

**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 № 7 - Характеристики експлуатаційних властивостей елементів
електричних систем**

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 лекцій:

1. Загальні положення.
2. Схеми заміщення ЛЕП.
3. Параметри схем заміщення ЛЕП.
4. Схеми заміщення Т і АТ.
5. Параметри схем заміщення трансформаторів.
6. Схеми заміщення трьохобмоткових трансформаторів.
7. Схеми заміщення двохобмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою.
8. 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.

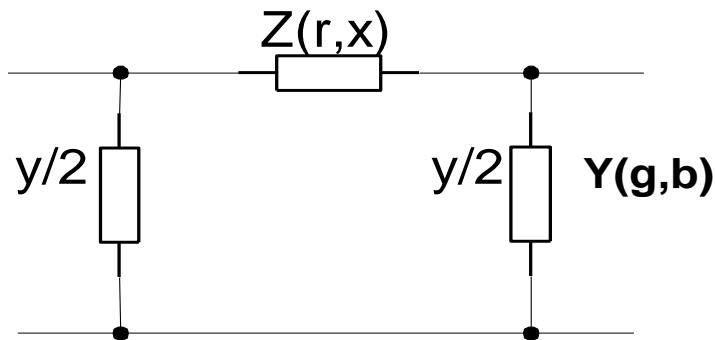
Інформаційні ресурси в Інтернеті

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

1 Схеми заміщення ЛЕП

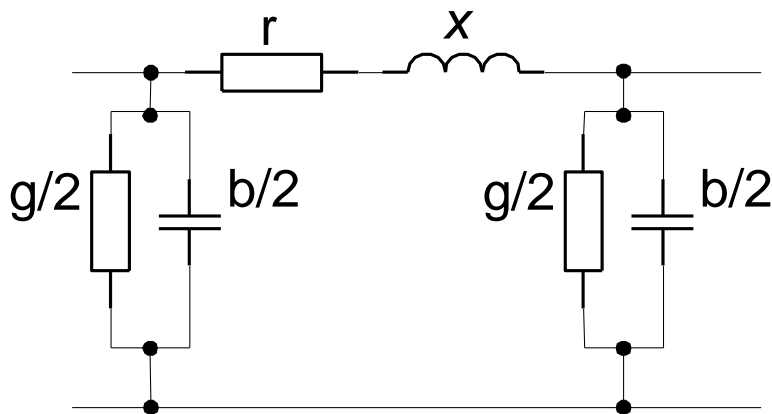
Необхідність обліку тих чи інших параметрів ЛЕП в схемі заміщення залежить від рівня напруги, конструктивного виконання, а також вимоги до точності розрахунку.

В загальному випадку схема заміщення ЛЕП містить повздовжні та поперечні параметри.



Розглянемо різноманітні схеми заміщення ЛЕП :

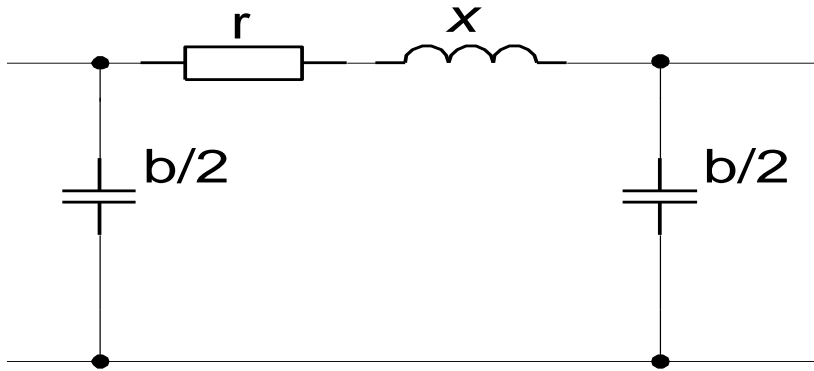
ПЛ з напругою $U_H \geq 330$ кВ та довжиною $L_{ПЛ} = 330 \div 400$ км, та КЛ з напругою $U_H \geq 35$ кВ представлені звичайною симетричною П-образною схемою заміщення (повна схема заміщення):



