрощення у моделях (ігнорування зміни температури, реактивних складових, несиметрії);
- ✓ некоректні дані обліку або похибки вимірювальних приладів;
- ✓ неповне урахування нетехнічних втрат (крадіжки, похибки обліку, втручання у схеми).

Таблиця 2.3. - Узагальнення

Методика	Середня похибка	Основні обмеження	Сфера доцільного застосування
Нормативна	$\pm 10\text{--}20\%$	Усереднення параметрів, не враховує реальні режими	Планові та звітні розрахунки
Аналітична	$\pm 5\text{--}10\%$	Обмежена точність при змінних навантаженнях	Техніко-економічний аналіз, локальні ділянки мережі
Моделювальна	$\pm 1\text{--}2\%$	Висока складність, потребує повних даних	Проектування, оптимізація режимів, наукові дослідження

Таким чином, жодна з існуючих методик не забезпечує абсолютної точності. Вибір методу повинен залежати від мети аналізу, доступності даних та рівня деталізації, необхідного для конкретного завдання.

У сучасних умовах найефективнішими є комбіновані підходи, що поєднують нормативні та розрахункові методи з елементами моделювання та автоматизованого збору даних (AMPC, SCADA).

2.5. Обґрунтування вибору методики для проведення подальших досліджень

Проведений аналіз існуючих підходів до визначення втрат електроенергії у розподільних мережах показав, що кожна з розглянутих методик має свої переваги та обмеження, які необхідно враховувати при виборі методу для практичних розрахунків або досліджень.

Нормативний підхід є простим у застосуванні та не потребує значного обсягу вихідних даних, проте забезпечує лише орієнтовну оцінку втрат і не дозволяє враховувати реальні режими роботи електричної мережі. Тому його доцільно використовувати лише для контрольних або планово-звітних розрахунків.

Аналітичний розрахунковий метод має вищу точність і дозволяє визначати втрати в окремих елементах мережі на основі їх параметрів (опорів, довжин, перерізів провідників, струмів навантаження). Його застосування забезпечує можливість оцінити вплив різних чинників на втрати та провести порівняння варіантів технічних рішень. Разом з тим, аналітичний метод вимагає достовірних вихідних даних і певних спрощень при моделюванні режимів навантаження.

Моделювальні методи, що реалізуються за допомогою сучасного програмного забезпечення (DIgSILENT PowerFactory, ETAP, NEPLAN тощо), забезпечують найвищу точність результатів і дають змогу виконувати багатоваріантний аналіз. Проте вони потребують детальної бази даних про всі елементи мережі та значних трудових і часових витрат на створення моделі.

Враховуючи:

- ✓ необхідність отримання достатньо точних результатів при помірному обсязі вхідних даних,
- ✓ потребу у можливості оцінювання втрат у різних елементах мережі,
- ✓ а також наявність експериментальних або паспортних характеристик основних елементів,
- ✓ для подальших досліджень у даній роботі обрано розрахунковий (аналітичний) метод визначення втрат електроенергії.

Цей підхід забезпечує оптимальне співвідношення між точністю та трудомісткістю розрахунків, дозволяє врахувати реальні параметри ліній та трансформаторів, а також провести подальший аналіз впливу навантаження, довжини ліній і напруги на рівень втрат.

Отримані результати можуть бути використані для побудови математичної моделі енергетичних втрат і розроблення рекомендацій щодо зменшення їх величини.

Таким чином, у подальших розрахунках і дослідженнях буде застосовано аналітичну розрахункову методику, як найбільш збалансований і практично доцільний підхід для розподільних мереж середньої напруги.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 2:

В цьому розділі було розглянуто основні підходи та методики, які застосовуються для визначення втрат електроенергії в розподільних електричних мережах, а також проведено їх порівняльний аналіз з точки зору точності, складності та сфери застосування.

В результаті аналізу нормативних методик встановлено, що вони базуються на використанні затверджених питомих норм втрат, які враховують тип мережі, клас напруги, довжину ліній і середні режими навантаження. Ці методики зручні у використанні та придатні для планово-звітних розрахунків, проте мають обмежену точність через усереднення параметрів і неврахування реальних режимів роботи.

Розрахункові методи, навпаки, дозволяють визначати втрати на основі фактичних параметрів елементів мережі - опорів проводів, довжин ліній, струмів навантаження та характеристик трансформаторів. Вони забезпечують значно вищу точність і можуть бути використані для техніко-економічного аналізу, оптимізації режимів роботи та виявлення місць найбільших втрат.

Проведено порівняння нормативного та розрахункового підходів, яке показало, що нормативні методи є більш простими, але менш точними, тоді як розрахункові — більш трудомісткі, проте дають можливість отримати достовірні результати, придатні для подальших інженерних досліджень.

Аналіз точності та обмежень показав, що похибка нормативних методів може досягати 15–20 %, тоді як аналітичні методики за наявності достовірних вхідних даних забезпечують похибку не більше 5–10 %. Найточнішими є моделювальні підходи, однак їх застосування потребує значних ресурсів і повної інформації про мережу.

На підставі проведеного огляду та аналізу обґрунтовано вибір аналітичного розрахункового методу як основного для подальших досліджень у цій роботі. Такий підхід забезпечує оптимальне співвідношення між точністю, трудомісткістю й обсягом необхідних даних, що дозволяє глибоко

дослідити характер втрат електроенергії та розробити практичні рекомендації щодо їх зменшення.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ НА ПРИКЛАДІ МЕРЕЖ ПРОМИСЛОВОГО ТА КОМУНАЛЬНОГО СПОЖИВАЧІВ

3.1. Характеристика досліджуваних об'єктів електропостачання

Досліджувані об'єкти електропостачання належать до розподільчої мережі напругою 6–10 кВ, яка забезпечує електроенергією споживачів міського та сільського типу. Електропостачання реалізується від головної понижувальної підстанції (ГПП), до складу якої входять два силові трансформатори типу ТМ-10000/110–10/6 з потужністю по 10 МВА кожен. Підстанція має схему з двома секціями шин, що з'єднуються секційним вимикачем, що забезпечує надійність живлення при аварійному або плановому відключенні одного з трансформаторів.

Від шин ГПП живляться фідери 10 кВ, які розподіляють електроенергію до районних трансформаторних підстанцій типу КТП 10/0,4 кВ. На кожному фідері встановлені сучасні вакуумні вимикачі з можливістю дистанційного керування та обліку струмів навантаження. Загальна протяжність повітряних і кабельних ліній становить близько 48 км, з них 32 км - повітряні лінії марки АС 50/8, решта - кабельні лінії з алюмінієвими жилами типу ААШв перерізом 70 мм².

Система електропостачання має радіально-магістральну структуру, що характерна для мереж середньої напруги. Основними споживачами є житловий сектор, об'єкти комунального господарства, а також промислові підприємства невеликої потужності. Середня встановлена потужність на фідер становить 600–800 кВт, коефіцієнт завантаження ліній протягом року змінюється в межах 0,35–0,7.

Облік електроенергії здійснюється на стороні 0,4 кВ за допомогою електронних лічильників з імпульсним виходом, що дозволяє проводити аналіз технічних і нетехнічних втрат у системі. Для підвищення

енергоефективності та зниження втрат на підстанціях застосовуються конденсаторні установки реактивної потужності, що підтримують коефіцієнт потужності не нижче 0,93.

