

Лекція №6
(частина 2)

ТРАНСФОРМАТОРИ

План лекції:

4. Дослідне визначення параметрів схеми заміщення трансформаторів.
5. Спрощена векторна діаграма трансформатора.
6. Зовнішня характеристика трансформатора.
7. Втрати та ККД трансформатора.

4 Дослідне визначення параметрів схеми заміщення трансформаторів

Отримана електрична схема заміщення (див. рисунок 6.10, б) дозволяє з достатньою точністю досліджувати властивості трансформаторів у будь-якому режимі. Використання цієї схеми при визначенні характеристик має найбільше практичне значення для трансформаторів потужністю 63 кВА і вище, тому що дослідження таких трансформаторів методом безпосереднього навантаження пов'язане з деякими технічними труднощами: непродуктивною витратою електроенергії, необхідністю в громіздкому і дорогому навантажувальному обладнанні.

Визначення параметрів схеми заміщення $Z_1 = r_1 + jx_1$, $Z_0 = r_0 + jx_0$, $Z_2' = r_2' + jx_2'$ можливо або розрахунковим (у процесі розрахунку трансформатора), або дослідним шляхом. Нижче викладається порядок визначення параметрів схеми заміщення трансформатора дослідним шляхом, сутність якого складається в проведенні досліду неробочого (холостого) ходу (н.х.) і досліду короткого замикання (к.з).

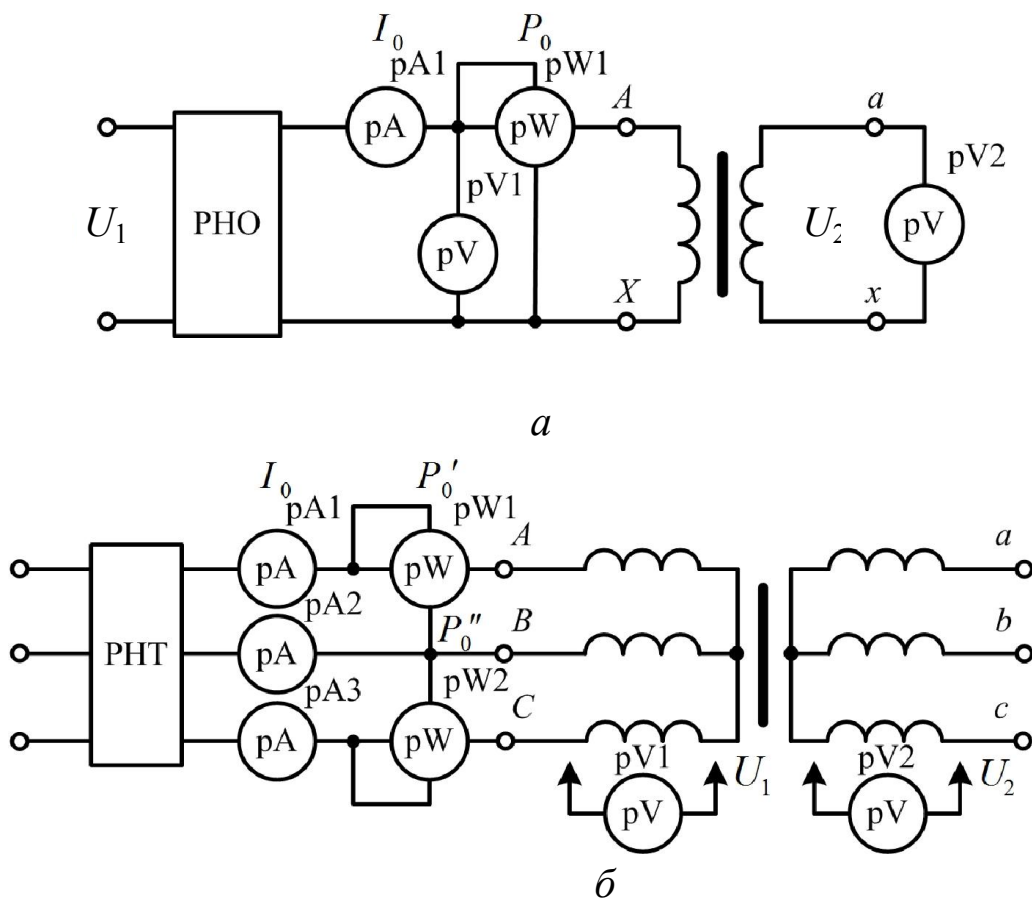
Дослід неробочого ходу. Неробочим ходом називають режим роботи трансформатора при розімкнутій вторинній обмотці ($Z_n = \infty$, $I_2 = 0$). У цьому випадку рівняння напруг і струмів (6.40) приймають наступний вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_0 x_1 + \dot{I}_0 r_1; \\ \dot{U}'_{20} &= \dot{E}'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0. \end{aligned} \right\} \quad (6.44)$$

Оскільки корисна потужність при роботі трансформатора без навантаження дорівнює нулю, то потужність на вході трансформато-

ра в режимі н.х. P_0 витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі $P_{\text{маг}}$, (втрати на перемагнічування магнітопроводу і вихрові струми) і електричні втрати в міді $P_e = I_0 r_1$, (втрати на нагрівання обмотки при проходженні по ній струму) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 , що звичайно не перевищує 2-10% від $I_{1\text{ном}}$, електричними втратами $P_e = I_0 r_1$ можна знехтувати і вважати, що вся потужність н.х. являє собою потужність магнітних втрат у сталі магнітопроводу. Тому магнітні втрати в трансформаторі (втрати в залізі на вихрові струми та перемагнічування (гістерезис)) прийнято називати **втратами неробочого ходу** ($P_{\text{маг}} = P_{\text{н.х.}}$).

Дослід н.х. однофазного трансформатора проводять за схемою зображеною на рисунк 6.12, а. Комплект електровимірювальних приладів, включених у схему, дає можливість безпосереднього виміру напруги U_1 , підведеної до первинної обмотки; напруги U_2 на виводах вторинної обмотки; потужності н.х. P_0 і струму н.х. I_0 .



а – однофазний трансформатор; б – трифазний трансформатор;
Рисунок 6.12 – Схеми дослідів н.х. трансформаторів

Напруга до первинної обмотки, трансформатора зазвичай підводять через однофазний регулятор напруги РНО, що дозволяє плавно підвищувати напругу від 0 до $1,15U_{1ном}$. При цьому через приблизно однакові інтервали струму н.х. знімають показання приладів, а потім будують характеристики н.х.: залежності струму н.х. i_0 , потужності н.х. P_0 і коефіцієнта потужності н.х. $\cos \varphi_0$ від первинної напруги U_1 (рисунок 6.13).

