

**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 № 8 - Регулювання частоти й активної потужності в  
електроенергетичній системі**

**Кременчук 2023**

**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 кафедрою електричних станцій Національного технічного університету «Харківський політехнічний інститут» Лазуренко О.П.*

### **План лекції:**

1. Регулювання напруги в електричних мережах. Загальні положення.
2. Принципи регулювання напруги в мережі.
3. Способи і засоби регулювання напруги.
4. 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. Міліх В. І. Електропостачання промислових підприємств: Підручник для здобувач вищої освіти ів електромеханічних спеціальностей / В.І. Міліх, 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. Свірідов, 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. Регулювання напруги в електричних мережах. Загальні положення**

Однією із важливих вимог до електропостачання являється забезпечення якості електроенергії, під яким розуміють прийнятність підведеної енергії для споживача.

Якість енергії характеризується визначеними показниками (ПЯЕ – показники якості енергії), які установлюються ДГСТом. Зміни напруги оцінюються так званим відхиленням напруги. Відхилення напруги  $V$  представляє собою різницю між фактичною і номінальною напругою мережі:

$$V = U - U_{ном},$$

у відносній формі записується так:

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

Відхилення напруги суттєво впливає на роботу електрифікованого обладнання і мереж та приводить до електромагнітної і технологічної складової економічного збитку:

для АД:

якщо  $U \downarrow$ , то  $M_{вр} \downarrow$ ,  $I \uparrow$ ,  $Q \uparrow$ ,  $\Delta P \uparrow$   
якщо  $U \uparrow$ , то  $M_{вр} \uparrow$ ,  $I \downarrow$ ,  $Q \downarrow$ ,  $\Delta P \downarrow$ ,

для освітлювальних пристроїв:

$U \downarrow 10\% \Rightarrow F \downarrow 30\%$  (світовий потік  $= F$ )

$U \uparrow 10\% \Rightarrow T_{сл} \downarrow$  в 3 рази ( $T_{сл}$  – термін служби).

В живлячих мережах зміна напруги буде призводити до зміни втрат потужності і енергії ( $U_{var} = \Delta P_{var}$ ). Покажемо залежність зниження втрат потужності від підвищення напруги ( $U \uparrow \Rightarrow \Delta P \downarrow$ ):

- втрати активної потужності при деякій напрузі  $U$  будуть рівні:

$$\Delta P = \frac{S^2}{U^2} r$$

Візьмемо втрати потужності при цій напрузі в відносних одиницях такими, що дорівнюють 1:

$$\Delta P = 1.$$

Припустимо, що в мережі з цими ж значеннями  $S$  і  $r$  напруга збільшилась на  $\Delta U$  (або на відносне значення  $\Delta \hat{U} = \frac{\Delta U}{U_{ном}}$ ). Тоді втрати

потужності в лінії складають (у відносних одиницях):

$$\Delta \hat{P}_{\Delta \hat{U}} = \frac{1}{(1 + \Delta \hat{U})^2} = \frac{1}{1 + 2\Delta \hat{U} + \Delta \hat{U}^2},$$

так як  $\Delta U \ll U$ , то  $\Delta \hat{U}^2 \rightarrow 0$ , тоді:

$$\Delta \hat{P}_{\Delta \hat{U}} = \frac{1}{1 + 2\Delta \hat{U}}.$$

Помножимо чисельник і знаменник на величину  $(1 - 2\Delta U)$ , тоді

$$\Delta \hat{P}_{\Delta \hat{U}} = \frac{1 - 2\Delta \hat{U}}{1 - 2\Delta \hat{U}^2}, \Delta \hat{U}^2 \rightarrow 0, \text{ тоді}$$

$$\Delta \hat{P}_{\Delta \hat{U}} \cong 1 - 2\Delta \hat{U} \quad (1).$$

Із виразу (1) можна зробити висновки:

Ступінь зниження втрат потужності в мережі приблизно в два рази більше ступені зміни напруги.

З урахуванням того, що при підвищенню напруги (U) в мережі постійні втрати потужності в трансформаторах збільшуються, сумарний ефект зниження втрат потужності при збільшенні напруги буде дещо нижчий, ніж у випадку (1).

