

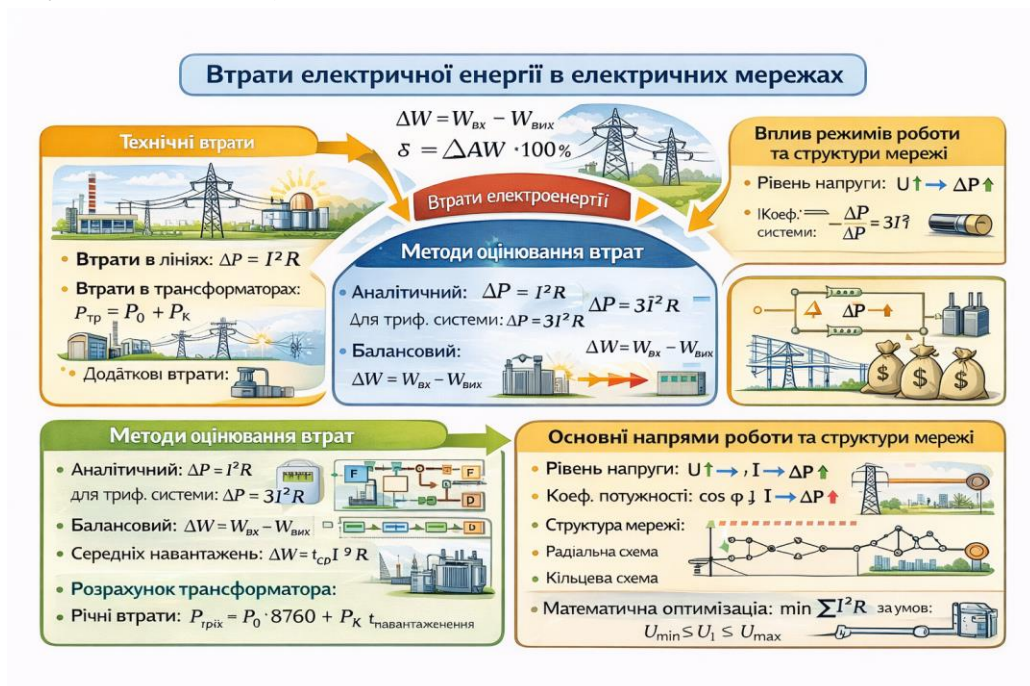
Тема 5. Втрати електричної енергії в електричних мережах

Мета – сформуванати у здобувачів системне розуміння природи втрат електричної енергії, навчити виконувати їх розрахунок у лініях і трансформаторах, аналізувати вплив режимів роботи та структури мережі на величину втрат і визначати технічно та економічно обґрунтовані напрями їх зменшення.

Втрати електричної енергії є важливою техніко-економічною характеристикою електричних мереж. Вони виникають внаслідок протікання струму через активні опори, магнітні процеси в трансформаторах, коронні розряди та додаткові електромагнітні явища. Втрати енергії в електричних мережах можна визначити як добуток втрат активної потужності на час, протягом якого електрична система працювала з відповідним навантаженням. Оскільки навантаження електричної системи постійно змінюється, то для визначення втрат енергії протягом певного періоду слід розрахувати інтеграл вигляду:

$$\Delta A = \int_0^T \Delta P(t) dt,$$

де $\Delta P(t)$ – функція зміни втрат активної потужності протягом часу; T – термін періоду, протягом якого визначають втрати енергії (для визначення втрат енергії протягом року $T = 8760$ год).



Втрати електричної енергії — це різниця між кількістю електроенергії, що надійшла в мережу, і кількістю, відпущеною споживачам.

$$\Delta W = W_{\text{вх}} - W_{\text{вих}}$$

Відносні втрати:

$$\delta = \Delta W / W_{\text{вх}} \cdot 100\%$$

Втрати є об'єктивно неминучими, однак їх рівень повинен відповідати нормативним значенням.

Втрати в лініях електропередачі

Основна формула:

$$\Delta P = I^2 R$$

де

$$R = \rho l / S$$

Втрати енергії за час T:

$$\Delta W = \int_0^T I^2 R$$

Особливість: втрати пропорційні квадрату струму.

Втрати в трансформаторах

Складаються з:

- втрат холостого ходу P_0 (магнітні втрати);
- втрат короткого замикання P_k (мідні втрати).

Загальні втрати:

$$\Delta P_{\text{тр}} = P_0 + P_k$$

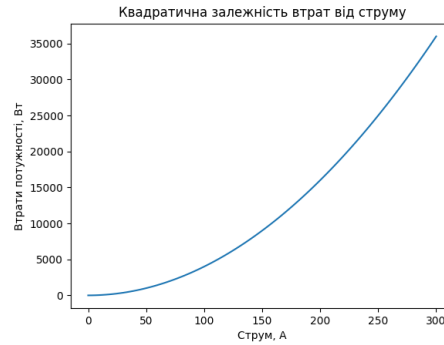
ККД трансформатора:

$$\eta = P_2 / P_1$$

Додаткові технічні втрати

- втрати на корону (високовольтні мережі);
- діелектричні втрати;
- втрати в реакторах та компенсуючих пристроях.

