

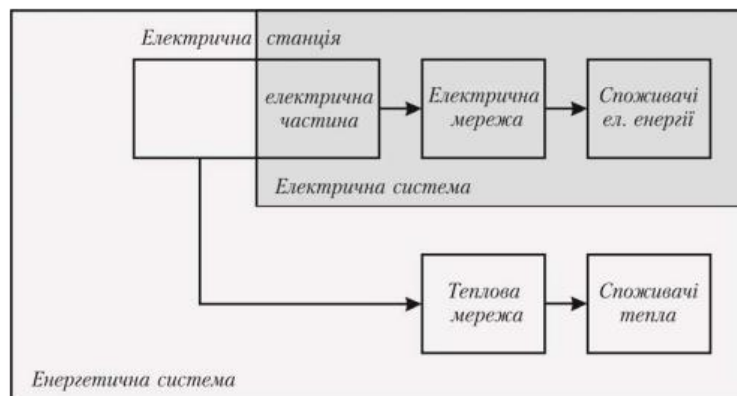
Тема 1. Електричні системи та мережі як об'єкти електроенергетики

Мета: сформуванати у здобувачів вищої освіти системне уявлення про електричні системи та електричні мережі як складні технічні об'єкти електроенергетики, їх структуру, функції та принципи функціонування; розкрити взаємозв'язок процесів генерації, передачі, розподілу та споживання електричної енергії; визначити роль електричних мереж у забезпеченні надійності, якості та стійкості роботи енергосистеми.

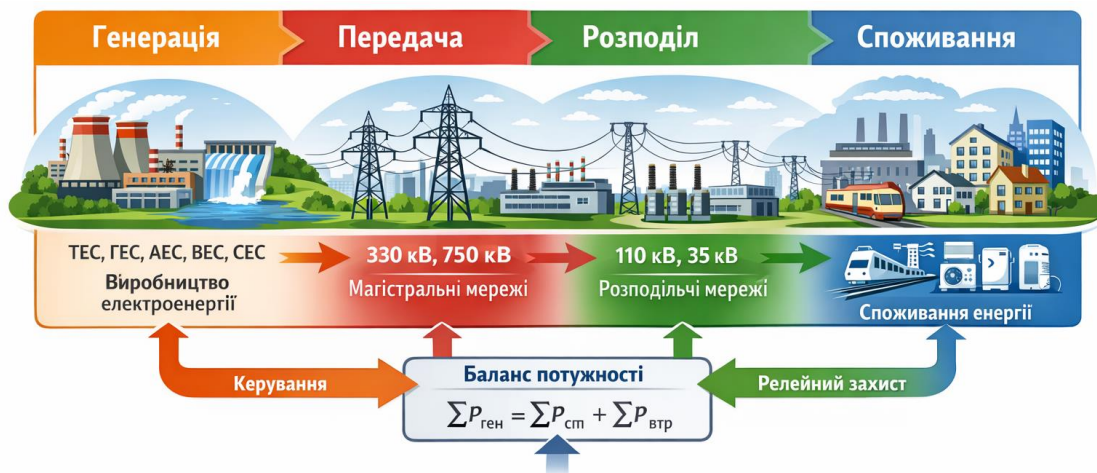
Електричні системи є складними технічними комплексами, що забезпечують виробництво, передачу, розподіл та споживання електричної енергії.

Енергосистема включає електростанції, підстанції, лінії електропередачі та споживачів.

Співвідношення між енергетичною та електричною системами умовно подано:



[Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 200 с.]



Основною метою функціонування електричної системи є забезпечення балансу активної та реактивної потужностей у кожний момент часу.

$$\sum P_{\text{ген}} = \sum P_{\text{сп}} + \sum P_{\text{втр}}$$

де

$P_{\text{ген}}$ — генерована потужність,

$P_{\text{сп}}$ — споживана потужність,

$P_{\text{втр}}$ — втрати в мережі.

Електричні мережі забезпечують передачу електроенергії на значні відстані з мінімальними втратами.