Досліджувана мережа має типові для систем електропостачання середньої напруги особливості - значну протяжність ліній, нерівномірність навантаження по фідерах, сезонні коливання споживання електроенергії та вплив старіння проводів і трансформаторного обладнання на величину технічних втрат. Ці фактори враховуються при подальших розрахунках і аналізі ефективності роботи електричної мережі.

3.2. Аналіз електричних схем живлення та параметрів мереж

Система електропостачання, що розглядається, побудована за радіально-магістральною схемою з живленням від головної понижувальної підстанції (ГПП) напругою 110/10 кВ. Вихідні фідери 10 кВ забезпечують живлення районних трансформаторних підстанцій типу КТП 10/0,4 кВ, які розташовані поблизу споживачів. Така структура дозволяє мінімізувати довжину ліній низької напруги та зменшити втрати електроенергії при її розподілі.

На кожному фідері встановлено сучасні вакуумні вимикачі з мікропроцесорними пристроями релейного захисту та автоматики, що забезпечують швидке відключення пошкоджених ділянок мережі. Наявність секційного вимикача на ГПП дає змогу здійснювати резервування живлення споживачів у разі аварійного відключення одного з трансформаторів або ліній.

Схеми живлення фідерів передбачають одностороннє живлення з можливістю тимчасового підключення резервного джерела. Це спрощує експлуатацію, але водночас підвищує чутливість мережі до аварій на окремих ділянках. Для підвищення надійності в мережі передбачено міжфідерні перемички, які дозволяють здійснювати оперативні перемикання під час ремонтів або пошкоджень.

Основні параметри електричних мереж подано в таблиці 3.1.

Таблиця 3.1. – Основні параметри електричних мереж

Показник	Позначення	Одиниця вимірювання	Середнє значення
Номинальна напруга мережі	$U_{\text{ном}}$	кВ	10
Середня довжина фідера	L	км	3,5–5,0
Переріз проводу	S	мм ²	50–70
Активний опір лінії	R	Ом/км	0,62–0,75
Реактивний опір лінії	X	Ом/км	0,35–0,40
Середнє навантаження на фідер	$P_{\text{ср}}$	кВт	600–800
Коефіцієнт потужності	$\cos\varphi$	–	0,92–0,95
Коефіцієнт завантаження ліній	k_3	–	0,4–0,7

На основі параметрів проводів і середніх струмів навантаження розраховується активна потужність втрат у лініях за формулою:

$$P_{\text{вт}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3.1.)$$

а також втрати електроенергії за певний період:

$$W_{\text{вт}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot t \quad (3.2.)$$

де

I - середній струм фази,

R - активний опір проводу однієї фази,

t - тривалість передачі електроенергії.

Для оцінки енергоефективності та втрат напруги в мережі використовуються спрощені однолінійні схеми, побудовані в середовищі AutoCAD Electrical або ETAP, що відображають зв'язки між підстанціями, фідерами та споживачами. Аналіз схем показує, що максимальні падіння напруги спостерігаються на найдовших повітряних лініях при високих навантаженнях, особливо в пікові години.

Крім того, розрахунок показників технічних втрат свідчить, що основна частка втрат припадає на силові трансформатори (до 35–40 % загальних втрат) та повітряні лінії 10 кВ (приблизно 50 %). Найменші втрати мають місце у кабельних лініях завдяки меншим значенням активного опору.

Загалом електричні схеми живлення досліджуваної мережі є типовими для систем розподілу напругою 6–10 кВ. Вони характеризуються достатньою надійністю та енергоефективністю, проте потребують подальшої оптимізації структури навантажень і впровадження систем моніторингу енергетичних показників для зниження технічних втрат електроенергії.

3.3. Розрахунок втрат електроенергії з використанням розрахункових формул

Розрахунок технічних втрат електроенергії виконується з урахуванням реальних параметрів елементів електричної мережі: довжин ліній, типів проводів, перерізів, опорів, а також навантажень на трансформатори та фідери.

Усі розрахунки базуються на аналітичних залежностях, що визначають втрати потужності та енергії у провідниках і трансформаторах під час передачі електроенергії.

1. Втрати потужності у лініях електропередачі

Активні втрати потужності в одній лінії трифазної мережі визначаються формулою:

$$P_{\text{вт,л}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3.3.)$$

де

I - робочий струм у фазі, А;

R - активний опір лінії, Ом, який залежить від довжини і типу проводу:

$$R = r_0 \cdot l \quad (3.4.)$$

де

r_0 - питомий опір проводу, Ом/км;

l - довжина лінії, км.

2. Втрати електроенергії у лініях за період

Втрати електроенергії у лінії за певний період часу ТТТ обчислюються за формулою:

$$W_{\text{вт,л}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot T \quad (3.5.)$$

або з урахуванням коефіцієнта використання потужності:

$$W_{\text{вт,л}} = 3 \cdot I_{\text{н}}^2 \cdot R \cdot T \cdot k_{\text{вик}} \quad (3.6)$$

де

$I_{\text{н}}$ - номінальний струм навантаження лінії, А;

$k_{\text{вик}}$ - коефіцієнт використання потужності (0,25–0,35 для розподільних мереж);

T - тривалість розрахункового періоду, год.

Для практичних розрахунків струм визначають за переданою потужністю:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{л}} \cdot \cos \varphi} \quad (3.7)$$

де

P - активна потужність навантаження, кВт;

$U_{\text{л}}$ - лінійна напруга, кВ;

$\cos \varphi$ - коефіцієнт потужності.

3. Втрати електроенергії у силових трансформаторах

Втрати у трансформаторах поділяються на постійні (втрати холостого ходу) та змінні (втрати короткого замикання).

Загальні втрати електроенергії трансформатора за період ТТТ визначаються формулою:

$$W_{\text{вт,тр}} = (P_0 + P_k \cdot k_3^2) \cdot T \quad (3.8)$$

де

P_0 - потужність втрат холостого ходу, кВт;

P_k - потужність втрат короткого замикання при номінальному навантаженні, кВт;

k_3 - коефіцієнт завантаження трансформатора.

Коефіцієнт завантаження визначається як:

$$k_3 = \frac{S_{\text{ф}}}{S_{\text{н}}} \quad (3.9)$$

де

$S_{\text{ф}}$ - фактична повна потужність, кВА;

$S_{\text{н}}$ - номінальна потужність трансформатора, кВА.

4. Загальні втрати електроенергії у мережі

Сумарні технічні втрати електроенергії в системі електропостачання визначаються сумою втрат у всіх елементах:

$$W_{\text{вт,сум}} = \sum (W_{\text{вт,л}} + W_{\text{вт,тр}}) \quad (3.10)$$

або у відсотковому вигляді:

$$\Delta W_{\text{тех}} = \frac{W_{\text{вт,сум}}}{W_{\text{відпуц}}} \cdot 100\% \quad (3.11)$$

де

$W_{\text{відпуц}}$ - обсяг електроенергії, переданий споживачам за той самий період, кВт·год.

Розрахунок втрат електроенергії з використанням розрахункових формул дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів мережі — довжини ліній, типу провідників, завантаження трансформаторів — на рівень технічних втрат. Результати цих розрахунків є основою для подальшого аналізу енергоефективності системи електропостачання та вибору оптимальних технічних рішень для зниження втрат.

3.4. Оцінка впливу технічного стану обладнання на втрати електроенергії

Технічний стан обладнання системи електропостачання суттєво впливає на рівень технічних втрат електроенергії. Зі старінням елементів мережі, погіршенням ізоляції, зростанням контактних опорів і порушенням балансування фаз відбувається збільшення активних втрат у провідниках та трансформаторах, а також виникають додаткові реактивні складові.