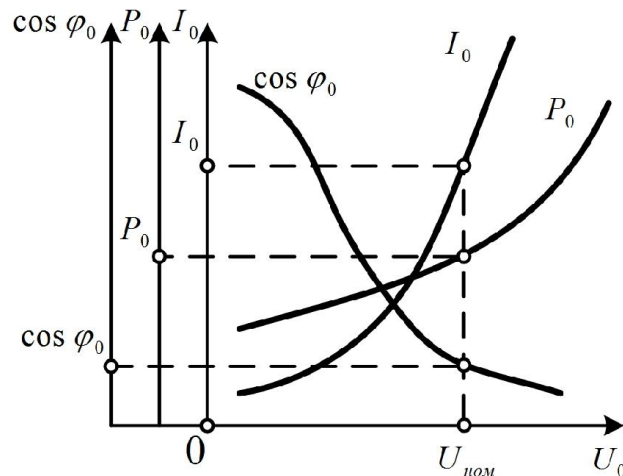


Рисунок 6.13 – Характеристики н.х. трансформатора

Криволінійність цих характеристик обумовлена станом магнітного насичення магнітопроводу, що настає при деякому значенні напруги U_1 .

У випадку досліду неробочого ходу із трифазним трансформатором напругу U_1 встановлюють за допомогою трифазного регулятора напруги РНТ (рисунок 6.12, б). Характеристики н.х. будують по середнім фазним значенням струму і напруги для трьох фаз

$$I_0 = (I_{0A} + I_{0B} + I_{0C}) / 3; \quad (6.45)$$

$$U_1 = (U_{1A} + U_{1B} + U_{1C}) / 3. \quad (6.46)$$

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0}; \quad (6.47)$$

Коефіцієнт потужності для трифазного трансформатора

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_1 I_0} = \frac{(P_0' + P_0'')}{3 \cdot U_1 I_0}, \quad (6.48)$$

де P_0' і P_0'' – показання однофазних ватметрів;
 U_1 і I_0 – фазні значення напруги і струму.

За даними досліду н.х. можна визначити:

– коефіцієнт трансформації трансформатора

$$k = U_1/U_2 = W_1/W_2;$$

– струм н.х. при $U_{1ном}$ (у відсотках від номінального первинного струму)

$$i_0 = (I_{0ном} / I_{1ном}) \cdot 100 \quad (6.49)$$

– втрати н.х. P_0 .

У трифазному трансформаторі струми н.х. у фазах неоднакові і утворюють несиметричну систему, тому потужність P_0 варто вимірювати двома ватметрами за схемою, зображеною на рисунку 6.12, б. Падіння напруги в первинній гілці схеми заміщення в режимі н.х. $I_0(r_1 + jx_1)$ (рисунок 6.14) становить досить незначну величину, тому, не допускаючи помітної помилки, можна користуватися наступними виразами для розрахунку параметрів гілки намагнічування:

$$z_0 = U_1 / I_0;$$

$$r_0 = z_0 \cos \varphi_0;$$

$$x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}.$$

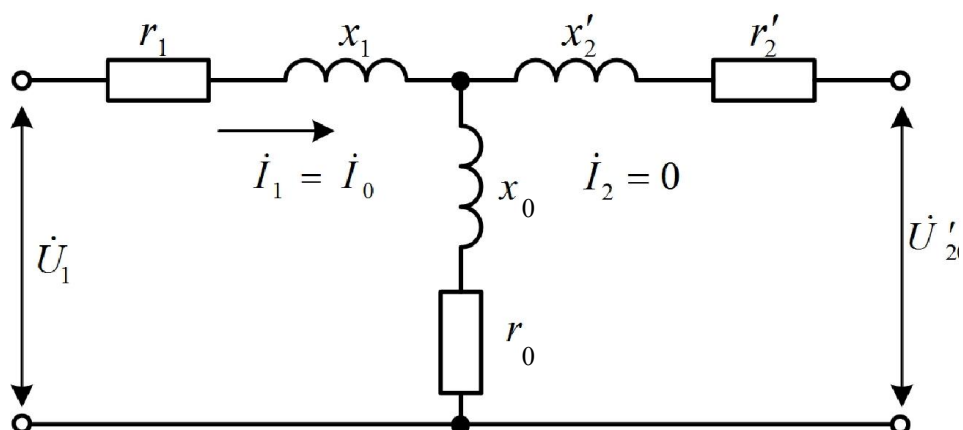
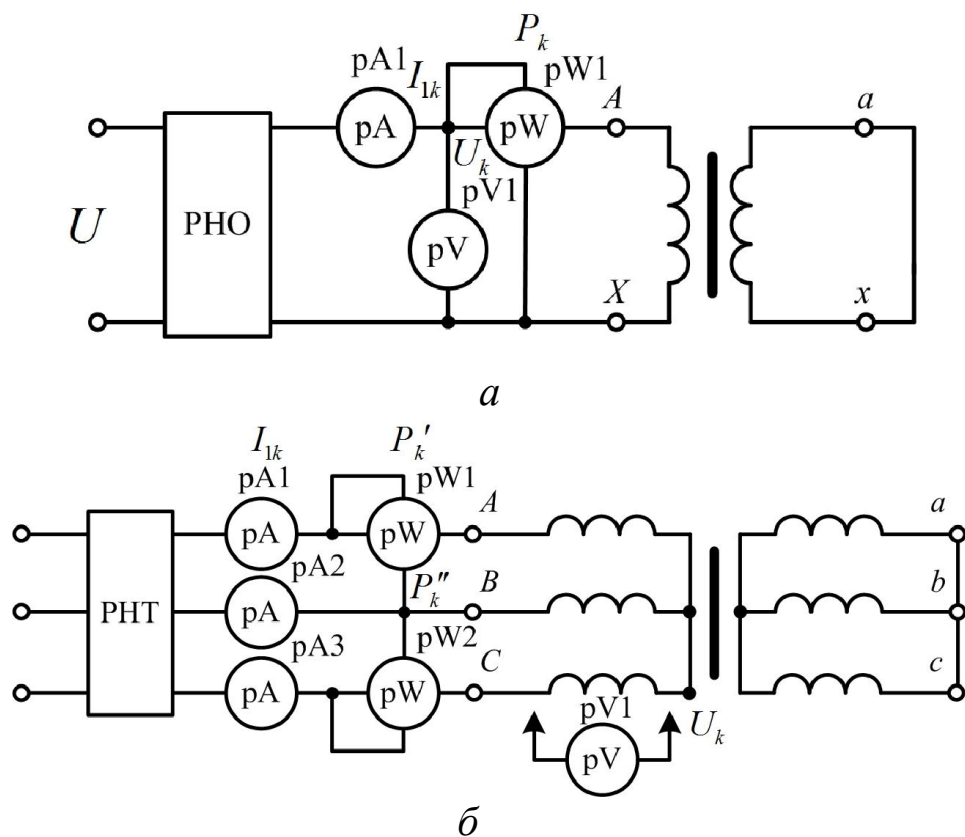


Рисунок 6.14 – Схема заміщення трансформатора в режимі н.х.