Сучасна електроенергетична система має ієрархічну структуру:

1.Генерація

- ТЕС, ГЕС, АЕС, ВЕС, СЕС
- Перетворення первинної енергії в електричну

2.Передача

- Магістральні мережі 220–750 кВ
- Передача на великі відстані з мінімальними втратами

3. Розподіл

- 110 кВ → 35 кВ → 10 кВ → 0,4 кВ
- Живлення кінцевих споживачів

4.Споживання

- Промисловість
- Транспорт
- Комунально-побутовий сектор

Рівні напруги та їх функціональне призначення

Рівень напруги	Призначення
750–330 кВ	Магістральна передача
220–110 кВ	Регіональна передача
35–10 кВ	Розподільчі мережі
0,4 кВ	Безпосереднє живлення споживачів

Підвищення напруги дозволяє зменшити струм:

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

А втрати потужності:

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

Отже, підвищення напруги → зменшення струму → зменшення втрат.

Енергосистема працює як єдиний технологічний комплекс.

- ◆ Генерація повинна миттєво реагувати на зміну навантаження.
- ◆ Передача забезпечує стійкий міжрегіональний перетік потужності.
- ◆ Розподіл гарантує якість напруги у споживача.

Частота системи визначається балансом потужності:

$$\Delta f \sim \Delta P$$

Порушення балансу → відхилення частоти → аварійні режими.

Роль електричних мереж у забезпеченні надійності та стійкості

Надійність визначається здатністю системи працювати без перерв.

Основні принципи:

- Резервування (кільцеві схеми)
- Автоматичне повторне вмикання (АПВ)
- Секціонування мереж
- Релейний захист та автоматика

Стійкість системи — здатність зберігати синхронізм після збурень.

Розрізняють:

- статичну стійкість
- динамічну стійкість
- перехідну стійкість

Головне призначення електричних мереж полягає в передаванні електричної енергії від джерел живлення та її розподіл між споживачами. Разом з цим електричні мережі призначені для передавання електричної енергії на віддалені відстані від центрів генерації в райони енергоспоживання. Також електричні мережі призначені для об'єднання на паралельну роботу різних електричних станцій та споживачів електричної енергії в єдиній електроенергетичній системі.

Об'єднання електричних систем на паралельну роботу призводить до підвищення надійності та економічності електропостачання, поліпшення якості електричної енергії.

Основні тенденції розвитку електричних систем

1. Smart Grid

- Цифровізація мереж
- Інтелектуальні лічильники
- Автоматизоване керування

2. Інтеграція ВДЕ

- Вітрова та сонячна генерація
- Накопичувачі енергії

3. Розвиток HVDC

- Зменшення втрат
- Міждержавні перетоки

4. Автоматизація та цифрові підстанції

- SCADA
- Цифрові релейні захисти
- IEC 61850

5. Децентралізація генерації

- Мікромережі
- Прос'юмери

ЗАДАЧІ

№ 1. Вплив рівня напруги на втрати потужності.

Умова: Передати активну потужність $P = 10$ МВт по трифазній лінії довжиною 20 км. Коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,9$. Повний активний опір фази $R = 4$ Ом. Порівняти втрати при напругах 10 кВ та 110 кВ.

Формули:

$$I = P / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi)$$

$$\Delta P = 3 I^2 R$$

Результати розрахунку:

Для 10 кВ: $I \approx 641$ А; $\Delta P \approx 4,93$ МВт (≈ 49 %)

Для 110 кВ: $I \approx 58,3$ А; $\Delta P \approx 40,8$ кВт ($\approx 0,4$ %)

Висновок: Підвищення напруги зменшує струм і втрати пропорційно квадрату струму.

№ 2. Розрахунок падіння напруги в розподільчій мережі 0,4 кВ

Умова: Трифазна мережа 0,4 кВ живить навантаження потужністю $P = 100$ кВт, $\cos\varphi = 0,85$.
Довжина лінії 0,2 км. Опір фази $R = 0,15$ Ом. Визначити струм і падіння напруги.

Формули:

$$I = P / (\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\varphi)$$

$$\Delta U = \sqrt{3} \cdot I \cdot R$$

Результати розрахунку:

Струм $I \approx 170$ А

Падіння напруги $\Delta U \approx 44$ В

Відносне падіння напруги ≈ 11 %

Висновок: Падіння напруги перевищує допустимі 5 %, тому необхідно збільшити переріз проводу або зменшити довжину лінії.

Контрольні питання

1. Що входить до складу електричної системи?
2. У чому полягає баланс потужності?
3. Які види потужності існують в електричних мережах?
4. Яке призначення електричних мереж?

Тема 2. Схеми електричних мереж та їх елементи

Схема електричної мережі відображає взаємозв'язки між її елементами. Основними елементами є генератори, трансформатори, лінії електропередачі та навантаження.