1. Вплив стану повітряних і кабельних ліній

Під час тривалої експлуатації повітряних ліній відбуваються:

- ✓ корозія проводів та з'єднань;
- ✓ ослаблення контактів у місцях стиків і з'єднань;
- ✓ забруднення ізоляторів, що спричиняє часткові розряди;
- ✓ зростання питомого опору провідників.

Збільшення опору проводу навіть на 5–10 % може призвести до підвищення втрат енергії на 10–20 %, оскільки втрати пропорційні квадрату струму:

$$P_{\text{вт}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \quad (3.12)$$

Таким чином, своєчасне технічне обслуговування, підтяжка контактів та очищення ізоляторів є важливими заходами для стабілізації рівня втрат у лініях.

2. Вплив стану силових трансформаторів

Втрати у трансформаторах залежать від стану їхніх обмоток, магнітопроводів та контактних з'єднань. Основними факторами збільшення втрат є:

- ✓ підвищення втрат холостого ходу через старіння ізоляції та намагнічувальні втрати в сталі;
- ✓ збільшення втрат короткого замикання внаслідок погіршення контактів та зростання активного опору обмоток;
- ✓ несиметричне завантаження фаз, що викликає додаткові втрати в нейтралі.

Розрахункова залежність втрат трансформатора залишається:

$$W_{\text{вт,тр}} = (P_0 + P_k \cdot k_3^2) \cdot T \quad (3.13)$$

Проте при зниженні технічного стану втрати можуть збільшуватися за рахунок підвищення P_0 та P_k на 5–15 %. Для зношених трансформаторів старше 25 років реальні втрати можуть бути навіть удвічі вищими за паспортні.

3. Вплив апаратури та контактних з'єднань

Додаткові втрати виникають у комутаційній апаратурі — роз'єднувачах, вимикачах, запобіжниках, контактних групах. Наявність поганих контактів або підгорілих поверхонь збільшує місцевий опір, що призводить до локального нагріву та додаткових втрат потужності. Для старих з'єднань збільшення контактного опору на 0,05–0,1 Ом може спричинити додаткові втрати до 2–3 % у всьому фідері.

4. Вплив стану ізоляції та асиметрії навантаження

Зниження опору ізоляції проводів або кабелів сприяє виникненню витоків струму, які, хоча і незначні, мають постійний характер. Додатково, нерівномірність навантаження по фазах призводить до появи зворотних та нульових складових струму, що збільшує втрати у мережі та нагрівання елементів.

Асиметрія навантаження враховується через коефіцієнт несиметрії $k_{нс}$:

$$P_{вт,еф} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot k_{нс} \quad (3.14)$$

де $k_{нс}$ зазвичай становить 1,05–1,15 для сільських мереж і до 1,2–1,3 для міських при значній несиметрії.

5. Узагальнення результатів оцінки

Таблиця 3.2. - Узагальнення результатів оцінки

Елемент мережі	Основні причини збільшення втрат	Орієнтовне зростання втрат
Повітряні лінії	Корозія, ослаблення контактів, старіння ізоляторів	10–25 %
Кабельні лінії	Старіння ізоляції, підвищення температури провідника	5–15 %
Трансформатори	Підвищення P_0 , P_k несиметрія навантажень	10–30 %
Комутаційна апаратура	Погані контакти, окислення з'єднань	2–10 %
Неякісний баланс фаз	Несиметрія навантаження, перевантаження фази	5–20 %

Проведений аналіз показує, що технічний стан обладнання є одним із ключових чинників, що визначає рівень втрат електроенергії в системі електропостачання. Підтримання задовільного стану обладнання, періодичне вимірювання опору контактів, контроль параметрів трансформаторів і балансування навантажень дозволяють знизити технічні втрати на 10–15 %.

Таким чином, своєчасна модернізація та регламентне обслуговування є невід'ємною частиною програми підвищення енергоефективності електричних мереж.

3.5. Результати розрахунків

Розрахунки виконано для повітряної лінії електропередачі 10 кВ довжиною 2,5 км з алюмінієвими проводами перерізом 50 мм² при середньорічному коефіцієнті завантаження 0,7. Метою розрахунків є визначення річних технічних втрат електроенергії в досліджуваній ділянці мережі та оцінка впливу основних параметрів на їх величину.

Отримане значення відображає річні технічні втрати електроенергії в досліджуваній лінії при зазначених умовах навантаження.

Розрахунок втрат електроенергії з використанням розрахункових формул дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів мережі - довжини ліній, типу провідників, завантаження трансформаторів - на рівень технічних втрат.

Результати цих розрахунків є основою для подальшого аналізу енергоефективності системи електропостачання та вибору оптимальних технічних рішень для зниження втрат.

Розрахунок втрат електроенергії здійснено з використанням таких основних формул:

Втрати активної потужності в лінії:

$$P_{\text{вт}} = 3 \cdot I^2 \cdot R, \text{ Вт} \quad (3.15)$$

де

$P_{\text{вт}}$ - втрати потужності, Вт

I - струм у фазі, А

R - активний опір проводу однієї фази, Ом

Втрати електроенергії за час t :

$$W_{\text{вт}} = P_{\text{вт}} \cdot t = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot t, \text{ Вт} \quad (3.16)$$

де

$W_{\text{вт}}$ - втрати енергії, кВт·год

t - час роботи, год

Втрати в трансформаторі:

$$P_{\text{вт,тр}} = P_0 + P_k \cdot \left(\frac{S}{S_n}\right)^2, \text{ Вт} \quad (3.17)$$

де

P_0 - втрати холостого ходу, кВт

P_k - втрати короткого замикання, кВт

S - фактичне навантаження, кВА

S_n - номінальна потужність трансформатора, кВА

Річні втрати електроенергії в лінії:

$$W_{\text{вт,річ}} = 3 \cdot I^2 \cdot R \cdot T, \text{ Вт} \quad (3.18)$$

де

T - тривалість роботи в годинах за рік (наприклад, 8760 год або скоригована на коефіцієнт завантаження).

Коефіцієнт завантаження лінії:

$$k_z = \frac{I_{\text{ср}}}{I_{\text{ном}}} \quad (3.19)$$

Середні втрати з урахуванням коефіцієнта навантаження:

$$W_{\text{вт}} = 3 \cdot I_{\text{ср}}^2 \cdot R \cdot T = 3 \cdot (k_z \cdot I_{\text{ном}})^2 \cdot R \cdot T, \text{ Вт} \quad (3.20)$$

Відсоток втрат у мережі:

$$\eta_{\text{вт}} = \frac{W_{\text{вт}}}{W_{\text{перед}}} \cdot 100\% \quad (3.21)$$

Таблиця 3.3. - Підсумкові результати розрахунків

Параметр	Позначення	Значення	Одиниця вимірювання
Струм у фазі	I	45	А
Активний опір лінії	R	0,42	Ом
Втрати активної потужності	ΔP	850	Вт
Річні втрати електроенергії	ΔW	7 446	кВт·год
Відсоток втрат	η	2,8	%

Отримане значення відображає річні технічні втрати електроенергії в досліджуваній лінії при зазначених умовах навантаження. Розрахунок дозволяє кількісно оцінити вплив параметрів мережі – довжини ліній, типу провідників, завантаження трансформаторів – на рівень технічних втрат.