Зазвичай в силових трансформаторах загального призначення середньої і великої потужності при номінальній первинній напрузі струм н.х. $I_0 = 1,0 \div 6,0\%$.

Якщо ж фактичні значення струму н.х. $I_{0ном}$ і потужності н.х. $P_{0ном}$, що відповідають номінальному значенню первинної напруги $U_{1ном}$, помітно перевищують величини цих параметрів, зазначені в каталозі на даний тип трансформатора, то це свідчить про несправність цього трансформатора: наявність короткозамкнених витків в обмотках або замиканні частини пластин магнітопроводу.

Дослід короткого замикання. Коротке замикання трансформатора – це такий режим, коли вторинна обмотка замкнута накоротко ($Z_n = 0$), при цьому вторинна напруга $U_2 = 0$ (рисунок 6.15). В умовах експлуатації, коли до трансформатора підведена номінальна напруга $U_{1ном}$, коротке замикання є аварійним режимом і являє собою велику небезпеку для трансформатора (в декілька разів підвищується струм, що протікає в обмотках трансформатора).



а – однофазний трансформатор; *б* – трифазний трансформатор;
Рисунок 6.15 – Схеми дослід к.з. трансформаторів

При досліді к.з. обмотку нижчої напруги однофазного трансформатора замикають накоротко (рисунок 6.15, *а*), а до обмотки вищої напруги підводять напругу, поступово підвищуючи її регулятором напруги РНО від 0 до деякого значення $U_{кном}$, при якому струми к.з. в обмотках

тках трансформатора стають рівними номінальним струмам у первинній ($I_{1к} = I_{1ном}$) і вторинній ($I_{2к} = I_{2ном}$) обмотках. При цьому знімають показання приладів і будують характеристики к.з., що представляють собою залежності струму к.з. $I_{к}$, потужності к.з. $P_{к}$ і коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{к}$ від напруги к.з. $U_{к}$ (рисунок 6.16).

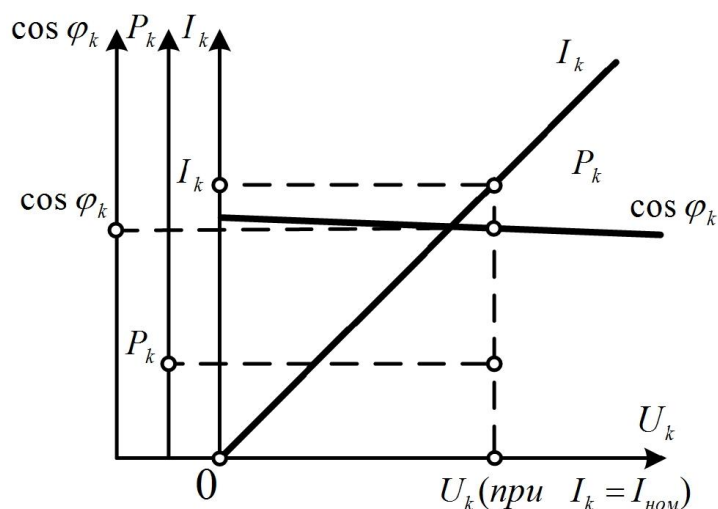


Рисунок 6.16 – Характеристики к.з. трансформатора

У випадку трифазного трансформатора дослід проводять за схемою, показаної на рисунок 6.15, б, а значення напруги к.з. і струму к.з. визначають як середні для трьох фаз:

$$U_{к} = (U_{кА} + U_{кВ} + U_{кС}) / 3; \quad (6.50)$$

$$I_{1к} = (I_{кА} + I_{кВ} + I_{кС}) / 3. \quad (6.51)$$

Коефіцієнт потужності для однофазного трансформатора при досліді к.з.

$$\cos \varphi_{к} = \frac{P_{к}}{U_{1} I_{к}}; \quad (6.52)$$

Коефіцієнт потужності для трифазного трансформатора

$$\cos \varphi_{к} = \frac{P_{к}}{3 \cdot U_{1} I_{к}} = \frac{(P_{к}^I + P_{к}^{II})}{3 \cdot U_{1} I_{к}}, \quad (6.53)$$

При цьому активну потужність трифазного трансформатора вимірюють методом двох ватметрів. Тоді потужність к.з.

$$P_{к} = P_{к}^I + P_{к}^{II}. \quad (6.54)$$

У виразі (6.54) P'_k і P''_k – показання однофазних ватметрів, Вт.

Напруга, при якій струми в обмотках трансформатора при досліді дорівнюють номінальним значенням, називають **номінальною напругою короткого замикання** і зазвичай виражають у % від номінальної

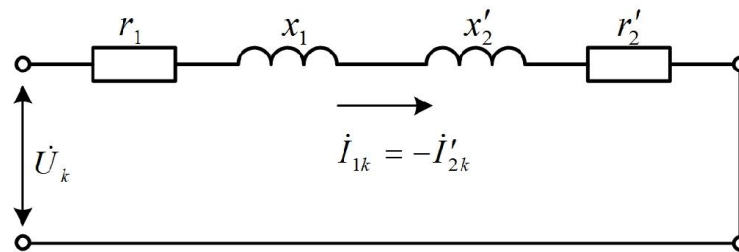
$$u_k \% = (U_k / U_{1ном})100. \quad (6.55)$$

Для силових трансформаторів $u_k \% = 5 - 10\%$ від $U_{1ном}$.