Мережі поділяються на радіальні, кільцеві та магістральні.

Вибір схеми залежить від вимог надійності та економічності.



Класифікація електричних мереж

◆ 1. За рівнем напруги

Рівень	Напруга	Призначення
Надвисока	750–330 кВ	Магістральна передача
Висока	220–110 кВ	Регіональні мережі
Середня	35–10 кВ	Розподільчі мережі
Низька	0,4 кВ	Живлення споживачів

2. За конфігурацією

- Радіальні
- Магістральні
- Кільцеві
- Сітчасті

3. За призначенням

- Магістральні
- Розподільчі
- Промислові
- Сільські
- Міські

Радіальна схема мережі — це спосіб побудови електромережі, де кожен споживач або розподільчий пункт живиться окремою лінією безпосередньо від центрального джерела (підстанції), утворюючи структуру "зірка". Вона забезпечує високу надійність для окремих споживачів, але вимагає більше кабелів і обладнання, часто використовуючись у вибухонебезпечних чи хімічно активних зонах.

Основні характеристики радіальної схеми:

Структура: **Житомиробленерго** від центральної шини підстанції відходять окремі промені (лінії) до споживачів.

Надійність: Висока для кожного окремого споживача, оскільки аварія на одній лінії не впливає на інші. Проте, вихід з ладу центрального джерела знеструмлює всіх.

Застосування: Використовується в цехах промислових підприємств, для живлення потужних приймачів, у мережах з вибухонебезпечним або хімічно активним середовищем.

Недоліки: Висока вартість через велику кількість кабелів та обладнання (автоматичні вимикачі, рубильники).

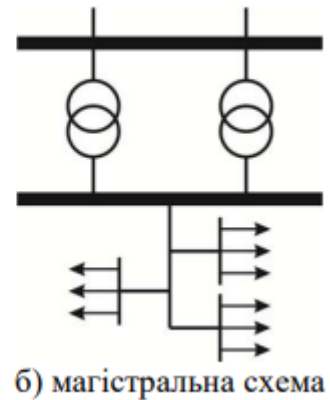
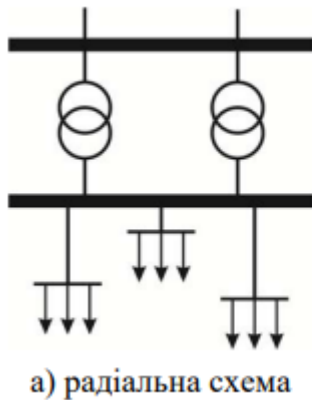
Порівняння: На відміну від магістральних схем, які кращі для малопотужних споживачів, радіальні схеми забезпечують гнучкість при зміні навантажень.

Магістральна схема мережі — це спосіб електропостачання, при якому живлення багатьох споживачів (наприклад, цехових верстатів) здійснюється від однієї головної лінії (шинопроводу) з відгалужувальними коробками. Вона

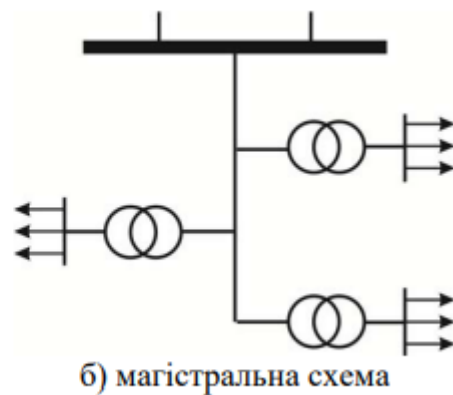
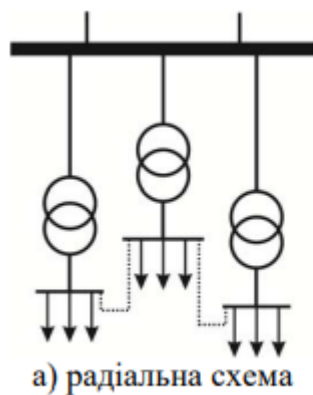
забезпечує високу гнучкість, економію кабелів та ідеальна для рівномірного розподілу навантаження вздовж лінії

- **Конструкція:** Використовується розподільний шинопровід, до якого підключаються споживачі.
- **Застосування:** Найчастіше застосовується в промислових цехах для живлення великої кількості малопотужних споживачів.
- **Переваги:** Вища гнучкість порівняно з радіальною схемою та менша витрата матеріалів, якщо споживачі розташовані лінійно.
- **Безпека:** Для захисту ліній, що відходять, встановлюють автоматичні вимикачі або запобіжники, а також рубильники для безпеки обслуговування.