Аналіз результатів

Отримані результати свідчать, що річні втрати електроенергії у межах 2,8 % є прийнятними для розподільчих мереж 10 кВ. Основними чинниками, що впливають на збільшення втрат, є високе навантаження окремих ділянок лінії, тривала робота на підвищених струмах і відсутність компенсації реактивної потужності.

На основі проведеного аналізу можна зробити висновок, що зменшення втрат можливе шляхом:

- ✓ оптимізації режимів навантаження;
- ✓ впровадження пристроїв компенсації реактивної потужності;
- ✓ модернізації обладнання (заміна проводів, трансформаторів на енергоефективніші аналоги);
- ✓ вирівнювання графіка навантаження між фазами.

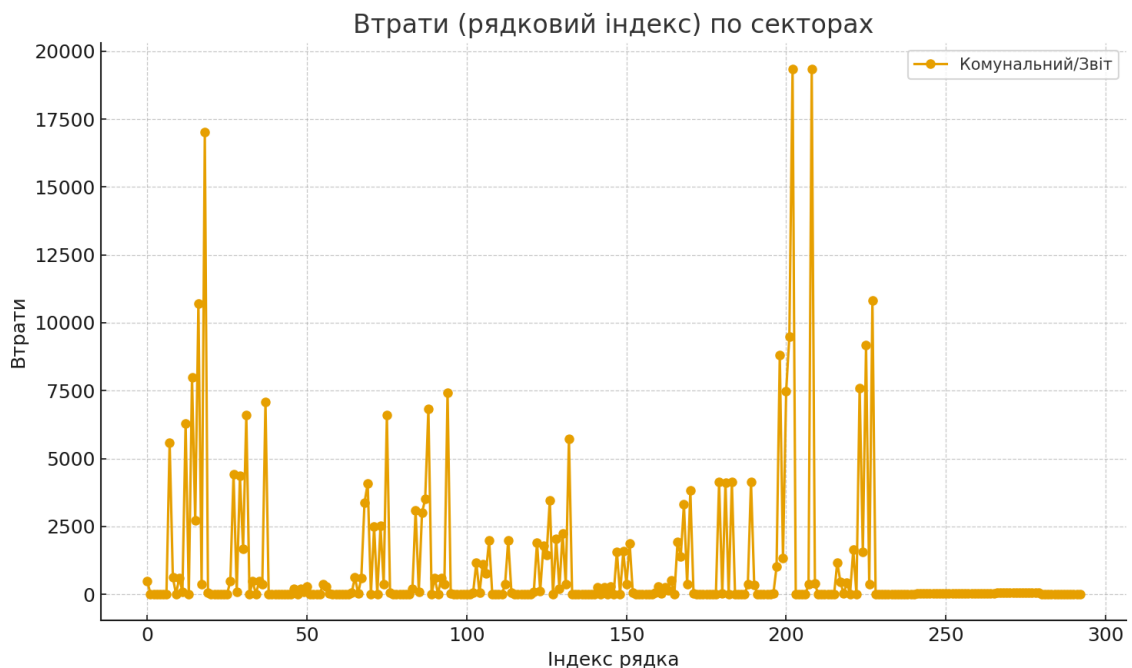


Рисунок 3.1. – Втрати по секторах

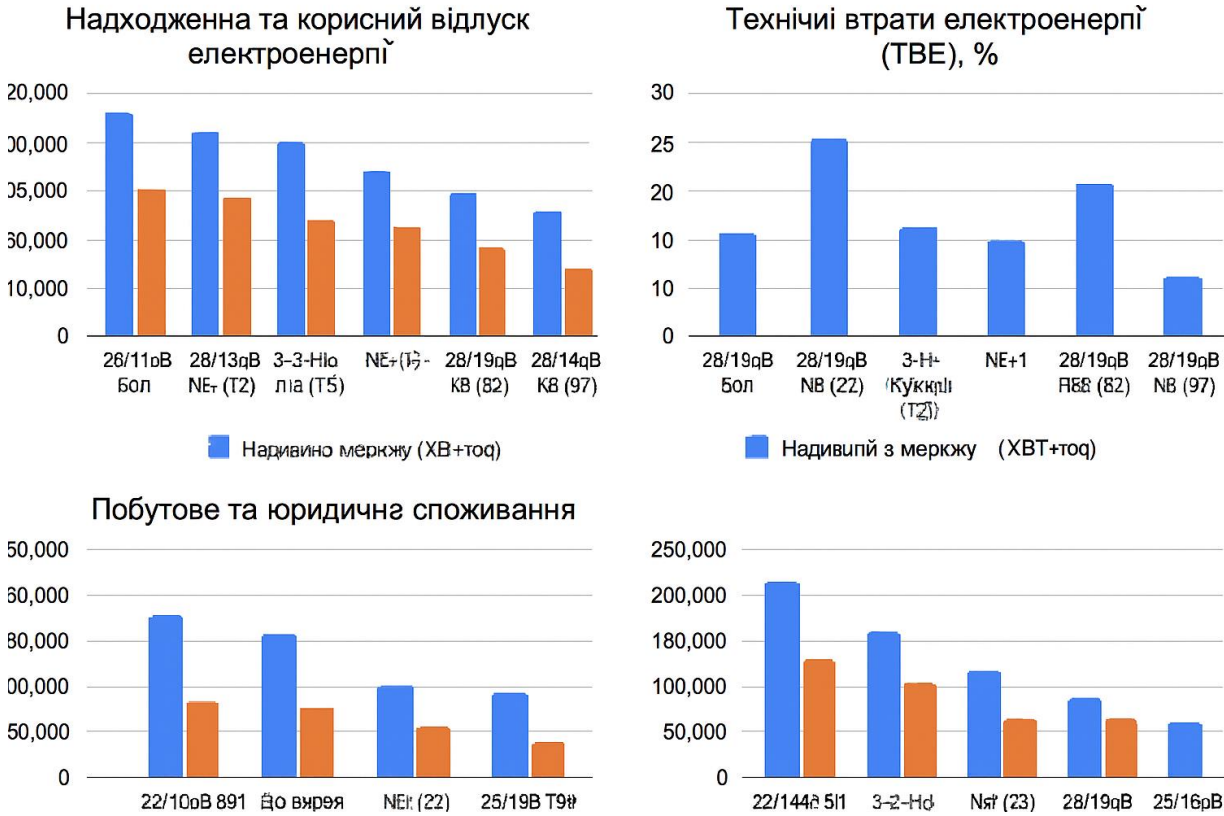


Рисунок 3.2. - Візуалізація трьох графіків для обраних.