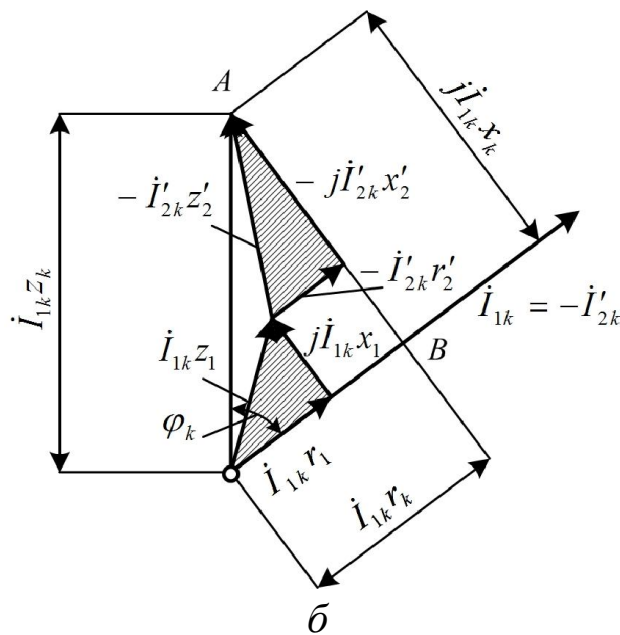
Як випливає з (6.55), магнітний потік у магнітопроводі трансформатора пропорційний первинній напрузі U_1 . Оскільки ця напруга при досліді к.з. становить не більше 10% від $U_{1ном}$, то таке ж невелике значення має і магнітний потік. Для створення такого магнітного потоку потрібно настільки малий струм намагнічування, що значенням його можна зневажити. У цьому випадку рівняння струмів (6.40) приймає вид

$$\dot{I}_{1к} = -\dot{I}'_{2к}, \quad (6.56)$$

а схема заміщення трансформаторів для досліду к.з. не містить гілки намагнічування (рисунк 6.17, а).



а



б

Рисунок 6.17 – Схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора в режимі к.з.

Для цієї схеми заміщення можна записати рівняння напруг

$$\dot{U}_\kappa = \dot{I}_{1\kappa}(r_1 + r'_2) + j\dot{I}_{1\kappa}(x_1 + x'_2), \quad (6.57)$$

або

$$\dot{U}_\kappa = \dot{I}_{1\kappa}r_\kappa + j\dot{I}_{1\kappa}x_\kappa = \dot{I}_{1\kappa}Z_\kappa. \quad (6.58)$$

Повний опір трансформатора при досліді к.з.

$$Z_\kappa = r_\kappa + jx_\kappa. \quad (6.59)$$

де r_κ і x_κ – активна і індуктивна складова опору к.з. Z_κ .

Скориставшись рівняннями струмів (6.56) і напруг (6.57), для досліді к.з. побудуємо векторну діаграму трансформатора (рисунок 6.17, б). Побудова цієї діаграми починають із вектора напруги к.з. $U_\kappa = I_{1\kappa}Z_\kappa$. Потім під кутом φ до вектора U_κ проводять вектор струму к.з. $I_{1\kappa} = -I_{2\kappa}$. Побудувавши вектори падінь напруг в первинній обмотці $I_{1\kappa}r_1$ і $jI_{1\kappa}x_1$ і вектори падіння напруги у вторинній обмотці $-I'_{2\kappa}r'_2$ і $-jI'_{2\kappa}x'_2$, одержують прямокутний трикутник АОВ, що отримав назву **трикутника короткого замикання**. Сторони цього трикутника будуть:

$$\overline{OB} = \dot{I}_{1\kappa}r_1 + \dot{I}'_{2\kappa}r'_2 = \dot{I}_{1\kappa}r_\kappa = \dot{U}_{\kappa.a};$$

$$\overline{BA} = \dot{I}_{1\kappa}jx_1 + j\dot{I}'_{2\kappa}x'_2 = \dot{I}_{1\kappa}jx_\kappa = \dot{U}_{\kappa.p};$$

$$\overline{OA} = \dot{I}_{1\kappa}Z_\kappa = \dot{U}_\kappa.$$

Тут

$$U_\kappa = \sqrt{U_{\kappa.a}^2 + U_{\kappa.p}^2}, \quad (6.60)$$

де $U_{\kappa.a}$, $U_{\kappa.p}$ – активна і реактивна складові напруги к.з., В.

Повний, активний і індуктивний опори схеми заміщення при досліді к.з.:

$$z_\kappa = U_\kappa / I_{1\kappa}; \quad (6.61)$$

$$r_\kappa = z_\kappa \cos \varphi_\kappa; \quad (6.62)$$

$$x_\kappa = \sqrt{z_\kappa^2 - r_\kappa^2}. \quad (6.63)$$

Отримані значення опорів r_k і z_k , потужності P_k , коефіцієнта потужності $\cos \varphi_k$ і напруги к.з. u_k варто привести до робочої температури обмоток $+75^\circ\text{C}$:

$$r_{k75} = r_k \left[1 + \alpha (75^\circ - \Theta_1) \right] \quad (6.64)$$

$$z_{k75} = \sqrt{r_{k75}^2 + x_k^2}; \quad (6.65)$$

$$\cos \varphi_{k75} = r_{k75} / z_{k75}; \quad (6.66)$$

$$u_{k75} = (I_{k75} z_{k75} / U_{1ном}) 100. \quad (6.67)$$

Тут r_k – активний опір к.з. при температурі Θ_1 ; $\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт для міді і алюмінію.

Оскільки при досліді к.з. основний потік Φ_{\max} становить усього лише кілька відсотків у порівнянні з його значенням при номінальній первинній напрузі, то магнітними втратами, що викликані цим потоком, можна знехтувати. Отже, можна вважати, що потужність P_k , споживана трансформатором під час проведення досліді к.з., іде повністю на покриття електричних втрат в обмотках трансформатора

$$P_k = I_{1k}^2 r_1 + I_{1k}^2 r'_2 = I_{1k}^2 r_k.$$

Потужність к.з. приводять до робочої температури обмоток $+75^\circ\text{C}$.

$$P_{k75} = 3 I_{1k}^2 r_{k75}. \quad (6.68)$$

5 Спрощена векторна діаграма трансформатора

Векторна діаграма навантаженого трансформатора (див. рисунок 6.11) наочно показує співвідношення між параметрами трансформатора. Через складність ця діаграма не може бути використана для практичних розрахунків. Для спрощення діаграми і надання їй практичного значення в силових трансформаторах, що працюють із навантаженням, близьким до номінального, зневажають струмом н.х. і вважають, що $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2$. Отримана в цьому випадку помилка цілком припустима, тому що струм I_0 у порівнянні зі струмами I_1 і I_2 невеликий. При зробленому вище допущенні схема заміщення трансформатора (рисунок 6.10, б) набуває спрощеного виду, так як не має гілки намагнічування і складається тільки з послідовних ділянок $r_k = r_1 + r'_2$ і $x_k = x_1 + x'_2$ (рисунок 6.18, а).

