

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ДВНЗ «ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ»
КАФЕДРА ЕЛЕКТРИЧНОЇ ІНЖЕНЕРІЇ

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
ЩОДО ВИКОНАННЯ ІНДИВІДУАЛЬНОГО ЗАВДАННЯ
з дисципліни «Електричні машини і апарати. Частина І»
Для студентів денної та заочної форм навчання спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ББК 31.261

У методичних вказівках з дисципліни «Електричні машини і апарати» наведені теоретичні положення й практичні методи розрахунків, що опираються на теорію, параметрів трифазних трансформаторів. Також дається покроковий алгоритм виконання індивідуального завдання на прикладі конкретного трансформатора. Варіанти завдань зведені у таблицю.

Укладач Микола Власенко, доц., к.т.н., доц. каф. ВМФ

Відповідальний за випуск Олександр Колларов, доц., к.т.н., доц. каф. ЕлІН

Затверджено навчально-методичним відділом ДонНТУ,
протокол № 9 від 27.06 2023 р.

© ДонНТУ, 2023 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	4
1 ТРАНСФОРМАТОРИ.....	5
2 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО РОЗРАХУНКУ.....	7
2.1 Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток.....	7
2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора.....	8
2.3 Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинних напруг і струмів при номінальному навантаженні.....	10
2.4 Побудова векторної діаграми.....	11
2.5 Дослідження паралельної роботи трансформаторів.....	14
2.6 Розрахунок ударних струмів.....	19
3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ.....	21
4. ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ.....	29
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ.....	32

ВСТУП

Методичні рекомендації призначені для виконання індивідуального завдання студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка». Крім цього методичні рекомендації можуть бути використані студентами всіх форм навчання при розв'язанні питань розрахунків трифазного трансформатора.

Рекомендації містять необхідний теоретичний матеріал, достатній для вивчення практичних питань розрахунку трансформаторів. Наведений приклад розрахунку конкретного трансформатора і варіанти завдань для виконання розрахункової роботи.

Також рекомендації можуть бути корисними фахівцям, що працюють в галузі енергетики, магістрантам, аспірантам.

1 ТРАНСФОРМАТОРИ

Трансформатором називається статичний апарат, що має дві або більше обмоток, призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінної напруги і струму в одну або декілька інших систем змінної напруги і струмів, що мають інші значення за незмінної частоти, з метою передачі потужності.

У загальному випадку вторинна система змінного струму може відрізнятися від первинної будь-якими параметрами: значеннями напруги і струму, числом фаз, формою кривої напруги (струму), частотою.

Найбільше застосування в електротехнічних установках, а також в енергетичних системах передачі і розподілу електроенергії мають силові трансформатори, за допомогою яких змінюють значення змінної напруги і струму. При цьому число фаз, форма кривої напруги (струму) і частота залишаються незмінними.

Залежно від призначення трансформатори розділяють на силові трансформатори загального призначення і трансформатори спеціального призначення. Силові трансформатори загального призначення застосовуються в лініях передачі і розподілу електроенергії, а також у різних електроустановках для одержання необхідної напруги. Трансформатори спеціального призначення характеризуються різноманітністю робочих властивостей і конструктивного виконання. До цих трансформаторів належать пічні і зварювальні трансформатори, трансформатори для пристроїв автоматики (підтрансформатори, імпульсні, множники частоти і т.п.), випробувальні і вимірювальні трансформатори і т.д.

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного з феромагнітного матеріалу (зазвичай листової електротехнічної сталі), і двох обмоток, розташованих на стрижнях магнітопроводу (рис. 1, а). Одна з обмоток, що зветься первинною, приєднана

до джерела змінного струму на напругу U_1 . До іншої обмотки, що зветься вторинною, підключено навантаження Z_H .

Первинна і вторинна обмотки трансформатора не мають електричного зв'язку і потужність із однієї обмотки в іншу передається електромагнітним шляхом.

Магнітопровід, на якому розташовані ці обмотки, служить для посилення індуктивного зв'язку між обмотками.