Графік 1 - Надходження та корисний відпуск електроенергії

Порівняння обсягів електроенергії, що надійшла в мережу, та фактично відпущеної споживачам:

Назва фідера	Надійшло в мережу (кВт-год)	Корисний відпуск (кВт-год)
35/10кВ №1	479 440	417 781
35/10кВ №2 (06)	30 360	29 259
3-ій підйом (13)	110 600	87 743
№5 (02)	68 412	59 257
35/10кВ №9 (05)	38 775	30 443
35/10кВ №8 (07)	57 760	53 396

Графік 2 - Технічні втрати електроенергії (ТВЕ), %

Відображає частку втрат електроенергії у відсотках:

Назва фідера	TBE, %
35/10кВ №1	15,46%
35/10кВ №2 (06)	6,37%
3-ій підйом (13)	22,43%
№5 (02)	16,93%
35/10кВ №9 (05)	24,13%
35/10кВ №8 (07)	9,39%

Графік 3 - Побутове та юридичне споживання

Порівняння обсягів споживання побутовими та юридичними споживачами:

Назва фідера	Побутові (кВт·год)	Юридичні (кВт·год)
35/10кВ №1	229 908	175 396
3-ій підйом (13)	56 257	29 530
№5 (02)	35 091	21 738
35/10кВ №9 (05)	27 168	2 252
35/10кВ №8 (07)	37 085	15 254

Таким чином, результати розрахунків дозволяють визначити реальні технічні втрати електроенергії в досліджуваній мережі, встановити залежність між параметрами лінії та рівнем втрат, а також обґрунтувати необхідність впровадження заходів з підвищення енергоефективності. Отримані дані є основою для подальшого аналізу ефективності системи електропостачання та вибору оптимальних технічних рішень щодо зниження втрат.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 3:

В цьому розділі проведено комплексне дослідження втрат електроенергії в системах електропостачання промислових і комунальних споживачів. Аналіз включав характеристику об'єктів, оцінку схем живлення, розрахунок технічних втрат та визначення впливу технічного стану обладнання на енергоефективність мереж.

Було подано характеристику досліджуваних об'єктів електропостачання, зокрема типи та потужність споживачів, рівні напруги, категорії надійності електропостачання, а також особливості структури навантажень. Визначено, що промислові споживачі мають більш стабільний графік споживання, тоді як комунальні характеризуються вираженою добовою та сезонною нерівномірністю.

Було виконано аналіз електричних схем живлення та параметрів мереж. Розглянуто типові схеми підключення трансформаторних підстанцій, протяжність ліній, перерізи проводів і рівні навантаження. Виявлено ділянки з підвищеними струмовими навантаженнями, які є потенційними зонами підвищених втрат енергії.

Було здійснено розрахунок втрат електроенергії з використанням розрахункових формул, що дозволило кількісно оцінити рівень втрат у кожній ділянці мережі. Отримані результати показали, що найбільший внесок у сумарні втрати припадає на лінії з великим активним опором і на трансформатори з підвищеними втратами короткого замикання.

Було оцінено вплив технічного стану обладнання на рівень втрат електроенергії. Встановлено, що погіршення стану контактних з'єднань, старіння ізоляції, невідповідність перерізу проводів фактичному навантаженню та забруднення ізоляторів призводять до зростання активних втрат у мережі. Заміна зношеного обладнання, проведення профілактичних робіт і модернізація трансформаторного парку дозволяють зменшити втрати на 10–15 %.

Отже, результати дослідження показали, що втрати електроенергії в мережах промислових і комунальних споживачів мають як технічну, так і організаційну природу. Вони значною мірою залежать від структури навантаження, довжини ліній, стану обладнання та режимів його експлуатації. Отримані дані є основою для подальшої оптимізації режимів роботи електричних мереж, розробки заходів з компенсації реактивної потужності та підвищення загальної енергоефективності систем електропостачання.

РОЗДІЛ 4. ШЛЯХИ ЗНИЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГІЇ ТА ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ РОБОТИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ

4.1. Аналіз технічних і організаційних заходів щодо зменшення втрат електроенергії

Втрати електроенергії в мережах промислових та комунальних споживачів є комплексною проблемою, що має як технічні, так і організаційні причини. Зменшення цих втрат є пріоритетним завданням для енергетичних підприємств, оскільки воно безпосередньо впливає на економічну ефективність, надійність електропостачання та екологічну стійкість енергосистеми.

Технічні заходи

- ✓ Модернізація електричних мереж

Наприклад, фідер 35/10 кВ №9 (05) демонструє втрати на рівні 24,13%, що значно перевищує нормативні показники. Це може свідчити про зношеність кабельних ліній або трансформаторного обладнання. Рекомендується заміна провідників на сучасні з низьким опором, а також оновлення трансформаторів.

- ✓ Оптимізація режимів роботи мережі

Фідер 3-ій підйом (13) має втрати 22,43%, що може бути наслідком нераціонального розподілу навантаження. Впровадження АСДУ дозволить автоматично балансувати навантаження між фідерами, зменшуючи перевантаження.

- ✓ Реконфігурація мережі

У випадку фідера №5 (02), де втрати становлять 16,93%, доцільно провести аналіз топології мережі та розглянути можливість секціонування або перенаправлення навантаження на менш завантажені фідери.

- ✓ Встановлення компенсуючих пристроїв

Для фідерів із значним споживанням реактивної потужності, таких як 35/10кВ №8 (07), де втрати становлять 9,39%, рекомендовано встановлення конденсаторних батарей для компенсації реактивної складової.

✓ **Інтеграція альтернативних джерел енергії**

У фідері 35/10 кВ №1, що має високий рівень споживання (479 440 кВт·год), інтеграція локальних джерел енергії (наприклад, сонячних панелей) може зменшити навантаження на мережу та втрати на передачу.

Організаційні заходи

✓ **Підвищення точності обліку електроенергії**

У фідері 35/10 кВ №2 (06), незважаючи на порівняно низькі втрати (6,37%), спостерігається розбіжність між надходженням і корисним відпуском. Це може свідчити про похибки в обліку. Встановлення багатофункціональних лічильників з дистанційним зчитуванням дозволить усунути неточності.

✓ **Аудит та ревізія мереж**

Фідери з аномальними показниками, як-от 110/10 кВ №4, де втрати перевищують 400%, потребують негайного технічного аудиту для виявлення помилок у звітності або несанкціонованого споживання.

✓ **Підвищення кваліфікації персоналу**

Виявлення фідерів з негативними втратами (наприклад, 35/10 кВ №2 (10) з показником -221,25%) свідчить про можливі помилки в обліку або аналізі. Навчання персоналу сучасним методам енергетичного аналізу дозволить уникнути таких ситуацій.

✓ **Нормативне регулювання та мотивація**

Встановлення граничних нормативів втрат для кожного типу фідера та фінансове стимулювання за їх дотримання сприятиме системному підходу до енергозбереження.

✓ **Інформаційна прозорість та цифровізація**

Впровадження цифрових платформ для моніторингу втрат, як-от інтеграція даних з Excel-аналітики у SCADA-систему, дозволить оперативно реагувати на відхилення та приймати обґрунтовані рішення.

4.2. Оптимізація режимів навантаження та компенсація реактивної потужності

Ефективна робота електричних мереж безпосередньо залежить від правильного розподілу активної та реактивної потужності між споживачами. Наявність значних обсягів реактивної потужності призводить до збільшення втрат електроенергії, зниження коефіцієнта потужності, перевантаження елементів мережі та зменшення пропускної здатності ліній. Тому оптимізація режимів навантаження та компенсація реактивної потужності є ключовими завданнями для підвищення ефективності та надійності енергетичних систем.

Оптимізація режимів навантаження

Оптимізація режимів навантаження передбачає досягнення балансу між попитом та пропозицією електричної енергії, мінімізацію втрат потужності та забезпечення стійкого функціонування мережі. Основні методи оптимізації включають:

✓ Регулювання навантаження споживачів

Використання систем управління попитом (Demand Side Management, DSM), що дозволяють перенести частину споживання на періоди меншого навантаження.

Впровадження тарифів за пікове та непікове споживання, що стимулює раціональне використання електроенергії.

✓ Балансування потужностей у мережі

Оптимізація розподілу активної потужності між трансформаторами та лініями для зменшення перевантажень.