Технічні втрати включають: втрати в лініях, трансформаторах, реакторах. Нетехнічні втрати пов'язані з похибками обліку та несанкціонованим споживанням.



Нетехнічні втрати

Не пов'язані з фізичними процесами.

До них належать:

- похибки вимірювальних приладів;
- втрати обліку;
- несанкціоноване споживання;
- помилки розрахунків.

Нетехнічні втрати можуть складати значну частку в розподільчих мережах.

Методи оцінювання втрат

1) Аналітичний (розрахунковий) метод

Застосовується, коли відомі параметри елементів мережі (R , X), напруга, струм або потужність навантаження.

Для однієї фази:

$$\Delta P_{\varphi} = I^2 R_{\Sigma}$$

Для трифазної лінії:

$$\Delta P_{\text{л}} = 3I^2 R_{\Sigma}$$

Якщо відома активна потужність навантаження:

$$I = \frac{P}{\sqrt{3}U \cos \varphi}$$

2) Метод середніх (еквівалентних) навантажень

Використовується, коли є **графік навантаження** або відомі **середні значення** за період.

Оскільки втрати залежать від I^2 , правильніше працювати з **середньоквадратичним струмом**:

$$I_{eq} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I^2(t) dt}$$

Тоді

$$\Delta W_{\pi} = 3R_{\Sigma} I_{eq}^2 \cdot T$$

На практиці часто застосовують **коефіцієнт форми графіка** (співвідношення I_{eq} та $I_{сеп}$):

$$k_f = \frac{I_{eq}}{I_{сеп}} \Rightarrow I_{eq} = k_f I_{сеп}$$

$$\Delta W_{\pi} = 3R_{\Sigma} (k_f I_{сеп})^2 \cdot T$$

3) Метод за графіком навантаження (інтегральний)

Найточніший, якщо є **почасові/похвилинні дані**.

Алгоритм:

1. Беремо дискретні значення струму I_i за інтервал Δt .
2. Рахуємо втрати потужності:

$$\Delta P_i = 3I_i^2 R_{\Sigma}$$

3. Рахуємо втрати енергії:

$$\Delta W = \sum_{i=1}^n \Delta P_i \Delta t$$

4) Балансовий метод (комерційний/енергетичний)

Застосовується для оцінки **сумарних втрат у мережі або ділянці** за показами лічильників.

5) Оцінювання втрат у трансформаторах (окремо, детально)

Втрати трансформатора складаються з:

5.1. Втрати холостого ходу (практично сталі)

$$P_0 \approx \text{const}$$

Енергія втрат за період:

$$W_0 = P_0 \cdot T$$

5.2. Мідні втрати (залежать від навантаження)

Якщо відома величина втрат КЗ при номінальному струмі

5.3. Загальні втрати трансформатора

$$\Delta W_{\text{tr}} = W_0 + W_k$$

Висновок: трансформатор занижено завантажений $\rightarrow$ домінують P_0 .

Перевантажений $\rightarrow$ різко ростуть мідні втрати $\sim I^2$.

Порівняння методів (коротко)

- **Аналітичний** — точний, коли відомі параметри та режим.
- **Середніх навантажень** — швидкий для планування.
- **Інтегральний за графіком** — найточніший при виміряних даних.
- **Балансовий** — для фактичних втрат і виявлення нетехнічних.
- **Трансформаторний** — завжди окремо: $P_0 + P_k$.

Тема 5. Енергоефективність та надійність електричних систем

Мета – сформувати у здобувачів системне розуміння показників енергоефективності та надійності електричних мереж, навчити аналізувати вплив схемних і режимних рішень на безперервність електропостачання, а також визначати технічні та організаційні заходи з підвищення ефективності та експлуатаційної стійкості енергосистем.

Енергоефективність електричної мережі характеризує здатність забезпечувати передачу та розподіл електроенергії з мінімальними втратами при дотриманні нормативної якості напруги.

Показники енергоефективності електричних мереж

1.1 Коефіцієнт корисної дії мережі

$$\eta = P_{\text{вих}} / P_{\text{вх}}$$

або для енергії:

$$\eta = W_{\text{вих}} / W_{\text{вх}}$$

Чим ближче значення до 1, тим вища енергоефективність.

1.2 Рівень втрат електроенергії

$$\delta = \Delta W / W_{\text{вх}} \cdot 100\%$$

Нормативні значення залежать від класу напруги:

- магістральні мережі — 2–4 %;
- розподільчі мережі — 6–12 %.

1.3 Коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi = P / S$$

Зменшення $\cos \varphi$ призводить до:

$$I \uparrow \Rightarrow \Delta P \uparrow$$

1.4 Показники використання потужності

Середня потужність:

$$P_{\text{сер}} = W / T_P$$

Коефіцієнт використання:

$$k_{\text{вик}} = P_{\text{сер}} / P_{\text{мах}}$$

Нерівномірність навантаження знижує енергоефективність.