Тому, в живлючих мережах за умовою зниження втрат потужності і енергії  
раціонально підтримувати робочу напругу в мережі на максимально високому рівні.

Стандартом встановлено найбільша лінійна робоча напруга мережі поверх номінальної. Ці значення представлені в таблиці:

Номінальна напруга мережі, кВ	Значення крайньої допустимої напруги, $=K_p \cdot U_{ном}$
$\leq 20$	$1,2 \cdot U_{ном}$ (тобто +20%)
35÷220	$1,15 \cdot U_{ном}$
330	$1,1 \cdot U_{ном}$
500÷1100	$1,05 \cdot U_{ном}$

\* зменшення  $K_p$  пов'язано з ізоляцією.

Висновок:

- 1) В мережах з напругою  $U \leq 220$  кВ найбільш доцільно знижувати втрати потужності і енергії за рахунок підвищення рівня робочої напруги.
- 2) В розподільчих мережах допустимі рівні напруги визначені на основі оцінки збитків від зниження якості електроенергії. Стандартом встановлені межі змін (границі допустимих відхилень напруги) на затискачах електричних приймачів. В умовах нормального режиму ці межі дорівнюють:

Найменування електричних приймачів	$V_{доп}, \%$
Затискач освітлювальних пристроїв	$- 2,5 \dots + 5$
Затискачі електромашин і електроапаратів	$- 5 \dots + 10$
Затискачі інших електроприймачів	$\pm 5$

В післяаварійних режимах допускаються додаткове змінення напруги на 5%.

В електричних мережах проходять безперервні відхилення напруги з двох причин:

- внаслідок зміни режиму роботи енергетичних систем (електростанції, ПС, живлячих мереж);
- внаслідок технологічних, добових і сезонних змін електричних навантажень споживачів, що призводить до зміни втрат напруги в елементах мережі.

Для підтримки необхідного відхилення напруги в мережах всіх ступенів необхідно здійснювати регулювання напруги. Під регулюванням напруги розуміють процес зміни рівня напруги в характерних точках мережі за допомогою спеціальних технічних засобів.

## **2 Принципи регулювання напруги в мережі.**

Регулювання напруги передбачається в живлячих і розподільчих мережах і проводиться незалежно. Але основна задача регулювання напруги в цих мережах різна:

- в живлячих мережах – зниження втрат потужності електроенергії.
- в розподільчих мережах – підтримання нормованих відхилень напруги на затискачах електричних приймачів.

Регулювання напруги може бути централізованим і місцевим.

Централізоване здійснюється в центрах живлення і змінює напругу у всій мережі.

Місьцеве регулювання здійснюється безпосередньо споживачем і змінення напруги (U) проходить тільки в локальній частині мережі.

Найбільш ефективне комбіноване управління.

\* при виборі метода регулювання напруги необхідно враховувати характер змін навантажень на протязі доби і року. По цьому критерію застосовують 3 способи (метода) централізованого регулювання напруги:

- 1) метод стабілізації
- 2) змінний метод
- 3) метод зустрічного регулювання.

Метод стабілізації використовується на підприємствах з практично постійним рівнем навантаження.

Змінний метод застосовують на підприємствах, працюючих в одну зміну.

В більшості випадків підприємства працюють цілодобово, при цьому графіки їх навантаження на протязі зміни, доби і сезону суттєво змінюються. Для таких навантажень застосовується метод зустрічного (узгодженого) регулювання.

В основному графіки навантажень багатоступеневі. При цьому навантаження змінюється як на протязі доби так і року. В цих випадках застосовується зустрічне регулювання напруги, яке враховує як добове, так і сезонне змінення напруги. При такому врегулюванні в режимах найбільших і найменших навантажень напруга на шинах підстанцій відповідно збільшується або знижується. Такий метод регулювання є найбільш ефективним.