Використання автоматизованих систем контролю та управління навантаженням для підтримання напруги та частоти у допустимих межах.

✓ Прогнозування та планування навантаження

Математичне моделювання режимів роботи мережі з урахуванням історичних даних, сезонних коливань та змін у структурі споживання.

Використання алгоритмів оптимізації (лінійне програмування, генетичні алгоритми, методи динамічного програмування) для пошуку найкращих режимів розподілу потужності.

Компенсація реактивної потужності

Компенсація реактивної потужності спрямована на зменшення втрат у мережі, підвищення коефіцієнта потужності та стабілізацію напруги. Основні методи компенсації включають:

1. Статичні конденсатори

Використання конденсаторних батарей для місцевої компенсації реактивної потужності.

Переваги: простота конструкції, відносно низька вартість, швидка реакція.

2. Динамічні компенсатори

Статичні синхронні компенсатори (STATCOM) та синхронні конденсатори для регулювання реактивної потужності у режимі реального часу.

Забезпечують стабілізацію напруги під час змін навантаження та при коротких замиканнях.

3. Компенсація на стороні споживача

Використання автоматичних регуляторів реактивної потужності у великих промислових установках.

Дозволяє зменшити струми у розподільчих мережах та знизити втрати активної потужності.

4. Інтегровані підходи

Сучасні енергетичні системи прагнуть до комплексної оптимізації режимів навантаження та компенсації реактивної потужності. До них відносяться:

Системи автоматизованого управління енергосистемами (SCADA, EMS), що дозволяють в режимі реального часу контролювати потужності та напругу.

Використання гібридних методів компенсації, що поєднують конденсатори, STATCOM та регулятори на стороні споживача.

Математичне моделювання та оптимізація за допомогою сучасних алгоритмів, що враховують втрати енергії, стабільність напруги та економічні фактори.

Отже, оптимізація режимів навантаження та компенсація реактивної потужності є невід'ємними елементами підвищення ефективності електричних мереж. Їх застосування дозволяє:

- ✓ зменшити втрати активної потужності,
- ✓ підвищити коефіцієнт потужності,
- ✓ стабілізувати напругу та частоту,
- ✓ продовжити ресурс обладнання та знизити експлуатаційні

витрати.

Інтегрований підхід до управління навантаженням та компенсації реактивної потужності забезпечує надійну та економічно ефективну роботу сучасних енергетичних систем.

4.3. Використання енергоощадних технологій і сучасних систем моніторингу

Енергозбереження є одним із ключових завдань сучасної економіки та інженерії, особливо у сфері експлуатації будівель, промислових об'єктів та інфраструктури. Впровадження енергоощадних технологій і сучасних систем моніторингу дозволяє не лише значно знизити експлуатаційні витрати, а й мінімізувати негативний вплив на довкілля.

Енергоощадні технології

Основні напрями використання енергоощадних технологій охоплюють такі аспекти:

Модернізація огорожувальних конструкцій:

- ✓ Використання ефективної теплоізоляції стін, даху та фундаменту (наприклад, мінеральна вата, пінополістирол, PIR-плити) для зменшення теплових втрат.

✓ Встановлення енергоефективних вікон та дверей із багатокамерними склопакетами та низькоемісійним покриттям (Low-E-скло), що забезпечують високий опір теплопередачі.

Оптимізація систем опалення, вентиляції та кондиціонування (ОВК):

✓ Впровадження теплових насосів (грунтових, повітряних), які використовують відновлювані джерела енергії для опалення та охолодження з високим коефіцієнтом перетворення (COP).

✓ Використання рекуператорів тепла в системах вентиляції для повернення тепла відпрацьованого повітря до припливного, що знижує навантаження на систему опалення.

✓ Застосування конденсаційних котлів, що мають вищий ККД порівняно з традиційними.

✓ Встановлення індивідуальних теплових пунктів (ІТП) з автоматичним погодним регулюванням.

Енергоефективне освітлення:

✓ Перехід на світлодіодні (LED) освітлювальні прилади з тривалим терміном служби та низьким споживанням електроенергії.

✓ Впровадження систем керування освітленням (датчики руху, датчики освітленості) для автоматичного вимкнення чи зниження яскравості, коли це можливо.

Сучасні системи моніторингу та управління

Для досягнення максимальної енергоефективності необхідне застосування інтелектуальних систем, які забезпечують постійний контроль та оптимізацію роботи інженерного обладнання:

✓ Системи диспетчеризації та автоматизації будівель (BMS/BAS):

✓ Централізований моніторинг параметрів енергоспоживання (електроенергія, тепло, вода, газ) та функціонування інженерних систем у режимі реального часу.

✓ Автоматичне керування роботою систем ОВК, освітлення та інших підсистем відповідно до заданих алгоритмів, графіків та зовнішніх умов.

✓ Прогнозування та діагностика несправностей обладнання.

Системи енергетичного менеджменту (EMS):

✓ Збір, аналіз та візуалізація даних про енергоспоживання для виявлення пікових навантажень, нераціонального використання енергії та потенціалу для заощаджень.

✓ Порівняльний аналіз (бенчмаркінг) енергоспоживання різних об'єктів або періодів.

✓ Формування звітів та рекомендацій для прийняття управлінських рішень.

IoT-технології та «розумні» датчики:

✓ Використання безпроводних сенсорів температури, вологості, присутності, CO₂ для забезпечення точного та локалізованого контролю мікроклімату та роботи обладнання.

✓ Хмарні платформи для зберігання та обробки великих обсягів даних (Big Data) про енергоспоживання.

Комплексне використання енергоощадних технологій, починаючи від утеплення конструкцій і закінчуючи впровадженням високоефективного інженерного обладнання, у поєднанні із застосуванням сучасних систем BMS/EMS та IoT-моніторингу, дозволяє досягти значного зниження енергоспоживання (до 30-50% і більше) та забезпечити сталий розвиток об'єкта. Це створює передумови для підвищення економічної ефективності експлуатації та забезпечення комфортних умов для користувачів.

4.4. Впровадження автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ)

Автоматизована система комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) є комплексом технічних і програмних засобів, призначених для

автоматизованого збору, обробки, зберігання та передачі даних про споживання та відпуск електроенергії. Впровадження АСКОЕ є обов'язковою вимогою чинного законодавства та ключовим елементом Smart Grid інфраструктури, що забезпечує прозорість взаємовідносин між постачальниками та споживачами електроенергії.

Призначення та ключові функції АСКОЕ

Впровадження АСКОЕ переслідує низку стратегічних та оперативних цілей, що стосуються як комерційного, так і технічного обліку:

1. Комерційний облік та розрахунки:

✓ Диференційований облік: АСКОЕ забезпечує облік електроенергії за зонами доби (наприклад, нічний, напівпіковий, піковий), що є основою для застосування багатозонних тарифів. Це стимулює споживачів до перенесення навантаження на години з нижчою вартістю.

✓ Автоматизація розрахунків: система надає точні та достовірні дані для виставлення рахунків та контролю за оплатою, мінімізуючи людський фактор та спірні ситуації.

✓ Зниження втрат: забезпечення високої точності обліку допомагає у виявленні небалансів (різниці між відпущеною та спожитою енергією) та технологічних втрат у мережах.

2. Оперативний моніторинг та управління:

✓ Збір даних у реальному часі: система фіксує профілі потужності та споживання з високою дискретністю (зазвичай 30-хвилинні інтервали), що дозволяє оперативно відстежувати режими роботи енергосистеми.