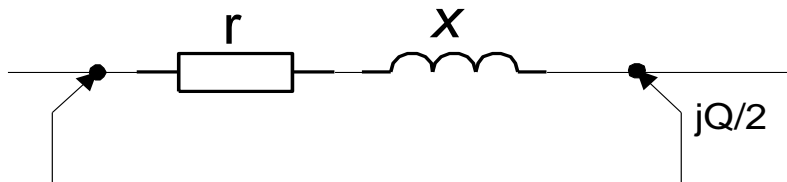
Зі зменшенням класу напруги ліній зневажають деякими параметрами:

- для ПЛ: $U_H = 110 \div 220$ кВ (втрати потужності на корону зневажають),
- для КЛ: $U_H < 35$ кВ (зневажають діелектричними втратами $P = U^2 \omega \text{ctg} \delta$).

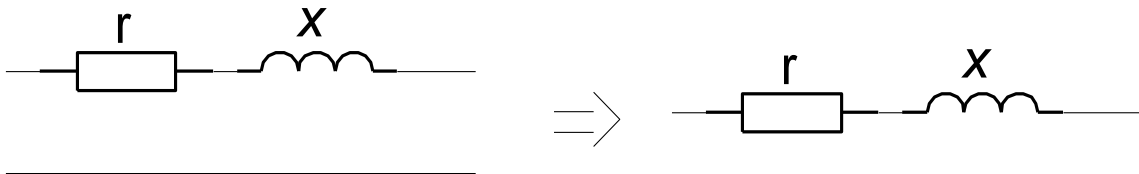
Схема заміщення спрощується:



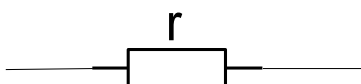
- для більшості розрахунків режимів в мережах з $U_n=110-220\text{kV}$ ЛЕП представляється більш простою схемою заміщення. В ній замість ємнісної провідності ліній враховується зарядна реактивна потужність, що генерується ємністю лінії та направлена на неї.



- для ПЛ з $U_n=35\text{kV}$ або $< 35\text{kV}$ не враховують поперечну гілку (місцеві мережі)



- для КЛ з $U_n=10\text{kV}$ або $< 10\text{kV}$ (враховується тільки активний опір повздовжньої гілки)



2 Параметри схем заміщення ЛЕП

При розрахунку складових схем заміщення ЛЕП використовують питомі (погонні) параметри: опори та провідності .

1. Активний опір.

Омічний опір (при постійному струмі)

$$R = \rho \frac{l}{F} \quad ; \quad R = \frac{l}{\gamma F} \quad , \quad \text{де } F - \text{переріз.}$$

Активний опір при змінному струмі в порівнянні з R:

$r > R$ (із-за поверхневого ефекту)

при $f = 50 \text{ Гц}$ в елементах, які не містять сталі (сердечника)
різниця між R і r не більше 1% тому $r \approx R$.

Питомий активний опір

$$r = r_0 \cdot l \quad ,$$

де l – довжина;

r_0 , Ом/км

В довіднику визначення опору дають при $\theta = 20^\circ \text{C}$.

Як правило, поправочний коефіцієнт при розрахунку не вводиться.

2. Індуктивний опір

Погонний індуктивний опір фаз ЛЕП залежить від взаємного розташування і потоку щеплення дротів.