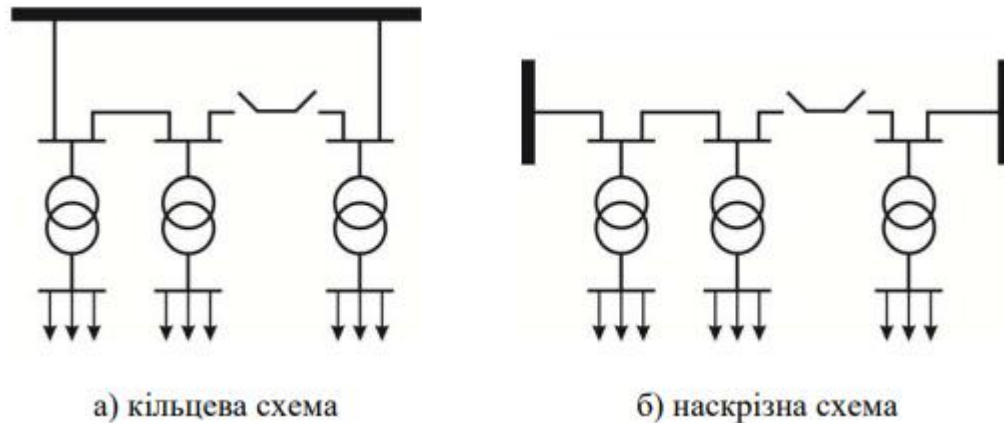
Схеми живлення споживачів від головної понижуючої підстанції:



Схеми живлення споживачів від центрального розподільного пункту:



Надійність електропостачання за магістральною схемою можна підвищити, якщо застосувати схему із двостороннім живленням. Тут можливі два підходи до формування таких схем – кільцеві або наскрізні схеми:



У нормальних режимах такі схеми експлуатують у розімкненому стані. У разі аварії, наприклад, короткого замкнення, пошкоджену ділянку вимикають, локалізуючи аварію.

Основні елементи електричних мереж: лінії електропередачі, трансформаторні підстанції, комутаційна апаратура.

Лінії електропередачі (ЛЕП). Передача електричної енергії від електростанцій до підстанцій та споживачів.

Класифікація:

- Повітряні лінії (ПЛ)
- Кабельні лінії (КЛ)
- Одноланцюгові та дволанцюгові
- За класом напруги (0,4–750 кВ)

Трансформаторні підстанції. Зміна рівня напруги та розподіл електроенергії.

Типи підстанцій: Підвищувальні; Понижувальні; Розподільчі; Тягові, промислові, вузлові. Функції – зниження втрат у передачі; розподіл потоків потужності; забезпечення якості напруги.

Комутаційна апаратура. Комутація електричних кіл та захист обладнання. Основні види: Вимикачі високої та низької напруги; Роз'єднувачі; Автоматичні вимикачі; Релейний захист; Запобіжники.

Узагальнююча схема взаємодії

ЛЕП → Підстанція → Комутаційна апаратура → Споживач

Контрольні питання

5. Які існують типи схем електричних мереж?
6. Від чого залежить вибір схеми?
7. Які елементи входять до складу мережі?
8. Як визначається повний опір лінії?

Тема 3. Електричні режими роботи систем і мереж

Електричний режим — це сукупність значень напруг, струмів, потужностей, частоти та фазових кутів у всіх елементах електричної системи в певний момент часу.

Режим визначається:

- балансом активної та реактивної потужності;
- параметрами навантаження;
- станом мережі (нормальний чи аварійний);
- схемою з'єднання.

Основні співвідношення режиму

Активна потужність:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

Реактивна потужність:

$$Q = \sqrt{3}UI \sin \varphi$$

Повна потужність:

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

Баланс потужності:

$$\sum P_{\text{ген}} = \sum P_{\text{сп}} + \sum P_{\text{втр}}$$

Падіння напруги: $\Delta U = I \cdot Z$

Втрати потужності: $\Delta P = I^2 R$

Частота мережі: $f = 50$ Гц

Коефіцієнт потужності: $\cos \varphi = P/S$

Електричні режими роботи систем і мереж



1. Нормальний режим

Характеризується:

- допустимими відхиленнями напруги ($\pm 5\%$ у розподільчих мережах);
- стабільною частотою (50 Гц);
- відсутністю перевантажень;
- синхронною роботою генераторів.