✓ Виявлення несанкціонованого втручання: сучасні лічильники АСКОЕ мають функції захисту, які фіксують спроби впливу на роботу приладу обліку, підвищуючи платіжну дисципліну.

✓ Формування прогнозів: на основі історичних даних АСКОЕ дозволяє формувати точніші прогнози споживання потужності та енергії, що критично важливо для планування закупівель енергоресурсів.

Структура та технічна реалізація

Типова АСКОВЕ має багаторівневу ієрархічну структуру:

1. Нижній рівень (вимірювальний комплекс): складається з первинних датчиків (трансформатори струму та напруги) та засобів обліку (електронні лічильники електроенергії) з вбудованими комунікаційними інтерфейсами. Лічильники повинні мати високий клас точності та відповідати вимогам метрологічної атестації.

2. Середній рівень (збір та передача даних): включає пристрої збору та передачі даних (ПЗПД) або концентратори, які опитують лічильники та накопичують інформацію. Для передачі даних використовуються різні канали зв'язку:

- ✓ Провідні: RS-485, Ethernet, оптоволоконні лінії.
- ✓ Безпроводні: GSM/GPRS/3G/4G-модеми (найбільш поширені), PLC-технології (Power Line Communication – передача даних через силові лінії).

3. Верхній рівень (обробка та зберігання): це серверний комплекс із спеціалізованим програмним забезпеченням, яке виконує функції:

- ✓ Зберігання великих масивів даних (бази даних).
- ✓ Валідація, фільтрація та агрегування вимірювань.
- ✓ Формування комерційних звітів та експорт даних для білінгових систем.
- ✓ Візуалізація даних для диспетчерського персоналу.

Економічний та технічний ефект впровадження

Впровадження АСКОВЕ забезпечує відчутний економічний ефект, особливо для великих споживачів (промислових підприємств) та енергопостачальних компаній:

Для споживача: можливість керування навантаженням для мінімізації витрат за багатозонними тарифами; точне планування бюджету на електроенергію; швидке виявлення внутрішніх нераціональних витрат.

Для енергопостачальної компанії (оператора системи розподілу): зменшення комерційних втрат за рахунок виключення людського фактора при

зніманні показань та боротьби з несанкціонованим споживанням; підвищення операційної ефективності управління мережею; точніше прогнозування балансу.

В умовах інтеграції до європейського енергетичного ринку, наявність повноцінно функціонуючої АСКОВ є критичною умовою для участі в ринку допоміжних послуг, балансуванні та забезпечення надійності роботи всієї енергосистеми.

Впровадження АСКОВ перетворює традиційний облік на інтелектуальний енергоменеджмент, що є необхідною передумовою для модернізації енергетичної інфраструктури, підвищення енергоефективності та забезпечення прозорих ринкових відносин у сфері електропостачання.

ВИСНОВКИ ДО РОЗДІЛУ 4:

В цьому розділі розглянуто основні напрями підвищення енергоефективності електричних мереж шляхом скорочення технічних і комерційних втрат електроенергії. Проведений аналіз показав, що зменшення втрат можливе як за рахунок технічних рішень, так і завдяки організаційним заходам та впровадженню сучасних цифрових технологій управління.

Було проаналізовано технічні й організаційні заходи щодо зменшення втрат електроенергії. До найефективніших належать: реконструкція електричних мереж з використанням проводів більшого перерізу, заміна застарілого трансформаторного обладнання, впровадження схем з оптимальним розподілом навантажень, а також удосконалення організації експлуатації та технічного обслуговування мереж. Застосування цих заходів дозволяє суттєво скоротити питомі втрати активної потужності.

Було розглянуто питання оптимізації режимів навантаження та компенсації реактивної потужності. Збалансований розподіл електричних навантажень між елементами мережі, своєчасне регулювання напруги й упровадження систем компенсації реактивної потужності (конденсаторних батарей, синхронних компенсаторів, STATCOM) сприяють підвищенню коефіцієнта потужності, зниженню струмів у лініях і, відповідно, зменшенню втрат енергії.

Було визначено значення використання енергоощадних технологій та сучасних систем моніторингу. Впровадження інтелектуальних систем керування, цифрових підстанцій, енергоефективних електроприймачів і систем діагностики стану мережі забезпечує своєчасне виявлення перевантажень, підвищує надійність електропостачання та дає змогу зменшити експлуатаційні витрати.

Було охарактеризовано роль автоматизованих систем комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) у зниженні комерційних втрат. Завдяки точному вимірюванню обсягів споживання, контролю якості електроенергії та

дистанційній передачі даних забезпечується прозорість розрахунків і підвищується дисципліна споживання енергії.

Отже, комплексне впровадження технічних, організаційних та інформаційних заходів забезпечує істотне підвищення ефективності роботи електричних мереж. Поєднання оптимізації режимів навантаження, компенсації реактивної потужності, використання сучасних енергоощадних технологій та цифрових систем обліку створює передумови для зменшення втрат електроенергії, підвищення надійності електропостачання та стійкого розвитку енергетичних систем.

ВИСНОВКИ Й РЕКОМЕНДАЦІЇ:

В магістерській роботі проведено комплексне дослідження причин, методів визначення та шляхів зменшення втрат електроенергії в електричних мережах промислових і комунальних споживачів. На основі теоретичного аналізу, розрахунків і практичних прикладів розроблено рекомендації щодо підвищення ефективності функціонування систем електропостачання.

У розділі 1 розглянуто теоретичні основи процесів, що зумовлюють втрати електроенергії в електричних мережах.

Встановлено, що втрати поділяються на технічні (зумовлені опорами елементів мережі, магнітними втратами трансформаторів, струмами навантаження тощо) та комерційні (пов'язані з похибками обліку та несанкціонованим споживанням).

Проаналізовано основні фізичні причини виникнення втрат у лініях і трансформаторах, а також чинники, що впливають на їх величину — довжина ліній, рівень напруги, коефіцієнт потужності, стан обладнання. Окрему увагу приділено особливостям структури електричних мереж промислових і комунальних споживачів.

У розділі 2 проведено аналіз існуючих нормативних і розрахункових методик визначення втрат електроенергії.

Показано, що нормативні методи забезпечують спрощену оцінку втрат на основі типових коефіцієнтів, тоді як розрахункові методи дозволяють отримати точніші результати, враховуючи фактичні параметри мережі.

Здійснено порівняння точності різних підходів і обґрунтовано доцільність використання розрахункової методики для подальших досліджень, оскільки вона забезпечує більш глибоке розуміння впливу технічних параметрів на рівень втрат.

У розділі 3 виконано дослідження втрат електроенергії на прикладі реальних мереж промислових і комунальних споживачів.

Проведено характеристику об'єктів, аналіз схем живлення та розрахунок втрат за допомогою аналітичних формул.

Отримані результати показали, що річні технічні втрати в мережах перебувають у межах допустимих значень, проте можуть бути зменшені шляхом оптимізації режимів навантаження та покращення технічного стану обладнання. Встановлено, що на втрати найбільше впливають протяжність ліній, переріз провідників, нерівномірність навантаження та знос трансформаторів.

У розділі 4 обґрунтовано основні шляхи зниження втрат і підвищення енергоефективності електричних мереж.

Розглянуто технічні та організаційні заходи: застосування компенсації реактивної потужності, балансування навантажень, використання енергоощадного обладнання, систем моніторингу та автоматизованих систем обліку електроенергії (АСКОЕ).