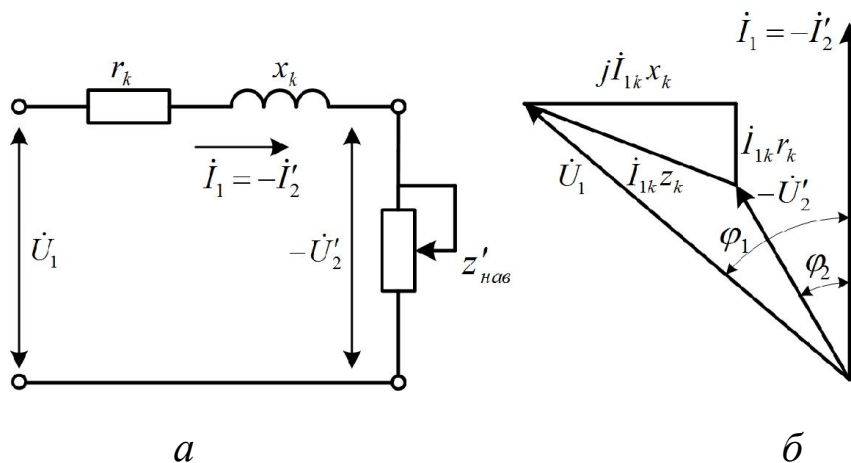


Рисунок 6.18 – Спрощена схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора

Відповідно до спрощеної схеми заміщення побудована і спрощена векторна діаграма (рисунок 6.18, б), у якій прямокутний трикутник АВС представляє собою трикутник к.з., сторони якого відповідно рівні

$$BC = I_1 r_k; \quad CA = I_1 Z_k; \quad AB = I_1 x_k.$$

Спрощену векторну діаграму трансформатора будують за заданим значенням напруги $U_{1ном}$, струму $I_{1ном}$, коефіцієнта потужності $\cos \varphi_{2ном}$ і параметрам трикутника к.з. U_k , $U_{ка}$ і $U_{кр}$. (рисунок 6.19).

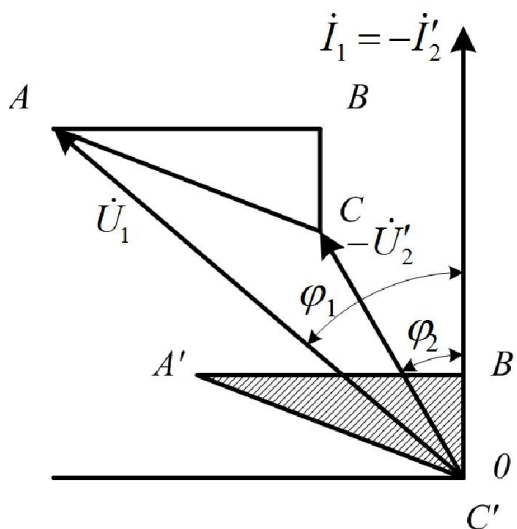


Рисунок 6.19 – Побудова спрощеної векторної діаграми

Порядок побудови спрощеної векторної діаграми наступний (рисунок 6.19). На осі ординат будують вектор струму $I_1 = -I'_2$, потім під кутом φ_2 будують вектор напруги $-U'_2$. Трикутник к.з. $A'B'C'$ будують таким чином, щоб точка C' співпала із точкою початку координат, а катет $C'B'$ – з віссю ординат. Потім цей трикутник переносить

сять, сполучаючи точку C з кінцем вектора $-(-\dot{U}'_2)$, залишаючи сторони паралельними вихідному трикутнику $A'B'C'$. Одержують трикутник ABC . Після цих побудов з початку осі координат (точка O) проводять вектор первинної (фазної) напруги \dot{U}_1 і визначають кут фазового зсуву φ_1 між первинним струмом \dot{I}_1 , і первинною напругою \dot{U}_1 .

6 Зовнішня характеристика трансформатора

При коливаннях навантаження трансформатора його вторинна напруга U'_2 змінюється. У цьому можна переконається, скориставшись спрощеною схемою заміщення трансформатора (див. рисунок 6.18), з якої видно, що $\dot{U}'_2 = \dot{U}_{1ном} - \dot{I}_1 Z_k$.

Зміна вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження від н.х. до номінальної є найважливішою характеристикою трансформатора і визначається виразом

$$\Delta U_{ном} = \frac{U_{1ном} - U'_2}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (6.69)$$

Для визначення $\Delta U_{ном}$ скористаємося спрощеною векторною діаграмою трансформатора, зробивши на ній наступні додаткові побудови (рисунок 6.20). Із точки A опустимо перпендикуляр на продовження вектора $-\dot{U}'_2$, одержимо точку D . З деяким допущенням будемо вважати, що відрізок \overline{BD} являє собою різницю

$$\dot{U}_{1ном} - \dot{U}'_2 = \overline{BD} = \overline{BF} + \overline{FD},$$

де $\overline{BF} = U_{к.а.} \cos \varphi_2$; $\overline{FD} = U_{к.р.} \sin \varphi_2$,

тоді

$$U_{1ном} - U'_2 = U_{к.а.} \cos \varphi_2 + U_{к.р.} \sin \varphi_2. \quad (6.70)$$

Вимір вторинної напруги прийме вид

$$\Delta U_{ном} = (U_{к.а.} \cos \varphi_2 + U_{к.р.} \sin \varphi_2) 100 / U_{1ном}. \quad (6.71)$$

Позначимо $(U_{к.а.} / U_{1ном}) 100 = u_{ка}$; $(U_{к.р.} / U_{1ном}) 100 = u_{кр}$, тоді вираз зміни вторинної напруги трансформатора при збільшенні навантаження прийме вид

$$\Delta U_{ном} = u_{к.а.} \cos \varphi_2 + u_{к.р.} \sin \varphi_2. \quad (6.72)$$

