

**МІНІСТЕРСТВО ВНУТРІШНІХ СПРАВ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ВНУТРІШНІХ СПРАВ  
КРЕМЕНЧУЦЬКИЙ ЛЬОТНИЙ КОЛЕДЖ**

**Циклова комісія авіаційного і радіоелектронного обладнання**

## **ТЕКСТ ЛЕКЦІЇ**

з навчальної дисципліни «Електричні системи і мережі»  
обов'язкових компонент  
освітньо-професійної програми першого (бакалаврського) рівня вищої освіти

***141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка  
(Електромеханіка)***

**За темою № 3 - Характеристики й параметри елементів електричних мереж.**

**ЗАТВЕРДЖЕНО**

Науково-методичною радою  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 30.08.2023 № 7

**СХВАЛЕНО**

Методичною радою  
Кременчуцького льотного коледжу  
Харківського національного  
університету внутрішніх справ  
Протокол від 28.08.2023 № 1

**ПОГОДЖЕНО**

Секцією Науково-методичної ради  
ХНУВС з технічних дисциплін  
Протокол від 29.08.2023 № 7

Розглянуто на засіданні циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, протокол від 28.08.2023 № 1.

***Розробник:***

*Викладач циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання, к.т.н., доцент, викладач вищої категорії, Шокарьов Д.А.*

***Рецензенти:***

- 1. К.т.н., спеціаліст вищої категорії, викладач-методист циклової комісії авіаційного і радіоелектронного обладнання Шмельов Ю. М.*
- 2. К.т.н., професор, завідувач кафедру електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

### **План лекції:**

1. Втрати потужності в ЛЕП .
2. Визначення втрат потужності на окремих ділянках мережі.
3. Розрахунок втрат електроенергії в елементах електричної мережі.
4. Векторна діаграма струму і напруги в лінії з однієї дільницею.
5. Питання для самоконтролю.

### **Література:**

#### **Основна література:**

1. Матвійчук А. Я. Електротехніка: навчально-методичний посібник/ Матвійчук А. Я., В. Л. Стінянський; Вінницький державний педагогічний університет ім. М.Коцюбинського. – Вінниця, 2017. -270 с.
2. Мілих В. І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для здобувач вищої освіти ів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків: ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. **Сегеда М. С. Електричні мережі та системи / Третє видання, доповнене та перероблене. Львів: Видавництво Львівської політехніки, 2015. 540 с.**

#### **Допоміжна література:**

1. Шестеренко, В. Є. Електропостачання промислових підприємств. Посібник до курсового та дипломного проектування / Шестеренко В. Є., Шестеренко О. В. — Київ, 2015. — 424 с.
2. Електричні системи та мережі. Методичні вказівки до виконання курсового проектування районної електричної мережі для здобувач вищої освіти ів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». /Укл.: А.П. Свіридов, Т.В. Величко – Кропивницький: ЦНТУ, 2019. – 80 с.
3. Козлов В. Д. Електрична частина станцій та підстанцій аеропортів: підручник / В. Д. Козлов, В. П. Захарченко, О. М. Тачиніна; за заг. ред. В. Д. Козлова.– К.: НАУ, 2018. – 312 с.

#### **Інформаційні ресурси в Інтернеті**

1. Офіційний сайт Міністерство енергетики України <http://mpe.kmu.gov.ua/>
2. Сервер Верховної Ради України. – Режим доступу : [www.rada.gov.ua](http://www.rada.gov.ua).

### **1 Втрати потужності в ЛЕП.**

**Втрати потужності в ЛЕП** - це втрати на нагрів провідників ЛЕП змінним струмом, вони можуть бути знайдені за допомогою виразу:

$$\Delta P = 3I^2 r = 3(I_a^2 + I_p^2) \cdot r,$$

Активна та реактивна потужності:

$$P = \sqrt{3} U_{\text{л}} I \cos \varphi; \quad Q = \sqrt{3} U_{\text{л}} I \sin \varphi$$

$$I_a = I \cos \varphi; \quad I_p = I \sin \varphi.$$

$$\Delta P = 3 \left[ \left( \frac{P}{\sqrt{3} U} \right)^2 + \left( \frac{Q}{\sqrt{3} U} \right)^2 \right] \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r = \frac{S^2}{U^2} r$$

Будьяка індуктивність яка споживає струм, є споживач реактивної потужності.

$$Q_L = 3I^2 x$$

Втрати реактивної потужності трифазних ЛЕП визначаються аналогічно виразу втрат активної потужності:

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} x = \frac{S^2}{U^2} x.$$

Будьяка ємність, до якої прикладено напругу мережі, є генератор реактивної потужності. Генерована ємнісною провідністю поперечної гілки схеми заміщення ЛЕП зарядна потужність дорівнює:

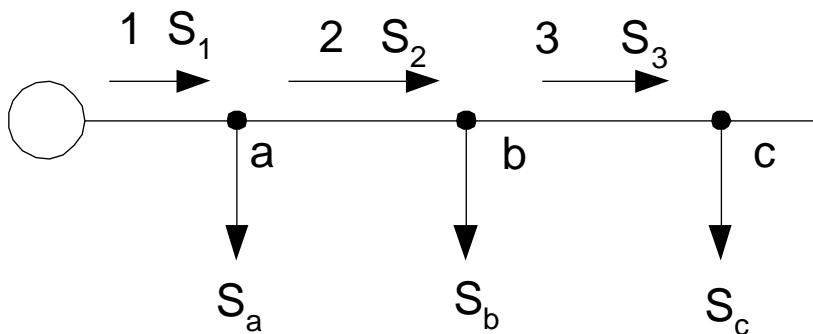
$$Q_c = U^2 \omega C = U^2 \omega C.$$

$Q_c$  зменшує реактивну потужність ліній  $Q_L$  (як би частково компенсує) і тим самим знижує витрати потужності  $\Delta P$  та  $\Delta Q$  ( $Q = Q_L - Q_c$ ).

Із виразу (4) і (5) можна зробити висновки:

- 1 - втрати  $\Delta P$  і  $\Delta Q$  залежать як від передаваної в лінії  $P$  так і від  $Q$ ,
- 2 - втрати потужності зворотнопропорційні квадрату напруги, тому навіть невелике підвищення напруги ( $U$ ) призводить до значного зниження втрат потужності.

Втрати потужності в лінії з декількома навантаженнями визначаються шляхом підсумовування втрат на кожній ділянці.



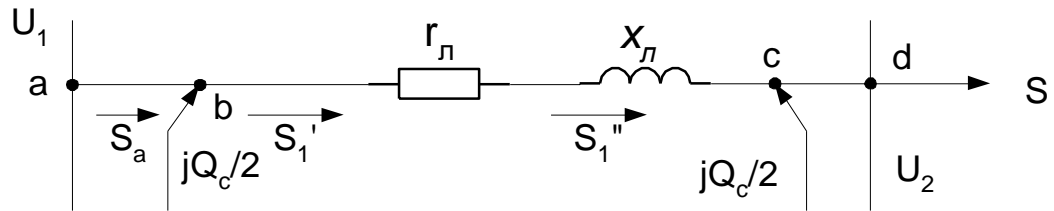
На цій схемі  $S_1$ ,  $S_2$ ,  $S_3$  – лінійні потужності (які транспортуються).  $S_a$ ,  $S_b$ ,  $S_c$  – загрузочні потужності (які відбираються).



## 2 Визначення втрат потужності на окремих ділянках мережі.

В лініях районних мереж значення комплексної повної потужності у передавального і приймального кінців повздовжньої гілки ділянки неоднакові (із-за втрат). Тому визначають потужність наприкінці і на початку ділянки.

Розглянемо району мережу з П-образною симетричною схемою заміщення.



де: т. а, b – передавальний і приймальний кінці ділянки,

т. b, c – передавальний і приймальний кінці повздовжньої гілки схеми заміщення,

$\dot{S}'_1, \dot{S}_1''$  – комплексне значення повної потужності у передавального і приймального кінців повздовжньої гілки схеми заміщення,

$\dot{S}_0(\dot{S}_a)$  – комплексна повна потужність у передавального кінця ділянки,

$\dot{S}$  – потужність навантаження.

Вказані потужності можна виразити:

$$\dot{S}'_1 = P' + jQ' = \dot{U}_1 \dot{I}$$

$$\dot{S}_1'' = P'' + jQ'' = \dot{U}_2 \dot{I}$$

$$\dot{S} = P + jQ$$

Струм повздовжньої гілки може визначатися як по даним передавального, так і по даним приймального кінця ділянки.

Зі схеми визначаємо значення потужності:

$$\dot{S}'' = \dot{S} - jQ_c/2 = P + jQ - \frac{jQ_c}{2} = P + j\left(Q - \frac{Q_c}{2}\right)$$

$$\dot{S}'_1 = \dot{S}_1'' + \Delta\dot{S} = \dot{S}'' + \Delta P + j\Delta Q,$$

$$\dot{S}_0 = \dot{S}'_1 - j\frac{Q_c}{2}.$$

Значення  $\dot{S}_0$  відрізняється від потужності  $\dot{S}'_1$ ,

$$S_0 = P_0 + jQ_0 = \dot{S}'' + \Delta P + j\Delta Q - j\frac{Q_c}{2}$$

У цьому зв'язку втрати потужності в повздовжній гілці можна визначити по даним початку і кінця лінії.

$$\Delta \dot{S} = \frac{(\dot{S}')^2}{(U_1)^2} z = \frac{(\dot{S}'')^2}{(U_2)^2} z .$$

В місцевих мережах при розрахунку не враховуються:

- поперечні гілки (зарядна потужність),
- втрати потужності в мережах.