В загальному випадку індуктивний опір ліній визначається:

$$X_L = X_0 \cdot l$$

- значення X_0 ПВ з одиночними проводами визначається залежністю від двох величин:

$X_0 = f(R_n, D_{cp})$, де R_n – зовнішній радіус дроту,

D_{cp} – середнє геометричне розташування між дротами

Для одноланцюгової трьохфазної лінії:

$$D_{cp} = \sqrt[3]{D_{12} \cdot D_{23} \cdot D_{31}} \quad , \quad \text{де}$$

D_{12}, D_{23}, D_{31} , – відстань між сусідніми дротами

В залежності від розташування дротів на опорах значення D_{cp} – наступне:

а) розташування дротів у вершинах рівностороннього трикутника

$$D = D_{12} = D_{23} = D_{31} = D_{cp}$$

б) якщо дроти розташовані горизонтально

$$D_{cp} = \sqrt[3]{2} D \approx 1,26 D_{12(23)} \quad D_{12} = D_{23}$$

Із ТОЕ погонний індуктивний опір ЛЕП :

$$X_0 = 2\pi f L = 0,144 \lg \left(\frac{D_{cp}}{R_n} \right) + 0,016 \mu \quad ,$$

де: μ – магнітна проникність матеріалу дроту,
 L – індуктивність.

$$0,144lg \frac{D_{cp}}{R_n} = X'_0,$$

$$0,016\mu = X''_0,$$

де: X'_0 і X''_0 відповідно зовнішні і внутрішні індуктивні опір лінії.

Для дротів із кольорових металів:

$$X'_0 \gg X''_0, \quad X_0 \approx X'_0$$

У кабелях D_{cp} дуже маленькі, тому індуктивною складовою зневажають.

Для зменшення затрат напруги та потужності в мережах виникає задача зменшити X_0 .

Аналіз виразу (1) показує, що значення X_0 можна знизити шляхом:

- а) зменшення D_{cp} ,
- б) збільшити R_n .

Зменшення D_{cp} збільшує небезпеку пробою, збільшення R_n збільшує затрати металу. Але, збільшення R_n можливо шляхом розщеплення дроту фази на декілька паралельних (\parallel) дротів. Розщеплення дротів виконується на ПЛІ з $U_n \geq 330$ кВ.

3. Активна провідність ЛЕП(g)

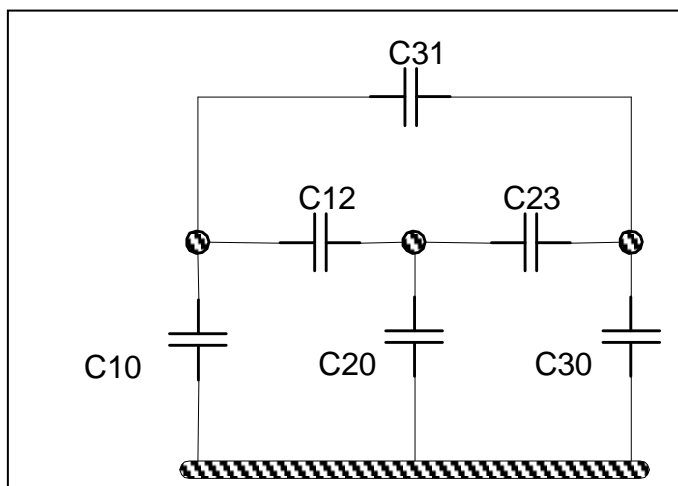
Ця складова обумовлена двома видами втрат активної потужності :

1. – від струму витoku (із-за недосконалого ізолятора)
2. – від втрат на корону
 - *розряд – приватний випадок пробою (тільки в газах)
 - *пробої можуть бути частковими і повними.

Поле між двома проводами неоднорідне, тобто у поверхні проводів E вище.
 $(E \neq const)$

4. Ємнісна провідність ЛЕП.