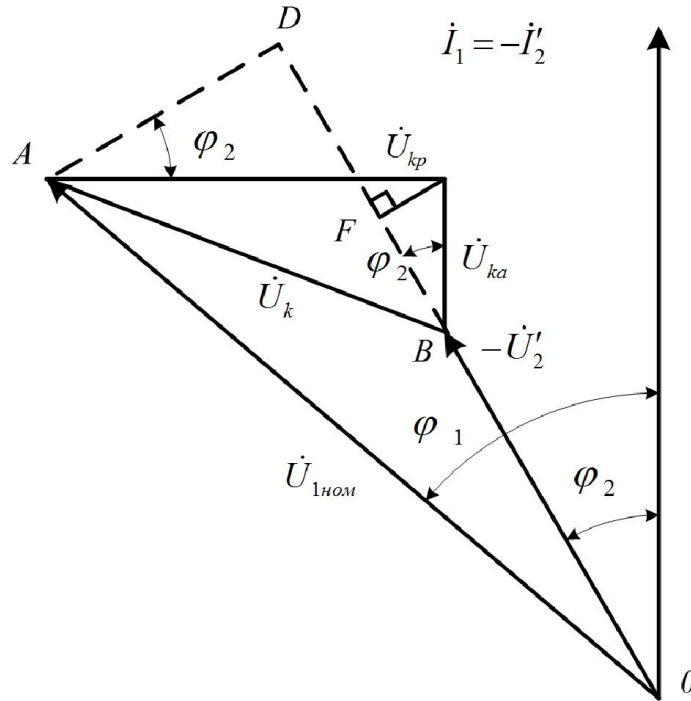


Рисунок 6.20 – До виводу формули $\Delta U_{ном}$

Вираз (6.72) дає можливість визначити зміну вторинної напруги лише при номінальному навантаженні трансформатора. При необхідності розрахунку значення вторинної напруги для будь-якого навантаження у вираз (6.72) варто ввести коефіцієнт навантаження, що представляє собою відносне значення струму навантаження $\beta = I_2 / I_{2ном}$

$$\Delta U = \beta(u_{к.а.} \cos \varphi_2 + u_{к.р.} \sin \varphi_2). \quad (6.73)$$

З виразу (6.73) видно, що зміна вторинної напруги ΔU залежить не тільки від величини навантаження трансформатора (β), але і від характеру цього навантаження (φ_2).

На рисунку 6.21, а представлений графік залежності $\Delta U = f(\varphi_2)$ при $\cos \varphi_2 = const$, а на рисунку 6.21, б – графік $\Delta U = f(\cos \varphi_2)$ при $\beta = const$. На цих графіках від’ємні значення ΔU при роботі трансформатора з ємнісним навантаженням відповідають підвищенню напруги при переході від режиму н.х. до навантаження. Маючи на увазі, що $u_{к.а.} = u_k \cos \varphi_k, u_{к.р.} \sin \varphi_k$, одержимо ще один вираз для розрахунку зміни вторинної напруги при будь-якому навантаженні

$$\Delta U = \beta u_k (\cos \varphi_k \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta \cdot u_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (6.74)$$

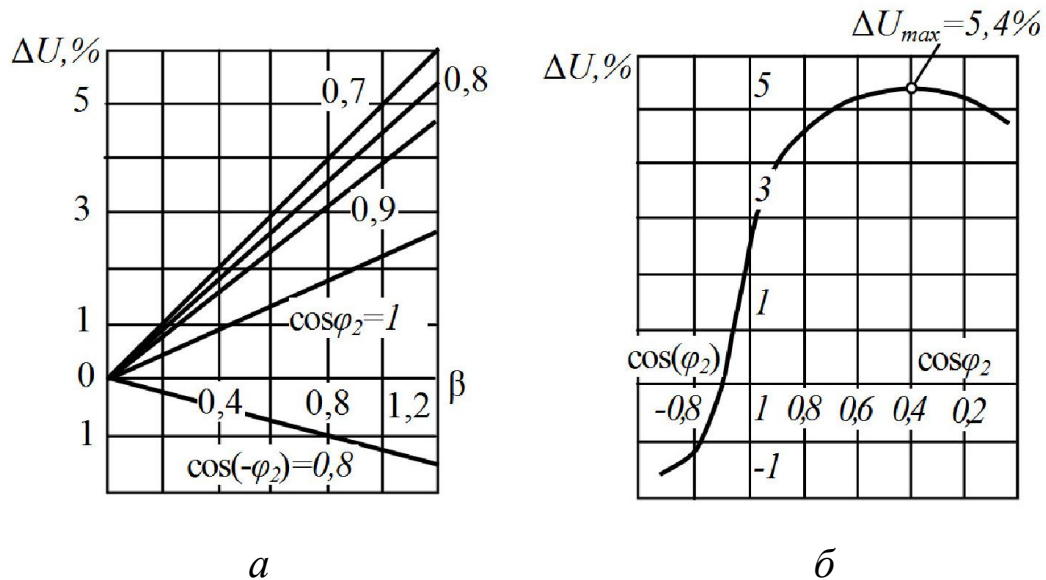


Рисунок 6.21 – Залежність ΔU від величини навантаження (а) і коефіцієнта потужності навантаження (б) трифазного трансформатора (100 кВ·А, 6,3/0,22 кВ, $u_k=5,4\%$, $\cos\varphi_k = 0,4$)

З (6.74) видно, що найбільше значення зміни напруги $\Delta U = u_k$ має місце при рівності кутів фазового зсуву $\varphi_k = \varphi_2$, тоді $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$.

Залежність вторинної напруги U_2 трансформатора від навантаження I_2 називають зовнішньою характеристикою. Нагадаємо, що в силових трансформаторах за номінальну напругу на затискачах вторинної обмотки в режимі н.х. при номінальній первинній напрузі.

Вид зовнішньої характеристики (рисунок 6.22) залежить від характеру навантаження трансформатора ($\cos\varphi_2$). Зовнішню характеристику трансформатора можна побудувати по (6.74) шляхом розрахунку ΔU для різних значень β і $\cos\varphi_2$.

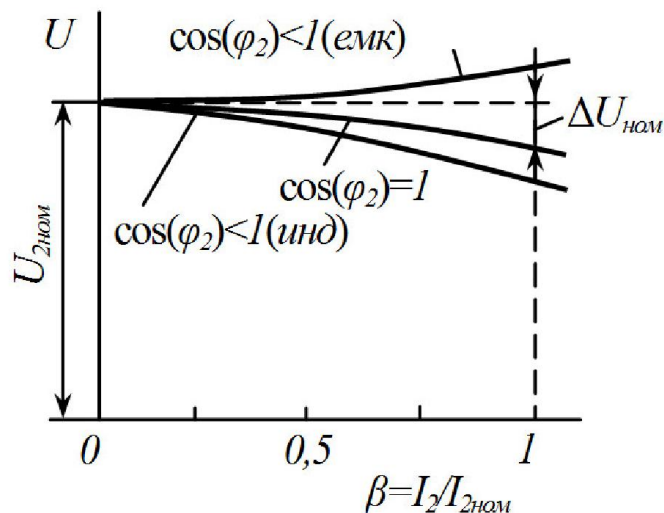


Рисунок 6.22 – Зовнішні характеристики трансформатора

7 Втрати та ККД трансформатора

У процесі трансформування електричної енергії частина енергії затрачується в трансформаторі на покриття втрат. Втрати в трансформаторі поділяються на електричні і магнітні.