ПУЕ регламентує вимоги до параметрів змінення напруги при зустрічному регулюванні:

- на шинах ПС, від яких живляться розподільчі мережі середніх класів напруги ( $> 1\text{kV} \dots = 35\text{kV}$ ), відхилення напруги повинно бути в період найбільших навантажень не більше 10% та при цьому  $U_{\text{нн}} \text{ ПС}$  повинно бути не менше  $1,05 U_{\text{ном}}$ :

$$U_{\text{нн}} \geq 1,05 U_{\text{ном}}.$$

В період мінімальних навантажень (під ними підіймаються навантаження, які не перевищують 30% від  $S_{\text{ном}}$ ) напруга на шинах ПС:

$$U_{\text{нн}} = U_{\text{ном}},$$

в післяаварійних режимах це значення:

$$U_{\text{нн}} = U_{\text{ном}}.$$

Вводиться поняття напруги з бажаними відхиленнями на стороні НН трансформатора:

$$V_{\text{тах нагр}}^{\text{жел}} = 5\%; V_{\text{тін нагр}}^{\text{жел}} = 0\%.$$

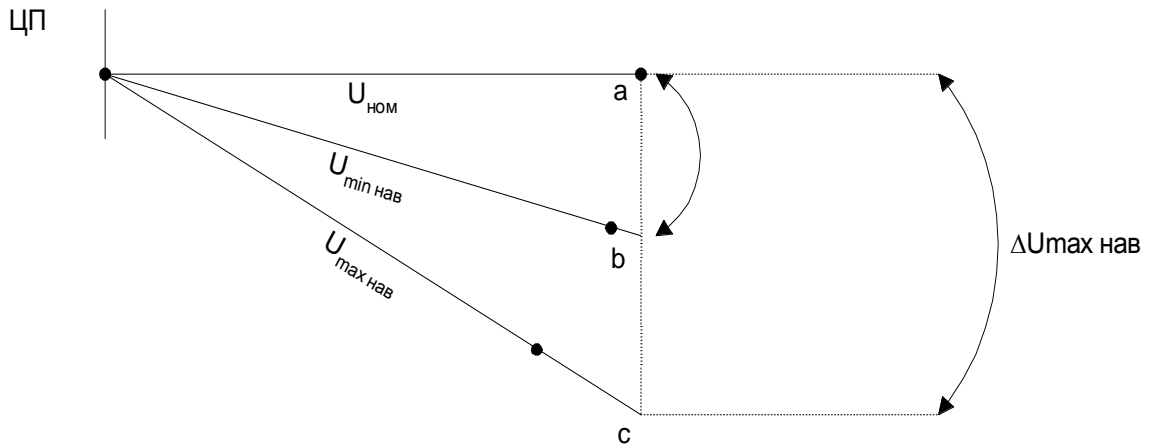
Сутність зустрічного регулювання напруги розглянемо на спрощеній схемі живлення споживачів місцевої розподільчої мережі від центра живлення (ГЗП або ПГВ – ПС глибокого вводу). При цьому ЦП (нейтральне живлення) підключається до мережі енергосистеми.

Представимо графік змінення напруги у вигляді епюр напруги, на яких по вісі ординат відкладаємо значенням відхилення напруги  $V = f(\Delta U)$ .

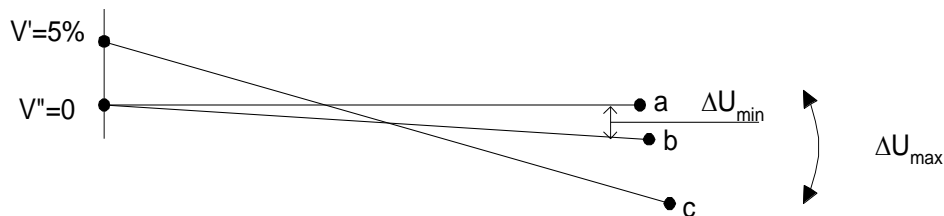
Графік побудуємо для двох режимів - найбільших і найменших навантажень. Відхилення напруги на шинах НН ПС позначені  $V'$  – для максимальних навантажень;  $V''$  – для мінімальних навантажень. А відхилення напруги на затискачах споживачів відповідно  $V_{\text{max}}$  і  $V_{\text{min}}$ . Зобразимо графіки змінення напруги на одній ділянці мережі для двох випадків.