– обумовлена наявністю ємності зв'язків між проводами різних фаз, а також між проводами і землею.



$$b = \omega C = 2\pi f C = \epsilon_0 \cdot l$$

$$C = \frac{0,0245}{lg \frac{D_{cp}}{R_n}}, [\Phi]$$

$$C_0 = \frac{\epsilon_0}{\omega},$$

$$\epsilon_0 = \omega C_0 = \frac{7,58}{\lg \frac{D_{cp}}{R_n}} \cdot 10^{-6}, [\text{См/км}]$$

Наявність ємнісної провідності визиває в лінії протікання ємнісного струму і ємнісної потужності, яка називається відповідно зарядним струмом і зарядною потужністю ліній.

$$I_c = \omega C U_\phi = \frac{U_\phi}{X_C} = \epsilon_0 l U_\phi = \epsilon U_\phi - \text{зарядний струм};$$

$$Q_C = \sqrt{3} I_C U_l = \sqrt{3} U_l \epsilon U_\phi = U_l^2 \epsilon - \text{зарядна потужність}.$$

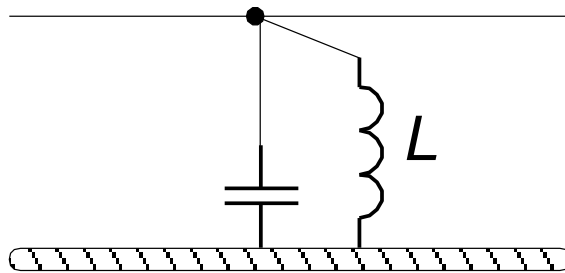
Із цього виразу виходить, що значення Q_C суттєво (в квадраті) залежить від напруги мережі.

Для ПЛ ємнісна провідність і зарядна потужність враховується при $U_n \geq 110 \text{ кВ}$.

В районних мережах ($U_n \geq 110 \text{ кВ}$) завжди враховується Q_C , а якщо мережа місцева то не враховується.

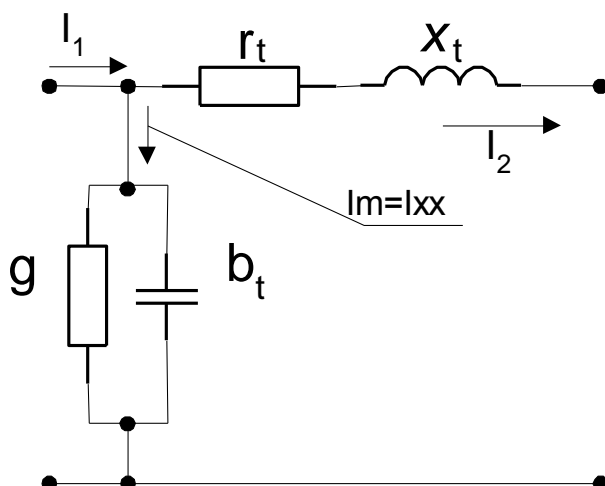
В ПЛ надвисоких напруг значної протяжності ліній (сотні км.) утворюють таке значення Q_C , що її треба компенсувати, бо в іншому випадку можливі високі рівні перенапруги. З цією метою для компенсації використовують шунтуючі реактори.

У КЛ відстань між фазними проводами і заземлюючими оболонками мала, а також в них велика величина E – це значить, що $C_{вл} \gg C_{кл} \Rightarrow V_{кл} \gg V_{вл}$.



3 Схеми заміщення Т і АТ (трансформаторів і автотрансформаторів)

Одна фаза двообмоткового трансформатора з достатнім ступенем точності представлена Г – образною схемою заміщення:



$$z_T = r_T + jx_T$$

$$y_T = g_T - jb_T$$

$$r_T = r_{T1} + r_{T2}$$

$$x_T = x_{T1} + x_{T2}$$

Активна провідність g_T
обумовлена втратами

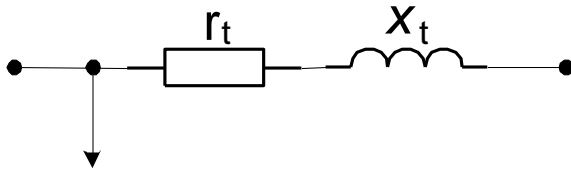
активної потужності в магнітопроводі (на вихрові потоки, які значно більше витрат на гістерезис).

$$P_{вихр} = f^2 B^2 \dots$$

$$P_{гист} = f B^2 \dots$$

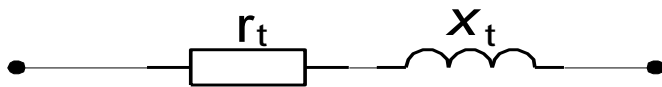
Реактивна провідність Вт обумовлена взаємною індуктивністю між обмотками трансформатора.