У цьому режимі забезпечується:

- нормативна якість електроенергії;
- мінімальні втрати;
- довговічність обладнання.

2. Післяаварійний режим

Виникає після відключення:

- лінії,
- трансформатора,
- генератора.

Може супроводжуватися:

- перевантаженням окремих елементів;

- підвищеними втратами;
- відхиленням напруги.

Завдання диспетчерського керування — відновити нормальний режим або запобігти розвитку аварії.

3. Аварійний режим

Виникає при:

- короткому замиканні;
- обриві лінії;
- втраті синхронізму;
- значному перевантаженні.

Характеризується:

- різким зростанням струмів;
- падінням напруги;
- можливим відключенням споживачів.

Вплив режимів на якість електроенергії

Основні показники якості:

- відхилення напруги;
- коливання частоти;
- гармонійні спотворення;
- несиметрія фаз.

Режими впливають на:

- Термін служби обладнання
- Нагрів провідників
- Ізоляцію трансформаторів
- Механічну стійкість апаратури

Перевантаження викликає:

$$\Delta P \uparrow \Rightarrow T \uparrow \Rightarrow Z_{\text{нос}} \uparrow$$

Короткі замикання викликають:

- електродинамічні удари;
- термічне руйнування контактів.

Відхилення напруги

$$\delta U = \frac{U - U_{\text{ном}}}{U_{\text{ном}}} \cdot 100\%$$

Допустиме відхилення:

$\pm 5\%$ (розподільчі мережі).

Частота

Порушення балансу потужності:

$$\Delta f \sim \Delta P$$

Зменшення генерації $\rightarrow$ падіння частоти

Зменшення навантаження $\rightarrow$ зростання частоти

Контрольні питання

1. Які режими роботи електричної системи існують?
2. Що таке усталений режим?
3. Як визначаються втрати потужності?
4. Що викликає перехідні процеси?

Тема 4. Основи теорії розрахунку електричних мереж

Мета: сформувати у здобувачів вищої освіти теоретичні основи розрахунку електричних мереж, навчити застосовувати методи побудови схем заміщення, виконувати розрахунок струмів і напруг у вузлах мережі, аналізувати графіки навантаження та оцінювати баланс активної й реактивної потужності.

Розрахунок електричних мереж передбачає визначення струмів, напруг та потужностей у вузлах.

Для розрахунку ustalених режимів застосовується метод вузлових напруг.

При розрахунку струмів короткого замикання використовують метод еквівалентних перетворень.

Математична модель мережі базується на законах Кірхгофа.

Основні формули

1-й закон Кірхгофа: $\Sigma I = 0$

2-й закон Кірхгофа: $\Sigma U = 0$

Струм КЗ: $I_{кз} = U / Z_{кз}$

Потужність трифазної системи: $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$

Розрахункова схема - спрощене зображення мережі, у якому реальні елементи замінюються їх електричними параметрами (опір, індуктивність, ємність).

Основні елементи схеми заміщення:

- Джерело ЕРС E
- Активний опір R
- Індуктивний опір X_L
- Ємнісний опір X_C

Повний опір:

$$Z = R + jX$$

де

$$X = X_L - X_C$$

Методи приведення схем заміщення

Приведення до однієї напруги

Коефіцієнт трансформації:

$$k=U_1/U_2$$

Приведений опір:

$$Z'=k^2Z$$

Метод еквівалентного джерела (Тевенена)

$$I=U/Z_{\text{екв}}$$

Застосовується для:

- розрахунку струмів короткого замикання;
- аналізу вузлових режимів.

Метод вузлових напруг. Базується на першому законі Кірхгофа:

$$\sum I=0$$

Розрахунок струмів і напруг у мережах

Для трифазної системи:

$$P = \sqrt{3}UI \cos \varphi$$

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

Падіння напруги:

$$\Delta U = I(R \cos \varphi + X \sin \varphi)$$

Втрати потужності:

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

Електричне навантаження — це потужність, яку споживає електроустановка або група споживачів.