Електричні втрати. Обумовлені нагріванням обмоток трансформаторів при проходженні по цих обмотках електричного струму. Потужність електричних втрат P_e пропорційна квадрату струму і визначається сумою електричних втрат у первинній P_{e1} і вторинній P_{e2} обмотках

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = m \cdot I_1^2 r_1 + m \cdot I_2^2 r_2, \quad (6.75)$$

де m – число фаз трансформатора (для однофазного трансформатора $m = 1$, для трифазного $m = 3$).

При проектуванні трансформатора величину електричних втрат визначають по (6.75), а для виготовленого трансформатора ці втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність к.з. при номінальних струмах в обмотках $P_{к.ном}$

$$P_e = \beta^2 P_{к.ном} \quad (6.76)$$

де β – коефіцієнт навантаження.

Електричні втрати називають змінними, тому що їх величина залежить від навантаження трансформатора (рисунок 6.23).

Магнітні втрати спостерігаються головним чином у магнітопроводі трансформатора. Причина цих втрат – систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає в магнітопроводі два види магнітних втрат: втрати від гістерезису P_g , пов'язані з витратою енергії на знищення залишкового магнетизму у феромагнітному матеріалі магнітопроводу, і втрати від вихрових струмів $P_{в.с.}$, що наводяться змінним магнітним полем у пластинах магнітопроводу

$$P_{маг} = P_g + P_{в.с.} \quad (6.77)$$

З метою зменшення магнітних втрат магнітопровід трансформатора виконують із магнітно-м'якого феромагнітного матеріалу – тонколистової електротехнічної сталі. При цьому магнітопровід виконують шихтованим у вигляді пакетів з тонких пластин (смуг), ізольованих із двох сторін тонкою плівкою лаку.

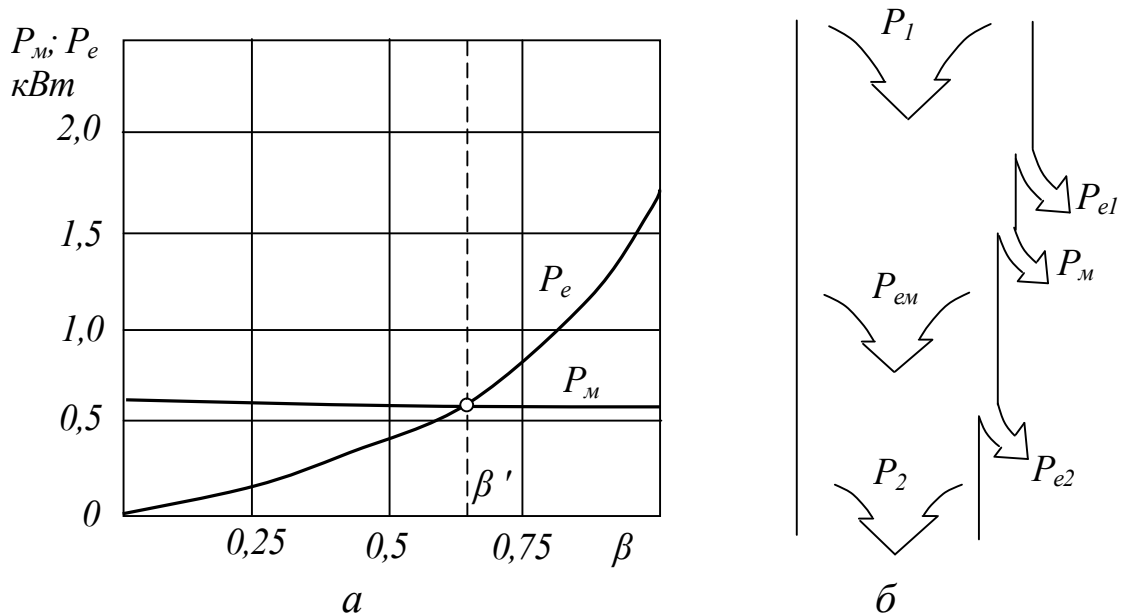


Рисунок 6.23 – Залежність втрат трансформатора від його навантаження (а) і енергетична діаграма (б) трансформатора

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті перемагнічування магнітопроводу, тобто частоті змінного струму ($P_2 \equiv f$), а магнітні втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти ($P_{e.c.} \equiv f^2$). Сумарні магнітні втрати прийнято вважати пропорційними частоті струму ступеня 1,3, тобто $P_{маг} \equiv f_{1,3}$. Величина магнітних втрат залежить також і від магнітної індукції в стержнях і ярмах магнітопроводу ($P_{маг} \equiv B^2$) При незмінній первинній напрузі ($U_1 = const$) магнітні втрати постійні, тобто не залежать від навантаження трансформатора (рисунок 6.23, а).

При проектуванні трансформатора магнітні втрати визначають за значенням питомих магнітних втрат P_{num} , що спостерігаються в 1 кг тонколистової електротехнічної сталі при значеннях магнітної індукції 1,0; 1,5 або 1,7 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц

$$P_{маг} = P_{num} (B/B_x)^2 (f/50)^{1,3} G, \quad (6.78)$$

де B – фактичне значення магнітної індукції в стержні або ярмі магнітопроводу трансформатора, Тл;

B_x – магнітна індукція, що відповідає прийнятому значенню питомих магнітних втрат, наприклад $B_x = 1,0$ або $1,5$ Тл;

G – маса стержня або ярма магнітопроводу, кг.

Значення питомих магнітних втрат зазначені в стандарті на тонколистову електротехнічну сталь. Наприклад, для сталі марки 3411 товщиною 0,5 мм при $B = 1,5$ Тл і $f = 50$ Гц питомі магнітні втрати $P_{1.5/50} = 2,45$ Вт/кг.

Для виготовленого трансформатора магнітні втрати визначають дослідним шляхом, вимірявши потужність н.х. при номінальній первинній напрузі $P_{0\text{ном}}$.

Таким чином, активна потужність P_1 , що надходить із мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e1} . Змінний магнітний потік викликає в магнітопроводі трансформатора магнітні втрати $P_{маг}$. Потужність, що залишилась, називана електромагнітною потужністю $P_{em} = P_1 - P_{e1} - P_{маг}$, передається у вторинну обмотку, де частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e2} . Активна потужність, що надходить у навантаження трансформатора, $P_2 = P_1 - \Sigma P_i = P_1 - (P_{e1} + P_{маг} + P_{e2})$. Всі види втрат, що супроводжують робочий процес трансформатора, показані на енергетичній діаграмі (рисунок 6.23, б).