- а) при відсутності регулювання напруги,
- б) при наявності регулювання напруги.

а)  $V' = V'' = 0$  на ЦП



б)  $V'=5\%$ ;  $V''=0$



При зустрічному регулюванні, коли  $V'=5\%$ , відхилення напруги у споживачів у кінці лінії в період максимальних навантажень  $ac' < ac$ , а в період мінімальних навантажень  $ab = ab_1$ .

### 3 Способи і засоби регулювання напруги.

Змінення напруги у споживачів характеризується величиною падіння напруги, яке, якщо знехтувати поперечною складовою, визначається із відомого виразу для визначення  $\Delta U$ :

$$\Delta U = U_1 - U_2 = \frac{Pr + Qx}{U_{ном}},$$

$$U_2 = U_1 - \Delta U = U_1 - \frac{Pr + Qx}{U_{ном}}.$$

Для змінення напруги на затискачах електричного приймача можна використовувати два способи, які змінюють одну із вхідних в цей вираз величин. У відповідності з цим розрізняють:

- регулювання  $U_1$  на шинах ЦП (на електростанціях та ПС)
- змінення  $\Delta U$  шляхом регулювання  $Q$  або  $x$  ( $P$  і  $r$  використовувати неможна, вони використовуються тільки в системних мережах).

Відповідно двом способам змінення напруги технічні засоби регулювання напруги підрозділяють на дві групи:

1 - засоби регулювання напруги джерела живлення  $U_{\square}$ ;



## 2 - засоби зміни втрат $\Delta U$ .

### Засоби регулювання $U_1$ :

Напруга  $U_1$  регулюється на електростанціях шляхом регулювання струму збудження синхронного генератора. Такий захід можливий при наявності АРЗ (автоматичне регулювання збудження). При цьому діапазон регулювання генератора  $\pm 5\%$ . По цій та іншим причинам генератори електростанцій є допоміжними засобами регулювання.

Регулювання  $U_1$  на ПС здійснюється за допомогою вбудованих в трансформатори пристроїв регулювання. Для цього обмотки трансформатора обладнують регульовальними відгалуженнями, які дозволяють змінити  $K_t$  (коефіцієнт трансформації). Регулювання відгалуженнями зазвичай виконують на стороні ВН трансформатора (так як на стороні НН струми набагато більше). **Конструктивне виконання такого рішення розглянути самостійно.**

За способом переключення регульовальних відгалужень трансформатори підрозділяються на два типи:

1 – з переключенням відгалужень без збудження (без навантаження) = трансформатори з ПБЗ,

2 – з переключенням під навантаженням = трансформатори з РПН.

Трансформатори з ПБЗ випускають для класів  $U=6\div 20$  кВ. Виготовляють їх з 4-ма додатковими відгалуженнями і відповідно з 4-ма рівнями зміни напруги:

$+5\%$ ,  $+2,5\%$ ,  $-2,5\%$ ,  $-5\%$ . Такі трансформатори не дозволяють здійснювати добове регулювання при зміні добових навантажень, але їх використовують для регулювання при сезонних змінах навантаження.

Трансформатори з РПН випускають для  $U_{ном} \geq 35$  кВ. Вони виготовляються із збільшеним числом ступенів регулювання відгалужень і мають різні діапазони регулювання напруги:  $\pm 9\%$ ;  $\pm 12\%$ ;  $\pm 15\%$ ;  $\pm 16\%$ .