Надійність електропостачання — це здатність електричної системи забезпечувати безперервне та якісне електропостачання споживачів протягом заданого часу.

2.1 Основні властивості надійності

- безвідмовність;
- довговічність;
- ремонтпридатність;
- збережуваність.

2.2 Ймовірнісні показники

Інтенсивність відмов:

$$\lambda = n/T$$

Ймовірність безвідмовної роботи:

$$P(t) = e^{-\lambda t}$$

Середній час напрацювання до відмови:

$$T_{cp} = 1/\lambda$$

2.3 Показники для електричних мереж

- **SAIDI** — середня тривалість перерв (год/рік)
- **SAIFI** — середня частота відключень
- **ENS** — недовідпущена електроенергія

Методи підвищення енергоефективності

Технічні заходи

- підвищення класу напруги;
- оптимізація перерізів проводів;
- компенсація реактивної потужності;
- використання енергоефективних трансформаторів;
- автоматичне регулювання напруги.

Організаційні заходи

- цифровий моніторинг;
- впровадження Smart Metering;
- оптимізація графіків навантаження;
- модернізація застарілого обладнання.

Тема 7. Методи аналізу та моделювання електричних систем

Мета – сформулювати у здобувачів системне уявлення про математичні моделі електричних мереж, методи розрахунку режимів і потоків потужності, а також навчити інтерпретувати результати комп'ютерного моделювання для прийняття інженерних рішень.

1. Основні підходи до математичного моделювання

Електричні мережі описуються системами нелінійних рівнянь, що базуються на законах Кірхгофа. Комплексний опір елементів: $Z = R + jX$. Модель мережі формується у вигляді вузлів та гілок.

Матриця вузлових провідностей: $I = Y \cdot U$

Перехід до відносних одиниць: $Z_{pu} = Z / Z_{base}$

$Z_{base} = U_{base}^2 / S_{base}$

2. Методи розрахунку режимів

Метод вузлових напруг, метод контурних струмів, Ньютона–Рафсона, Гауса–Зейделя.

Баланс потужності: $\Sigma P_{ген} = \Sigma P_{сп} + \Sigma P_{втр}$

$\Sigma Q_{ген} = \Sigma Q_{сп} + \Sigma Q_{втр}$

3. Розрахунок потоків потужності (Load Flow)

Метою є визначення напруг у вузлах, потоків потужності та втрат у гілках мережі. Основні змінні: U , θ , P , Q .

4. Моделювання коротких замикань

Струм короткого замикання: $I_{кз} = U / Z_{екв}$

Метод симетричних складових: I_1 , I_2 , I_0

5. Алгоритм Load Flow (структурна схема)

6. Використання програмних засобів

Сучасні програмні комплекси: DIgSILENT PowerFactory, ETAP, PSS/E, MATLAB/Simulink, OpenDSS. Вони дозволяють виконувати Load Flow, аналіз КЗ, оцінку стійкості та оптимізацію мереж.

7. Інтерпретація результатів

Після розрахунку аналізують перевантаження гілок, відхилення напруги, втрати потужності та запас стійкості системи. При перевищенні допустимих значень необхідне коригування режимів або реконструкція мережі.

Тема 8. Сучасні тенденції розвитку електричних систем

Сучасні електричні системи розвиваються у напрямку декарбонізації, децентралізації та цифровізації, переходячи від централізованих мереж до розумних мереж (Smart Grid). Основні тренди включають масштабне впровадження відновлюваних джерел енергії (ВДЕ), використання систем накопичення енергії, інтеграцію штучного інтелекту для керування попитом та електрифікацію транспорту.

Ключові тенденції розвитку:

- **Децентралізація та ВДЕ:** Сонце та вітер стають найдешевшими джерелами, що стимулює розвиток малих електростанцій, біомаси та активне використання дахових сонячних панелей.
- **Smart Grid та діджиталізація:** Впровадження інтелектуальних систем обліку, AI-керування енергоспоживанням та IoT у розетках, що дозволяє оптимізувати навантаження в реальному часі.
- **Зберігання енергії:** Активний розвиток твердотільних акумуляторів та графенових суперконденсаторів для балансування мережі.
- **Електромобільність:** Зростання попиту на електромобілі стимулює розширення інфраструктури зарядних станцій, що потребує модернізації мереж.
- **Енергонезалежність:** Перехід до гібридних систем, де споживач стає виробником (prosumer), що забезпечує незалежність домогосподарств.
- **Автономність та безпека:** Впровадження систем самовідновлення (self-healing) мереж та превентивної діагностики іскріння/аварій.

В Україні особлива увага приділяється реконструкції зношених мереж, підвищенню якості напруги (перехід на стандарт 230/400 В) та збільшенню частки «зеленої» генерації.

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНИХ ЗАСОБІВ ДЛЯ АНАЛІЗУ ЕЛЕКТРИЧНИХ СИСТЕМ