Коефіцієнт корисної дії трансформатора визначається як відношення активної потужності на виході вторинної обмотки P_2 (корисна потужність) до активної потужності на вході первинної обмотки P_1 (потужність, що підводиться)

$$\eta = P_2 / P_1 = (P_1 - \Sigma P_i) / P_1 = 1 - \Sigma P_i / P_1. \quad (6.79)$$

Сумарні втрати $\Sigma P = P_{ном} + \beta_2 P_{к.ном}$.

Активна потужність на виході вторинної обмотки трифазного трансформатора (Вт)

$$P_2 = \sqrt{3} U_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2, \quad (6.80)$$

де $S_{ном} = \sqrt{3} U_{2ном} I_{2ном}$ – номінальна потужність трансформатора, ВА;
 I_2 і U_2 – лінійні значення струму, А, і напруги В.

З огляду на те, що $P_1 = P_2 + \Sigma P_i$, одержуємо вираз для розрахунку ККД трансформатора

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{0ном} + \beta^2 P_{к.ном}}. \quad (6.80)$$

Аналіз виразу (6.80) показує, що ККД трансформатора залежить як від величини (β), так і від характеру ($\cos \varphi_2$) навантаження. Ця залежність ілюструється графіками (рисунок 6.24). Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати рівні електричним: $P_{0ном} = (\beta')^2 / P_{к.ном}$, звідси значення коефіцієнта навантаження, що відповідає максимальному ККД,

$$\beta' = \sqrt{P_{0ном} / P_{к.ном}} \cdot \quad (6.81)$$

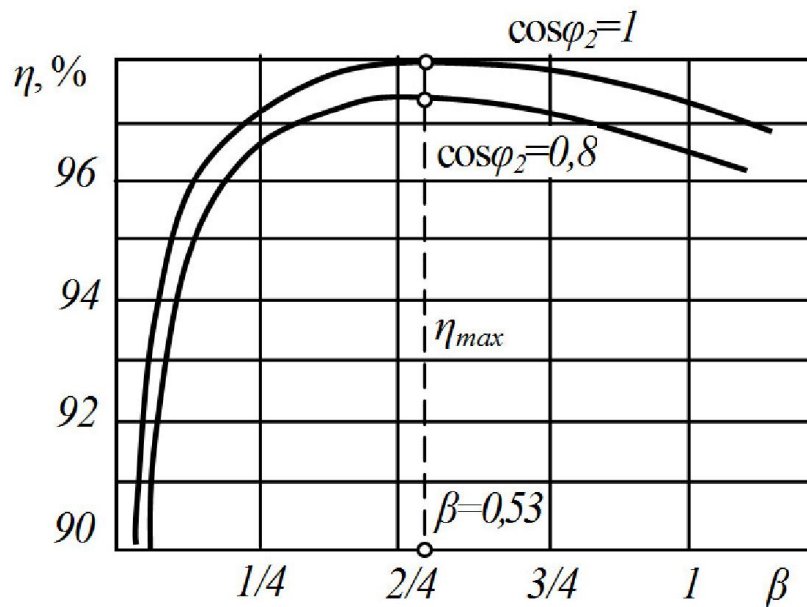


Рисунок 6.24 – Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

Вираз максимального ККД трансформатора

$$\eta_{max} = \frac{\beta' \cdot S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta' \cdot S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_{0ном}} \cdot \quad (6.82)$$

Крім розглянутого ККД за потужністю іноді користуються поняттям ККД за енергією (енергетичний ККД), що представляє собою відношення кількості енергії, відданої трансформатором споживачеві W_2 (кВт·год) протягом року, до енергії W_1 , отриманої ним від живильної електромережі за цей же час

$$\eta = W_2 / W_1 \cdot \quad (6.83)$$

ККД трансформатора за енергією характеризує ефективність експлуатації трансформації.

Контрольні запитання

1. Якими шляхами можна визначати параметри схеми заміщення трансформатора?
2. Накресліть схеми проведення дослідів н.х. для одно- та трифазного трансформаторів.
3. Яка роль струму н.х. в трансформаторі?
4. Яку величину складає струм н.х. в трансформаторі, і чому саме таку?
5. Що слід розуміти під втратами н.х. в трансформаторі, чому вони вважаються постійними?
6. Що таке характеристики н.х. і як вони будуються?
7. Як виглядає і чому саме так схема заміщення приведенного трансформатора при н.х.?
8. Як визначаються параметри намагнічувальної вітки схеми заміщення трансформатора?
9. За якою схемою, і з використанням яких вимірювальних приладів, проводиться дослід к.з. трансформатора?
10. Що слід розуміти під дослідним, а що під аварійним к.з. трансформатора?
11. Яка напруга називається напругою к.з. трансформатора?
12. Що слід розуміти під втратами к.з. трансформатора, чому ці втрати називаються змінними?
13. Як за результатами дослідів к.з. визначити опори первинної та вторинної обмоток трансформатора?
14. Що таке характеристики к.з. трансформатора і як вони будуються?
15. Які елементи і чому складають схему заміщення трансформатора при дослідному к.з.?
16. Як виглядає трикутник к.з., на основі яких рівнянь його будують?
17. Навіщо спрощується схема заміщення та векторна діаграма трансформатора?
18. Що кладеться в основу спрощення схеми заміщення трансформатора?
19. Яку похибку і чому вносить у розрахунки трансформатора спрощення схеми заміщення?

20. З яких елементів складається спрощена схема заміщення трансформатора?
21. Напишіть і поясніть рівняння спрощеної схеми заміщення.
22. Поясніть побудову спрощеної векторної діаграми трансформатора?
23. Побудуйте спрощену векторну діаграму трансформатора при чисто активному навантаженні.
24. Що слід розуміти під зміною вторинної напруги трансформатора?
25. Як використовується спрощена схема заміщення трансформатора для визначення зміни вторинної напруги?
26. Напишіть і поясніть формулу зміни вторинної напруги трансформатора.
27. Що слід розуміти під зовнішніми характеристиками трансформатора.
28. Поясніть зовнішні характеристики трансформатора при різних характерах навантаження.
29. Що представляє собою енергетична діаграма трансформатора?
30. Які втрати мають місце у навантаженому трансформаторі?
31. Поясніть з яких втрат складаються магнітні втрати і від яких величин вони залежать?
32. Поясніть з яких втрат складаються електричні втрати і від яких величин вони залежать?
33. Як визначається ККД та його максимальне значення у трансформатора?
34. Що є умовою максимального значення ККД?
35. Що слід розуміти під енергетичним ККД трансформатора?