Тому, в місцевих мережах:

$$\dot{S}' = \dot{S}'' = \dot{S} , \text{ тоді } \Delta S = \frac{P^2 + Q^2}{U_{ном}^2} z$$

#### Втрати потужності в трансформаторах:

Існують 4 види втрат потужності:

- 1- втрати активної потужності (витрати в міді)

$$\Delta P = \Delta P_K = \Delta P_M = 3I_H^2 r_{TP} = \frac{S_{TP}^2}{U^2} r_{TP} ,$$

- 2- втрати реактивної потужності в міді ( $X_{TP}$ )

$$\Delta Q = \frac{S_{TP}^2}{U^2} x_{TP} ,$$

- 3- втрати активної потужності в сталі ( $g_{TP}$ )

$$\Delta P_X = \Delta P_{CT} = U^2 g_{TP} ,$$

- 4- втрати реактивної потужності в індуктивній провідності ( $B_{TP}$ ) в режимі хх:

$$\Delta Q_X = U^2 b_{TP} .$$

Сумарні втрати потужності в трансформаторі:

$$\Delta P_{TP} = \Delta P_K + \Delta P_X , \quad (\Delta P_K \triangleright \Delta P_X)$$

$$\Delta Q_{TP} = \Delta Q_K + \Delta Q_X$$

$$\Delta S_{TP} = \Delta P_{TP} + j\Delta Q_{TP}$$

- при розрахунках втрат потужності в трансформаторі використовуються каталожні данні.

### 3 Для двообмоткового трансформатора:

$\Delta P_{TP} = \Delta P_X + \Delta P_K \beta^2$ , де  $\beta$  - коефіцієнт завантаження трансформатора.

$$\beta = \frac{S_{TP}}{S_{TP.ном}}$$

$$\Delta Q_{TP} = \Delta Q_X + \Delta Q_K \beta^2,$$

$$\Delta Q_K = \frac{U_K \%}{100} S_{ном}, \quad \Delta Q_X = \frac{I_X \%}{100} S_{ном}$$

Коли потужність ПС (потрібна) перевищує потужність трансформатора (номінальну), на ПС встановлюють декілька трансформаторів.

При паралельній роботі однакових трансформаторів на ПС сумарні втрати потужності ПС:

$$\Delta P_{ПС_{n_T}} = n_T \Delta P_X + \frac{1}{n_T} \Delta P_K \beta^2$$

$$\beta = \frac{S_{ПС}}{S_{TP.ном}} \text{ (одного трансформатора).}$$

### 3 Розрахунок втрат електроенергії в елементах електричної мережі.

#### Втрати енергії в ЛЕП:

В лініях з постійним навантаженням ( $P(t)=const$ ) втрати енергії за деякий час  $t$  складають:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta P t = 3 I^2 r t$$

В реальній мережі, в якій навантаження постійно змінюється, тобто  $P(t) \neq const$ , втрати електроенергії можна визначити:

$$\Delta \mathcal{E} = \Delta W = \int_0^{T_2} 3 I^2(t) r \cdot dt = 3r \int_0^{T_2} I^2(t) dt, \text{ де}$$

$T_T$  – річний час; в році 8760 годин.

*\* щоб розрахувати втрати енергії по останньому виразу, треба мати графік навантаження, який, як правило, при проектуванні відсутній. Тому цей вираз не використовується.*

*\* розрахунок витрат ведеться приблизними методами: одним з них є метод, оснований на введенні умовного поняття «час максимальних витрат» -  $\tau$ .*

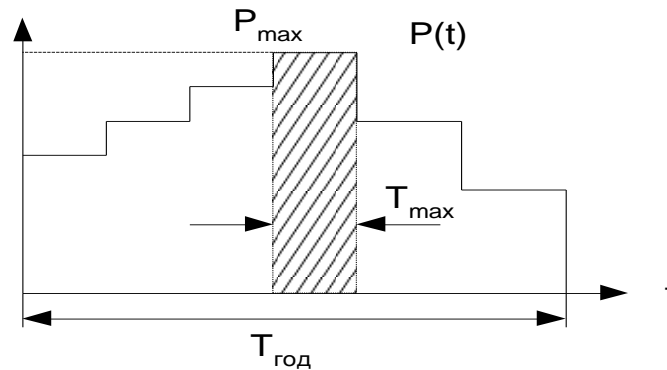
Цей час визначається за графіком або приблизному виразу:

$$\tau = f(T_{\max}, \cos \varphi), \text{ де}$$



$T_{\max}$  – це час (число годин) використання  $P_{\max}$  навантаження на рік.