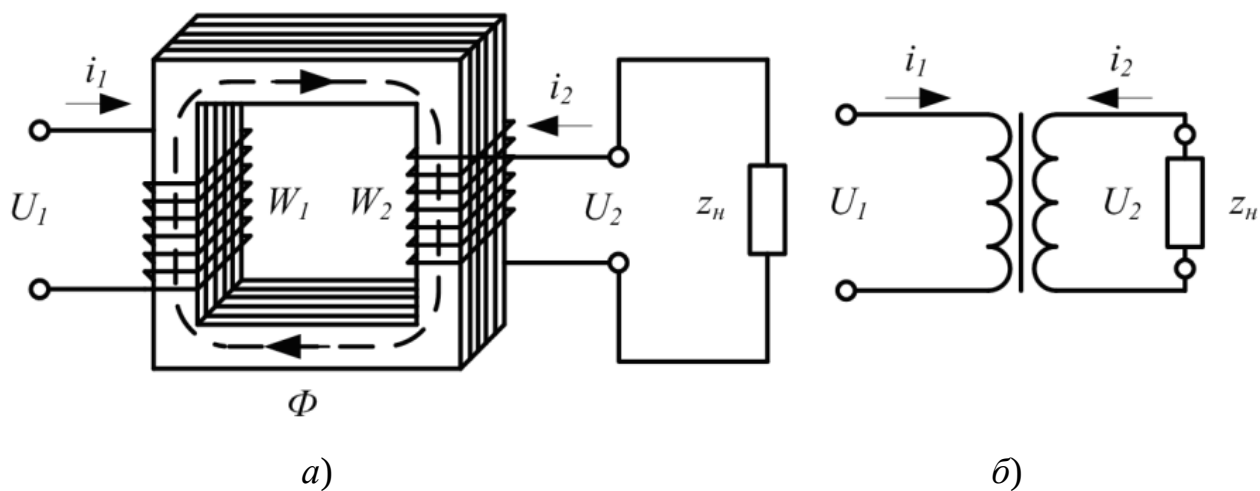


Рисунок 1 – Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Трансформатор відіграє одну з головних ролей в передаванні електричної енергії на великі відстані, оскільки в цьому випадку до надходження до кінцевого споживача вона піддається багаторазовому перетворенню з низької напруги у високу і навпаки.

2 РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО РОЗРАХУНКУ

2.1 Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

Співвідношення номінальних лінійних $U_{\text{лн}}$ та фазних $U_{\text{фн}}$ напруг трифазного трансформатора при з'єднанні його обмоток у

➤ «зірку»:

$$U_{\text{фн}} = \frac{U_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}; \quad (2.1)$$

➤ «трикутник»:

$$U_{\text{фн}} = U_{\text{лн}}. \quad (2.2)$$

Визначаються номінальні лінійна $U_{1\text{лн}}$ і фазна $U_{1\text{фн}}$ напруги первинної обмотки та номінальні лінійна $U_{2\text{лн}}$ і фазна $U_{2\text{фн}}$ напруги вторинної обмотки залежно від їх схем з'єднання.

Номінальні лінійні струми первинної $I_{1\text{лн}}$ та вторинної $I_{2\text{лн}}$ обмоток трансформатора незалежно від їх схем з'єднання визначаються через номінальну потужність $S_{\text{н}}$:

$$I_{1\text{лн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{1\text{лн}}}, \quad (2.3)$$

$$I_{2\text{лн}} = \frac{S_{\text{н}}}{\sqrt{3}U_{2\text{лн}}}. \quad (2.4)$$

Співвідношення номінального фазного струму $I_{\text{фн}}$ і номінального лінійного $I_{\text{лн}}$ струму трансформатора при з'єднанні обмоток у

➤ «зірку»:

$$I_{\text{фн}} = I_{\text{лн}}; \quad (2.5)$$

➤ «трикутник»:

$$I_{\text{фн}} = \frac{I_{\text{лн}}}{\sqrt{3}}. \quad (2.6)$$

Визначаються номінальні фазні струми первинної $I_{1\text{фн}}$ та вторинної $I_{2\text{фн}}$ обмоток залежно від їх схем з'єднання.

2.2 Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Схема заміщення для однієї фази трансформатора подана на рис. 2.1.