У трансформатора з напругою до 220 кВ схема заміщення може бути представлена продольною гілкою, а замість поперечної гілки використовують навантаження, рівне сумарним втратам потужності хх.



$$\Delta S_{xx} = \Delta P_{xx} + j\Delta Q_{xx}.$$

При розрахунках місцевих мереж ($U_H < 110$ кВ) в схемах заміщення трансформатора враховують тільки продольну гілку.



4 Параметри схем заміщення трансформаторів.

Опір та провідність визначають за паспортними даними. Для двообмоткових трансформаторів в каталогах вказуються:

$$S_H, U_{BH}, U_{HH}, \Delta P_{xx}, \Delta P_{к.з.}, U_K, I_{xx}.$$

Активний опір r_T визначається з даних дослід к.з.:

$$\Delta P_K = 3 \cdot I_H^2 \cdot r_T, \quad r_T = \frac{\Delta P_K}{3 I_H^2},$$

Але, так як в паспорті не вказується I_H , то його можна визначити за іншими заданими параметрами:

$$S_H = \sqrt{3} I_H U_H, \quad I_H = \frac{S_H}{\sqrt{3} U_H}, \quad S_H = S_{BH} = S_H,$$

беремо U_H первинної обмотки:

$$I_H = \frac{S}{\sqrt{3}U_{BH}}, \text{ тоді}$$

$$r_T = \frac{\Delta P_K 3U_{BH}^2}{3S_H^2} = \frac{\Delta P_K U_{BH}^2}{S_H^2},$$

$$r_T = \frac{\Delta P_K U_{BH}^2}{S_H^2}$$

Індуктивний опір X_T визначається відносним падінням напруги в індуктивному опорі однієї фази. (В % відносно U_ϕ)

$$U_P = \frac{I_H X_T}{U_\phi} \cdot 100, (\%); \quad X_T = \frac{U_P U_\phi}{100 I_H},$$

підставимо значення I_H , тоді:

$$X_T = \frac{U_P U_\phi \sqrt{3} U_H}{100 S_H} = \frac{U_P U_H^2}{100 S_H},$$

Так як напруга U_K (в %, U_H) $= \sqrt{U_P^2 + U_A^2}$, в трансформаторах $x_T \gg r_T \Rightarrow U_a \ll U_P$, тоді $U_P \approx U_K$, а

$$X_T = \frac{U_K \% \cdot U_H^2}{100 S_H}$$

Активна провідність g_T визначається:

$$\Delta P_{XX} = U_H^2 g_T, \quad g_T = \frac{\Delta P_{XX}}{U_H^2}$$

Реактивна провідність b_T визначається:

Так як $b_T \gg g_T$, то можливо прийняти, що весь струм xx проходить через B_T , тоді намагнічується первинна обмотка трансформатора (вторинна розімкнена) і втрати реактивної потужності складають:

$$\Delta Q = \frac{I_{XX}(\%) \cdot S_H}{100}, \%$$

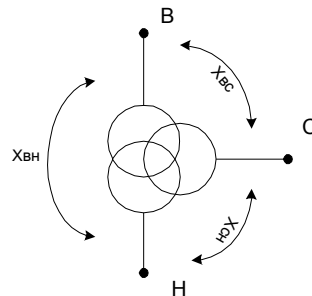
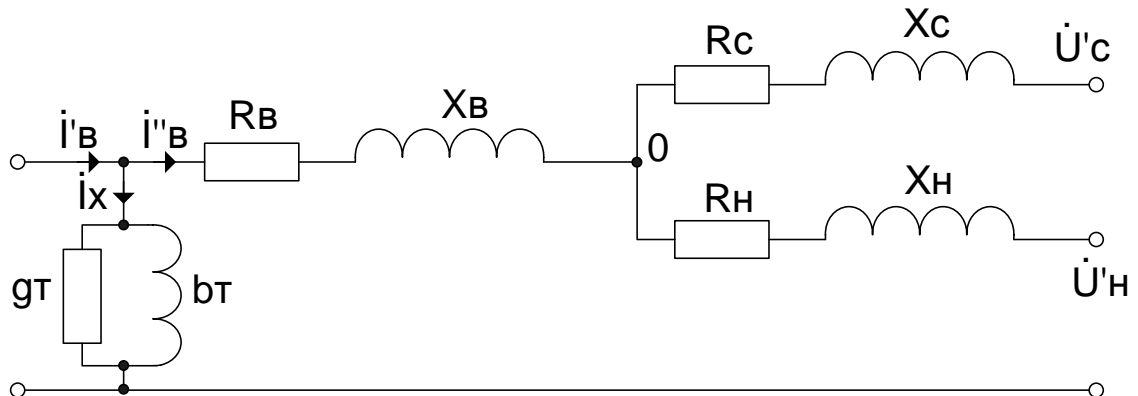
$$\Delta Q = U_H^2 \cdot b_T.$$

Прирівнюємо праві частини цих виразів, знаходимо, що:

$$\epsilon_T = \frac{I_{XX}(\%) S_H}{100 U_H^2}$$

5 Схеми заміщення трьохобмоткових трансформаторів.

Схема заміщення цього трансформатора представляє собою трьохпроменеву зірку:



- поперечна гілка цих трансформаторів має теж значення, що і в двохобмоткового трансформатора.

Активний опір трансформатора при рівних потужностях обмоток - опір променів еквівалентної схеми, приведених до сторони ВН, приблизно однаковий.

$$r_T = r_{TV} \approx r'_{TC} \approx r'_{TH}$$

Для трьохобмоткових трансформаторів в каталогах задається значення ΔP_k для випадків максимальних втрат.

Таким гіршим випадком являється протікання повного (номінального) струму по двом обмоткам при розімкненій третій. Наприклад, по обмотці ВН і СН при розімкненій НН. В цьому випадку продольна гілка схеми заміщення перетворюються в послідовне з'єднання двох обмоток, і тоді при розрахунках

r_T можна приймати: $r_{TB} + r_{TC} + 0 = 2r_T$, тому, враховуючи вираз для r_T , отриманий для двообмоткового трансформатора можна записати:

$$r_T = \frac{\Delta P_K \cdot U_H^2}{2S_H^2}.$$

Індуктивний опір X_T - визначається за виразом, аналогічним як для двообмоткового трансформатора, але окремо для кожної обмотки.

$$X_{TB} = \frac{U_{KB} \% \cdot U_H^2}{100S_H}, \quad X_{TC} = \frac{U_{KC} \% \cdot U_H^2}{100S_H}, \quad X_{TH} = \frac{U_{KH} \% \cdot U_H^2}{100S_H}$$

Але в паспортних даних для трьохобмоткових трансформаторів значення $U_K(\%)$ вказується не для кожної з обмоток, а для кожної пари обмоток, тому вихідні значення U_K знаходяться в результаті трьох рівнянь з трьома невідомими.

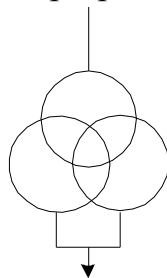
Кінцеві значення вихідних U_K :

$$\begin{aligned} U_{KB} &= 0,5(U_{KBC} + U_{KBH} - U_{KCH}) \\ U_{KC} &= 0,5(U_{KCH} + U_{KBC} - U_{KBH}) \\ U_{KH} &= 0,5(U_{KCH} + U_{KBH} - U_{KBC}) \end{aligned}$$

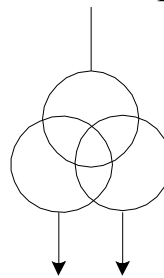
Якщо в результаті розрахунків виявиться, що одне із значень буде від'ємним числом, то воно приймається рівним нулю. Параметри поперечної гілки визначаються як і у двообмоткового трансформатора.