Для розуміння поняття  $T_{\max}$  розглянемо графік залежності активної передаваної потужності  $P$  від часу  $t$ :



$E$  – енергія;  $E_{\text{год}} = P(t) T_{\text{год}} = P_{\max} \cdot T_{\max}$ .

$T_{\max}$  – час максимальних навантажень,

– це деяка умовна величина, яка при множенні на  $P_{\max}$  дає таке ж значення, як і  $P(t) T_{\text{год}}$ ,

– значення приймається за довідниковою літературою в залежності від галузі промисловості і змінності роботи підприємства.

$$\Delta \mathcal{E}_l = \Delta P_{\max} \cdot \tau = 3I_{\max}^2 r \cdot \tau = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} r \cdot \tau$$

Втрати енергії в трансформаторі залежать від двох параметрів, залежних і незалежних від навантаження:

$$\Delta \mathcal{E}_T = \Delta P_X t + \tau \Delta P_K,$$

де:  $t$  – час підключення трансформатора до мережі.

Річні втрати електроенергії в трансформаторах підраховують з використанням каталожних даних.

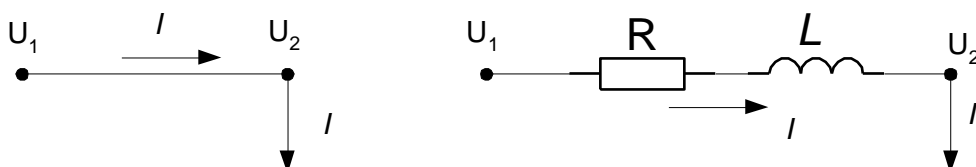
Для двообмоткових трансформаторів використовують вираз:

$$\Delta \dot{Y}_{\tilde{O}} = 8760 \cdot \Delta \tilde{D}_{\tilde{O}} + \beta^2 \tau \Delta \tilde{D}_{\tilde{E}},$$

$$\text{де: } \beta = \frac{S_T}{S_{T.\text{ном}}} \text{ – коефіцієнт завантаження.}$$

#### 4 Векторна діаграма струму і напруги в лінії з однієї ділянкою.

Розглянемо лінію і схему її заміщення, в якій для спрощення поперечні провідності не враховуємо.





Значення струму навантаження можна виразити через відомі значення  $S$  і  $U$ . Оскільки на векторній діаграмі вектор  $\dot{U}_2$  сполучений з дійсною віссю, можна вважати, що:  $\dot{U}_2 = U$  тоді:

$$\Delta \dot{U} = \dot{I} \cdot z = \frac{P - jQ}{U} (r + jx) = \frac{Pr + Pjx + Qx - jQz}{U} = \frac{Pr + Qx}{U} + j \frac{Px - Qr}{U}$$

, звідси:  $\Delta U_{\text{ПД}} = \frac{Pr + Qx}{U}$ ,  $\delta U_{\text{ПП}} = \frac{Px - Qr}{U}$ .

Щоб визначити напругу  $\dot{U}_1$  на живлячому кінці лінії, треба до напруги  $\dot{U}_2$  в кінці додати падіння напруги.

$$\dot{U}_1 = U_1 e^{jY} = \dot{U}_2 + \Delta \dot{U} = \dot{U}_2 + \Delta U_{\text{ПД}} + j \delta U_{\text{ПП}},$$

$$U_1 = \sqrt{(U_2 + \Delta U_{\text{ПД}})^2 + (\delta U_{\text{ПП}})^2},$$

$$Y = \arctg \frac{\delta U_{\text{ПП}}}{\Delta U_{\text{ПД}}}.$$

В районних мережах ( $U \geq 110$  кВ) враховують обидві складові падіння напруги. В місцевих мережах ( $U < 110$  кВ) поперечну складову падіння напруги не враховують. Тоді  $U_1 \approx U_2 + \Delta U_{\text{ПД}}$ .

Відповідно, в місцевих мережах втрати напруги можна прирівняти до повздовжньої складової падіння напруги, і тоді

$$\Delta U = \frac{Pr + Qx}{U_{\text{ном}}}.$$

### 5 Питання для самоконтролю.

1. Чим обумовлені втрати потужності в ЛЕП?
2. Яким чином визначають втрати потужності на окремих ділянках мережі?
3. Які види втрат потужності існують в трансформаторах?
4. Від чого залежать втрати потужності в двообмоткових трансформаторах та втрати потужності на ПС?
5. Якими методами можна розрахувати втрати енергії в ЛЕП?
6. В чому різниця між поняттями падіння напруги і втрата напруги?
7. Що таке повздовжня і поперечна складові падіння напруги?

**Висновки:** В результаті вивчення матеріалу студенти повинні мати уяву про передачу активної і реактивної потужності по проводам і проперетворення напруги в трансформаторах, що супроводжується частковою втратою потужності і енергії.  
параметри, які їх характеризують.