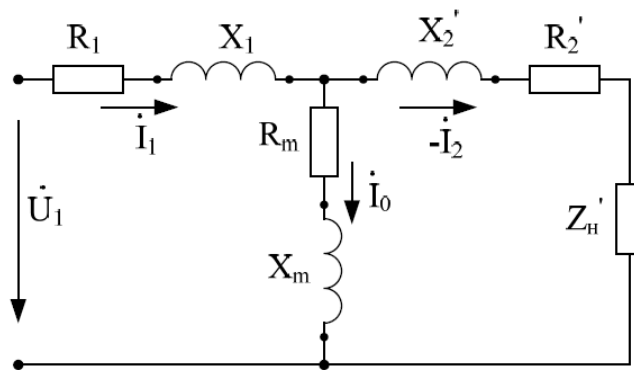


Рисунок 2.1 – Схема заміщення для однієї фази трансформатора

Потужність короткого замикання на одну фазу трифазного трансформатора визначається через втрати короткого замикання $P_{\text{к}}$:

$$P_{\text{кф}} = \frac{P_{\text{к}}}{3}. \quad (2.7)$$

Фазна напруга короткого замикання визначається через напругу короткого замикання $U_{\text{к}\%}$:

$$U_{1\text{кф}} = \frac{U_{\text{к}\%}}{100} \cdot U_{1\text{фн}}. \quad (2.8)$$

Опори трансформатора при короткому замиканні:

➤ повний

$$Z_k = \frac{U_{1\kappa\phi}}{I_{1\phi\text{н}}}; \quad (2.9)$$

➤ активний

$$R_k = \frac{P_{\kappa\phi}}{I_{1\phi\text{н}}^2}; \quad (2.10)$$

➤ реактивний

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2}. \quad (2.11)$$

Коефіцієнт потужності при короткому замиканні:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k}. \quad (2.12)$$

Визначається аргумент φ_k коефіцієнта потужності при короткому замиканні:

$$\varphi_k = \arccos \varphi_k. \quad (2.13)$$

Опори обмоток трансформатора:

➤ повний

$$Z_1 = Z_2' = \frac{Z_k}{2}; \quad (2.14)$$

➤ активний

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2}; \quad (2.15)$$

➤ реактивний

$$X_1 = X_2' = \frac{X_k}{2}. \quad (2.16)$$

Потужність втрат холостого ходу на одну фазу визначається через втрати холостого ходу P_0 :

$$P_{0\phi} = \frac{P_0}{3}. \quad (2.17)$$

Фазний струм холостого ходу $I_{0\phi}$ визначається через струм холостого ходу $I_{0\%}$, взятий у відсотках від номінального струму:

$$I_{0\phi} = \frac{I_{0\%}}{100} \cdot I_{1\phi\text{н}}. \quad (2.18)$$

Опори кола намагнічування:

➤ повний

$$Z_m = \frac{U_{1\phi\text{н}}}{I_{0\phi}} - Z_1; \quad (2.19)$$

➤ активний

$$R_m = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} - R_1; \quad (2.20)$$

➤ реактивний

$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2}. \quad (2.21)$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha = \arctg \frac{R_m}{X_m}. \quad (2.22)$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1\phi\text{н}}}{U_{2\phi\phi}}. \quad (2.23)$$

2.3 Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинних напруг і струмів при номінальному навантаженні

Складові напруг короткого замикання:

➤ активна

$$U_{\text{ка}\%} = R_{\text{к}} I_{1\text{фн}} \frac{100}{U_{1\text{фн}}}; \quad (2.24)$$

➤ реактивна

$$U_{\text{кр}\%} = X_{\text{к}} I_{1\text{фн}} \frac{100}{U_{1\text{фн}}}. \quad (2.25)$$

Відсоткова зміна вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$\Delta U_{\%} = U_{\text{ка}\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{\text{кр}\%} \cdot \sin \varphi_2, \quad (2.26)$$

де $\cos \varphi_2$ – коефіцієнт потужності.