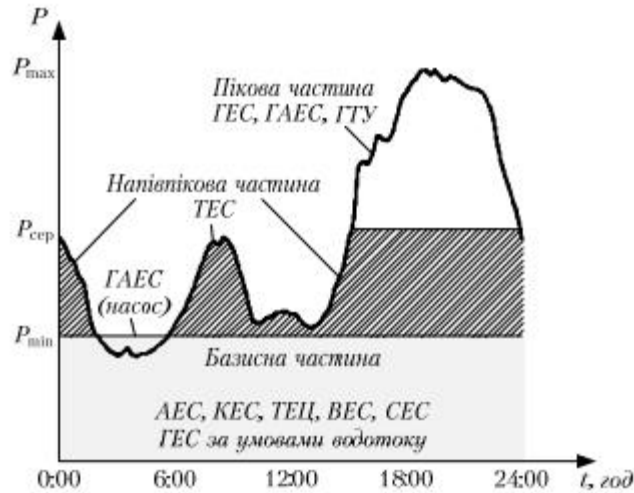
Характеризується:

- активною потужністю P
- реактивною потужністю Q
- коефіцієнтом потужності $\cos\varphi$

Сумарна потужність споживачів електричної системи не є фіксованою величиною, а постійно змінюється відповідно до складу електроприймачів, увімкнених в роботу у кожний момент часу, що відбивають, наприклад, добові графіки навантажень.

Атомні та великі конденсаційні електричні станції характеризуються великими встановленими потужностями, малими витратами палива на виробництво електричної енергії, але малим регулювальним діапазоном та малою маневреністю. Менш потужні теплові електростанції та теплоелектроцентралі характеризуються більшим 59 діапазоном регулювання потужності та більшою собівартістю виробітку електроенергії. Для визначення місця ТЕЦ у покритті графіків навантажень слід обов'язково зважати на те, що такі станції працюють за графіком теплопостачання, тому графік видачі електричної потужності є вимушеним. Найбільш маневровими електричними станціями електроенергетичних систем є гідравлічні, гідроакумуючі та газотурбінні електричні станції. Такі станції можуть достатньо швидко набрати необхідну потужність, або скинути її. Водночас потрібно пам'ятати, що нижня межа видачі потужності ГЕС обумовлена водотоком річок, а собівартість електричної енергії ГТУ є найвищою.

Для розв'язання задачі визначення складу генеруючих потужностей у покритті графіків навантажень електричних систем у складі добового графіку виділяють три зони – базисну, напівпікову та пікову. Базисна частина графіка охоплює діапазон навантажень між нулем та мінімальним навантаженням. Очевидно, що для покриття цієї частини графіка електричні станції працюють з незмінним протягом доби навантаженням. Це визначає використання в цій зоні електричних станцій з мінімальними витратами палива та обмеженим діапазоном регулювання режимів. До таких станцій належать АЕС та найбільш потужні КЕС, ТЕЦ, які працюють за вимушеним графіком навантаження теплових споживачів, частини потужностей ГЕС, обумовлені мінімальним водотоком, а також нетрадиційні джерела енергії – ВЕС та СЕС, потужності яких визначаються метеорологічними умовами.



[Електричні системи і мережі. Частина 1 : навчальний посібник / Ю. В. Малогулко, О. Б. Бурикін, Т. Л. Кацадзе, В. В. Нетребський ; за ред. П. Д. Лежнюка. – Вінниця : ВНТУ, 2020. – 200 с.]

До напівпікової частини належить навантаження між мінімумом та середнім навантаженням. Напівпікову частину графіку розподіляють між ТЕС відповідно до їх економічності та маневреності. Навантаження між середнім та піковим належить до пікової частини графіка. Пікову частину графіка покривають маневровими електростанціями – ГЕС та ГАЕС, ГТУ тощо.

Баланс активної та реактивної потужності

Активна та реактивна потужності:

$$\sum P_{\text{ген}} = \sum P_{\text{сп}} + \sum P_{\text{втр}}$$

$$\sum Q_{\text{ген}} = \sum Q_{\text{сп}} + \sum Q_{\text{втр}}$$

Порушення балансу →

- зміна частоти;
- зміна напруги;
- зниження стійкості системи.

Вплив структури навантаження на режими та втрати

При індуктивному характері навантаження:

$$\cos\varphi\downarrow\Rightarrow I\uparrow\Rightarrow\Delta P\uparrow$$

При великій частці реактивної потужності:

- підвищуються втрати;
- зростає падіння напруги;
- знижується пропускна здатність мережі.

Компенсація реактивної потужності:

$$Q_{\text{комп}}=Q_{\text{сп}}-Q_{\text{доп}}$$

Приклад графічної ілюстрації режиму