### Засоби регулювання напруги шляхом змінення $\Delta U$ .

#### **1) Змінення опору мережі.**

Складова активного і індуктивного питомого опору в розподільчій і живлячій мережах різні:

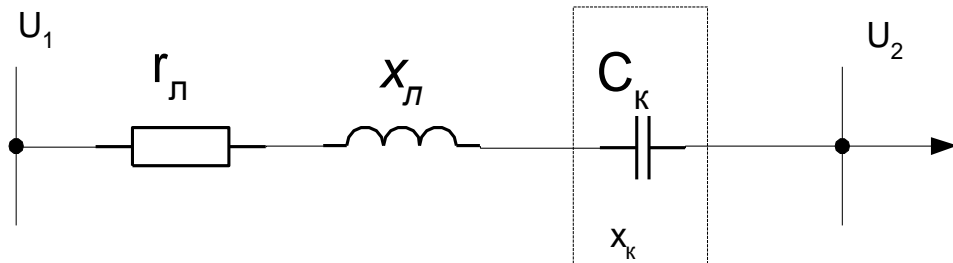
- в розподільчій мережі:  $r_0 > x_0$ ,
- в живлячих (районних) мережах:  $x_0 > r_0$ .

У величині втрат напруги  $\Delta U$  основну роль відіграє перша складова втрат (тобто  $P \cdot r$ )

При зміні перетину проводу  $F$  можна змінити значення  $r_0$  і втрат. Тому в розподільчих мережах вибраний за навантаженням перетин проводу повинен перевірятися за припустимою втратою напруги  $\Delta U_{доп}$

В живлячих мережах навпаки :  $x_0 > r_0$  тому втрати напруги  $\Delta U$  мало залежать від  $F$ , тобто збільшення перетину проводу в таких мережах для зменшення  $\Delta U$  недоцільно.

Для зменшення втрат напруги зменшують  $x$  (індуктивний опір) лінії шляхом включення послідовно в лінію ємності (батареї статичних конденсаторів - БСК).



УПК – установка повздовжньої компенсації.

Таке включення ємності називається повздовжньою компенсацією, а пристрій для її реалізації – установкою повздовжньої компенсації (УПК).

Включення в розсічення ліній  $x_K$  частково компенсує (зменшує) індуктивний опір ліній  $x_L$ . А результуюче  $x$  буде дорівнювати:

$$x_{рез} = x_L - x_K.$$

В лінії без УПК повздовжня складова падіння напруги  $\Delta U$  без УПК:

$$\Delta U_{безУПК} = \frac{P_2 r_L + Q_2 x_L}{U_{ном}},$$

при увімкненому УПК:

$$\Delta U_{зУПК} = \frac{P_2 r_L + Q_2 (x_L - x_K)}{U_{ном}} = \frac{P_2 r_L + Q_2 x_L}{U_{ном}} - \frac{Q_2 x_K}{U_{ном}}$$

Як правило використовують часткову компенсацію (недокомпенсацію), тобто  $x_K < x_L$  із-за можливості резонансу при  $x_K = x_L$ .

УПК застосовують не тільки для покращення режимів напруги, але і для підвищення пропускної здатності лінії.

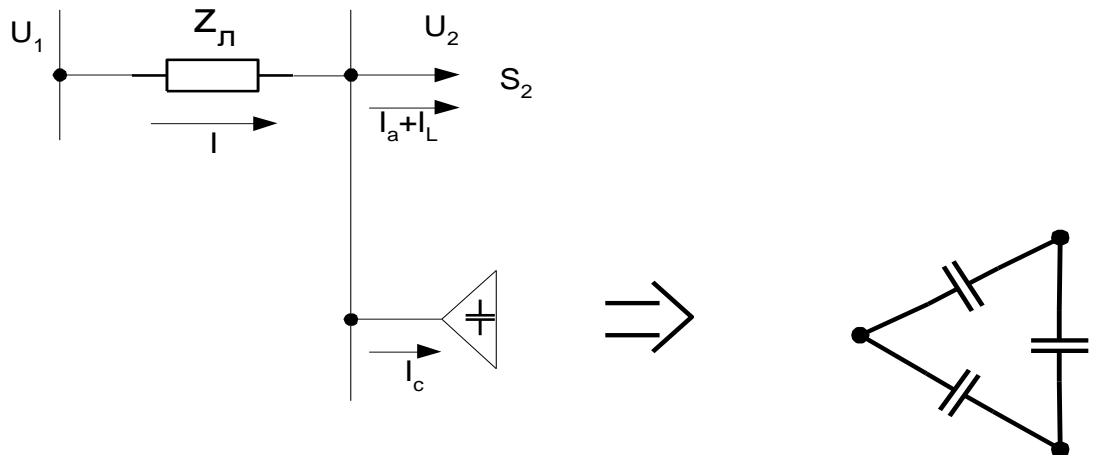
Основні характеристики УПК:

- 1 - тут  $x_K$  нерегульоване,
- 2 - зміни  $x_K$  – можна змінити дискретно (неплавне регулювання),
- 3 - тільки часткова компенсація,
- 4 - регулювання тільки в одну сторону.