6 Схеми заміщення двообмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою.

Трансформатор з розщепленою обмоткою - такий трансформатор, який може працювати як з паралельним з'єднанням гілок, так і з включенням кожної гілки на своє навантаження. При \parallel з'єднанні обмоток НН трансформатор з розщепленою обмоткою буде працювати як двообмотковий трансформатор, а при роздільній праці гілок – як трьохобмотковий.



Паралельна робота



роздільна робота

Тому схеми заміщення трансформаторів з розщепленою обмоткою аналогічні схемам заміщення дво- і трьохобмоткових трансформаторів.

Однією із основних характеристик трансформаторів з розщепленою обмоткою являється коефіцієнт розщеплення K_p . Він характеризує електромагнітний зв'язок між вторинними обмотками.

Особливістю конструкції являється те, що гілки вторинних обмоток НН розміщені симетрично по відношенню до обмотки ВН, одна на іншій на магнітопроводі трансформатора. При такому розташуванні обмоток магнітний зв'язок між ними практично відсутній, значення $K_p \approx 3,5$.

Тому при визначенні параметрів схем заміщення трансформаторів з розщепленою обмоткою треба враховувати особливості:

1. В каталожних даних наведенні данні, коли їх обмотки працюють паралельно.

2. При роботі трансформатора на роздільне навантаження параметри визначаються як для трьохобмоткового, але з урахуванням своїх особливостей.

Вирази для розрахунку опору променів зірки на схемі заміщення:

1. Індуктивний опір:

$$X_{H1} = X_{H2} = X_{B-(H1\|H2)} \cdot \frac{K_p}{2} = 1,75 \cdot X_{кат}$$

$$X_B = X_{B-(H1\|H2)} \cdot \left(1 - \frac{K_p}{4}\right) = 0,125 \cdot X_{кат}$$

2. Активний опір:

Так як потужність кожної обмотки НН дорівнює $0,5S_{вн}$, тобто $0,5S_H$, то

$$r_{H1} = r_{H2} = 2r_B$$

Значення r_B визначається так як і для трьохобмоткового трансформатора, але при цьому:

$$r_B = \frac{\Delta P_{K(B-H)} \cdot U_H^2}{2S_H^2}$$

$$r_{H1} = r_{H2} = \frac{\Delta P_{K(B-H)} \cdot U_H^2}{S_H^2}$$

Втрати потужності в режимі к.з.:

$$\Delta P_{KH1} = \Delta P_{KH2} = 0,5 \Delta P_{K(B-H)},$$

при цьому значення параметрів в обмотках ВН і НН, наведені в каталогах, віднесені до повної номінальної потужності трансформатора.

3. Провідності трансформаторів з розщепленою обмоткою визначаються також як для двообмоткового трансформатора.

Трансформатори з розщепленою обмоткою мають підвищене значення індуктивного опору на стороні НН. За рахунок цього потужність к.з. на шинах НН знижується майже в 2 рази, що дозволяє в багатьох випадках відмовитись від струмообмежувальних реакторів.

7 Питання для самоконтролю

1. Втрати потужності та електроенергії в електричних мережах.
2. Параметри схеми заміщення ліній електропередачі.
3. Втрати потужності в лініях.
4. Схеми заміщення двохобмоточних трансформаторів.
5. Втрати потужності в двохобмоточних трансформаторах.
6. Схеми заміщення трьохобмоточних трансформаторів і автотрансформаторів.
7. Втрати потужності в трьохобмоточних трансформаторах.