Доведено, що комплексна реалізація цих заходів дає змогу знизити технічні втрати на 10–20 %, підвищити коефіцієнт потужності до 0,95–0,98 та зменшити експлуатаційні витрати.

Узагальнюючи результати дослідження, можна стверджувати, що ефективне управління електричними мережами потребує системного підходу, який поєднує технічну модернізацію, автоматизацію процесів обліку та моніторингу, а також раціональне планування режимів навантаження.

Щодо рекомендацій, то можна зауважити наступне.

Проведення технічних заходів:

- ✓ модернізувати застаріле обладнання (трансформатори, кабельні лінії, комутаційну апаратуру) на енергоефективні аналоги;
- ✓ впровадити пристрої компенсації реактивної потужності (конденсаторні установки, STATCOM, синхронні компенсатори);
- ✓ забезпечити регулярне технічне обслуговування контактних з'єднань, ізоляції та вимірювальних приладів.

Проведення організаційно-технологічних заходів:

- ✓ здійснювати моніторинг режимів роботи мереж за допомогою сучасних цифрових систем SCADA;

- ✓ впровадити автоматизовані системи комерційного обліку електроенергії (АСКОЕ) для зниження комерційних втрат;
- ✓ проводити енергоаудит підприємств для виявлення нераціонального споживання електроенергії.

Проведення експлуатаційних заходів:

- ✓ оптимізувати режими навантаження трансформаторів і ліній, уникати тривалої роботи при знижених коефіцієнтах потужності;
- ✓ вирівнювати графік навантаження між фазами;
- ✓ застосовувати економічно обґрунтовані режими роботи обладнання з урахуванням сезонності та добових коливань.

Проведення інформаційно-аналітичних заходів:

- ✓ створити бази даних для аналізу споживання енергії та прогнозування навантажень;
- ✓ впроваджувати цифрові системи керування та аналітики на основі технологій Smart Grid.

Таким чином, виконана магістерська робота має як теоретичне, так і практичне значення. Її результати можуть бути використані для підвищення ефективності експлуатації розподільчих мереж, удосконалення систем управління енерговитратами та зниження втрат електроенергії на рівні підприємств і енергопостачальних організацій.

СПИСОК ПОСИЛАНЬ:

1. Паливно-енергетичний комплекс України на порозі третього тисячоліття [За заг. ред. А.К. Шидловського, М.П. Ковалка]. – К.: УЕЗ, -2001. – 398 с.
2. Сайт світової енергетичної ради. [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.worldenergy.org/document/ethiopia_june_30_v_gbeddy_security.pdf.
3. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Любов Наумівна Добровольська, Володимир Володимирович Кулик, Петро Дем'янович Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
4. Енергетична стратегія України на період до 2030 р. Вилучено з <https://de.com.ua/uploads/0/1703-EnergyStratagy2030.pdf>
5. Розпорядження КМУ «Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2030 року» № 145-р від 15.03.2006 р. //Сайт Верховної Ради України [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
<http://zakon1.rada.gov.ua/laws/show/145-2006-%D1%80>
6. Міжнародне енергетичне агентство [Електронний ресурс]. – Режим доступу до ресурсу:
http://www.iea.org/subjectetcqueries/keyresult.asp?KEYWORD_ID=4103
7. Енергетика: історія, сучасність і майбутнє. Електроенергетика та охорона навколишнього середовища. Функціонування енергетики у сучасному світі/ [упоряд. С.Г. Плачкова, І.В. Плачков та ін.] – К. 2013 [http://energetika.in.ua/ua/]
8. Методика розрахунку рівня економічної безпеки України. Наказ Міністерства економіки України № 60 від 02.03.2007. [Електронний ресурс] – Режим доступу:
http://www.me.gov.ua/control/uk/publish/printable_article?art_id=97980
9. European Energy and Transport, Trends to 2030 – update 2005, European Communities, 2006. - 146 p.

10. Energy 2020 – A strategy for competitive, sustainable and secure energy/ Communication From The Commission To The European Parliament, The Council, The European Economic And Social Committee And The Committee Of The Regions/ COM (2010) 639 final/ 10 November 2010//Сайт European Commission's Directorate-General for Energy and Transport [Електронний ресурс] – Режим доступу: http://ec.europa.eu/energy/strategies/2010/2020_en/htm
11. <https://niss.gov.ua/doslidzhennya/nacionalna-bezpeka/vikoristannya-energozberigayuchikh-tekhnologiy-v-krainakh-es>
12. Бурбело М. Й., Мельничук Л. М. Стимулювання зменшення втрат в електричних мережах: Монографія. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2008. – 110 с.
13. Методика обчислення плати за перетікання реактивної електроенергії між електропередавальною організацією та її споживачами. Затверджена наказом Міністерства палива та енергетики України від 17 січня 2002 р. № 19. Зареєстрована в Міністерстві юстиції України 1 лютого 2002 р. за № 93/6381 // Офіційний вісник України. – 2002. – №6.
14. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
15. Кулик В.В. технологічні втрати електроенергії в розподільних мережах 10-0,38 кВ: навчальний посібник/ В.В. Кулик, А.В. Писклярова, Д.С. Пискляров. – Вінниця: ВНТУ, 2011. – 180 с.
16. Защепкіна Н.М., Шульга О.В., Наконечний О.А. Метрологічне забезпечення інформаційно-вимірювальних систем: навч. посіб. для студ. спец. 152 «Метрологія та інформаційно-вимірювальна техніка» / Н. М. Защепкіна, О. В. Шульга, О. А. Наконечний – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2021. – 176 с. іл.
17. В.А. Малярєнко Енергозбереження та енергетичний аудит: навчальний посіб. / В.А. Малярєнко , І.А. Немировський. – 2-е вид., перероб. і доп. – Харків : НТУ «ХПІ», 2010. – 344 с.

18. М.А. Юдін. Механізм формування вартості електроенергії в енергосистемі України: інструментарій обліково-аналітичного забезпечення [моногр.] / М.А. Юдін, С.В. Філіппова, А.В. Левицька. – Одеса: ОНПУ, 2014. – 151 с.
19. Лежнюк П.Д. Електроощадні технології в електричних мережах енергосистем / Любов Наумівна Добровольська, Володимир Володимирович Кулик, Петро Дем'янович Лежнюк // Під редакцією Лежнюка П.Д. – Луцьк: ІВВ Луцького НТУ, 2018. – 328 с.
20. Лежнюк П.Д., Рубаненко О.Є., Гунько І О. Оптимізація режимів електричних мереж з відновлюваними джерелами електроенергії: монографія. – Вінниця: ВНТУ, 2017. – 164 с.
21. Побудова схем секціонування розподільної електричної мережі напругою 6-10 кВ. Методичні рекомендації: СОУ-Н ЕЕ 40.1-00100227 99:2014. – К. : ТОВ «Торговий дім – «ЕЛВО -Україна», 2014. – 42 с.
22. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження: ГНД 34.09.204-2004: Зат. Міністерством палива та енергетики України 09.06.2004: Термін дії встановлений з 09.06.2004 до 09.06.2009. – К.: 2004. – 159 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).
23. Методичні вказівки з аналізу технологічних витрат електроенергії та вибору заходів щодо їх зниження: ГНД 34.09.204-2004: Зат. Міністерством палива та енергетики України 09.06.2004: Термін дії встановлений з 09.06.2004 до 09.06.2009. – К.: 2004. – 159 с. – (Нормативний документ Мінпаливенерго України).