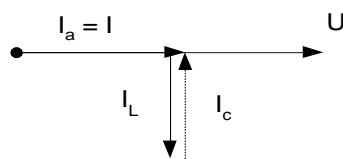
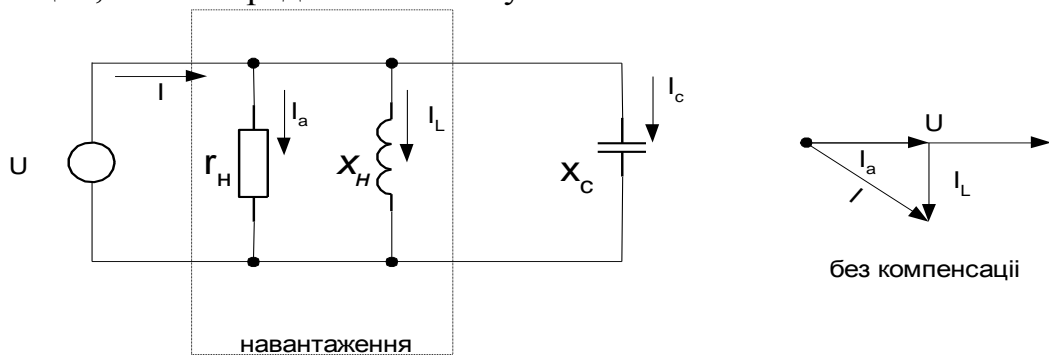
## 2) Регулювання напруги (U) шляхом змінення потоків передаваної реактивної потужності (Qs) мережі.

Для зменшення передаваної  $Q$  здійснюють її компенсацію за рахунок підключення ємності паралельно індуктивному навантаженню. Таке

включення ємності називається поперечною компенсацією. В якості компенсуючих пристроїв використовують БСК (в основному).



Схему заміщення мережі і векторну діаграму, що пояснює поперечну компенсацію, можна представити наступним чином.



При включенні БСК за допомогою  $Q_k$  результуюча повна потужність в мережі:

$$Q = j(Q_2 - Q_k)$$

При установці компенсуючих пристроїв продольна складова падіння напруги буде рівна

$$\Delta U = \frac{P_2 r_{\text{л}} + (Q_2 - Q_k) x_L}{U_{\text{ном}}} = \frac{P_2 r_{\text{л}} + Q_2 x_L}{U_{\text{ном}}} - \frac{Q_k x_L}{U_{\text{ном}}}$$

Ця складова є втратою  $\Delta U$  в мережі до компенсації. Друга складова – як добавка напруги  $\Delta U_{\text{рег}}$

$$\Delta U_{рег} = \frac{Q_K x_L}{U_{ном}}, Q_K = \frac{\Delta U_{рег} U_{ном}}{x_L}$$

Потужність БСК  $Q_K$  визначається номінальною напругою мережі ( $U_{ном}$ ) і її індуктивним опором  $X_L$ .

Такий спосіб регулювання також, як правило, дає можливість дискретного регулювання і регулювання тільки в одну сторону.

При виборі засобів регулювання мережі керуються наступним:

- основним, більш важливим і ефективним засобом, є трансформатори з РПН,
- інші способи носять допоміжний характер.

#### 4 Питання для самоконтролю

1. Заходу щодо зниження втрат енергії в електричних мережах.
2. Завдання розрахунку електричних мереж.
3. Векторна діаграма лінії електропередачі.
4. Залежності між напругами й потужностями початку й кінця елемента електричної мережі.
5. Розрахунок режиму лінії електропередачі.