При активному, активно-індуктивному чи індуктивному характері навантаження потрібно прийняти кут φ_2 додатним, а при активно-ємнісному чи ємнісному характері навантаження – від’ємним. Тобто

$$\varphi_2 = \begin{cases} \arccos \varphi_2 & \text{при активному та індуктивному навантаженнях;} \\ -\arccos \varphi_2 & \text{при ємнісному навантаженні.} \end{cases} \quad (2.27)$$

Приведені значення вторинних струму та напруги при номінальному навантаженні:

$$I'_2 = \frac{I_{2\text{фн}}}{k}, \quad (2.28)$$

$$U'_2 = U_{1\text{фн}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100} \right). \quad (2.29)$$

2.4 Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруг на опорах обмоток:

➤ активні

$$R_1 I_{1\text{фн}} \approx R'_2 I'_{2\text{фн}}; \quad (2.30)$$

➤ реактивні

$$X_1 I_{1\Phi\text{H}} \approx X'_2 I'_{2\Phi\text{H}}. \quad (2.31)$$

Векторна діаграма будується на основі рівнянь напруг і струмів обмоток трансформатора:

$$\begin{cases} \dot{U}_{1\Phi\text{H}} = -\dot{E}_{1\Phi\text{H}} + R_1 \dot{I}_{1\Phi\text{H}} + jX_1 \dot{I}_{1\Phi\text{H}}; \\ \dot{E}'_{2\Phi\text{H}} = \dot{U}'_{2\Phi\text{H}} + R'_2 \dot{I}'_{2\Phi\text{H}} + jX'_2 \dot{I}'_{2\Phi\text{H}}; \\ \dot{I}_{1\Phi\text{H}} = \dot{I}_{0\Phi} - \dot{I}'_{2\Phi\text{H}}. \end{cases} \quad (2.32)$$

Побудова діаграми здійснюється в такій послідовності:

- 1) вибирається зручний масштаб струмів та напруг;
- 2) відкладаємо напрям вектору магнітного потоку $\dot{\Phi}$ за напрямом дійсної осі (рис. 2.2)

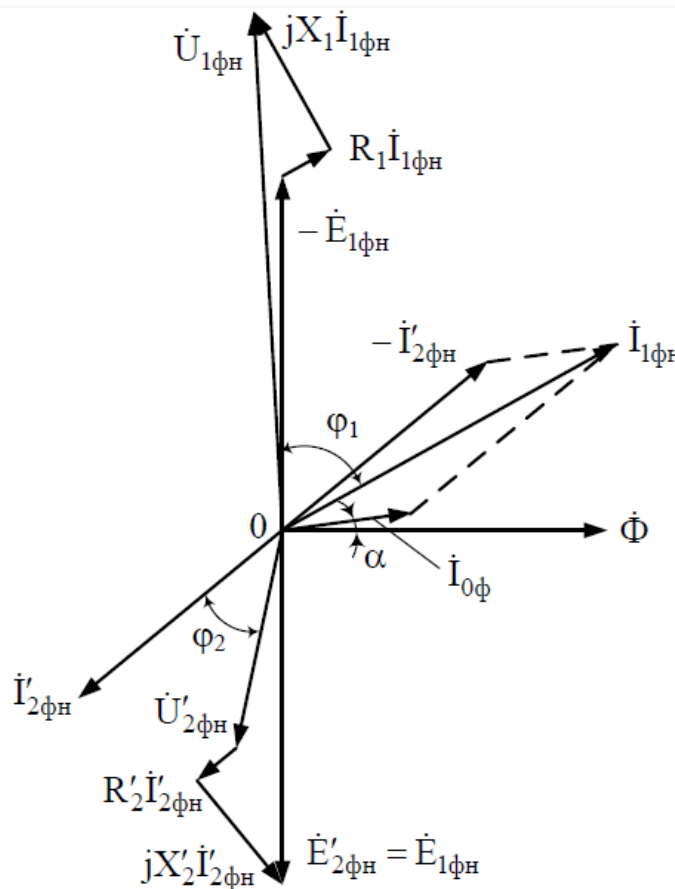


Рисунок 2.2 - Векторна діаграма трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

3) під кутом α , розрахованим за (1.22), від вектору магнітного потоку $\dot{\Phi}$ у масштабі струму відкладається від початку координат (від точки 0) вектор струму холостого ходу $\dot{I}_{0\phi}$;

4) у масштабі напруги від початку координат відкладається вектор приведеної вторинної напруги $\dot{U}'_{2\phi\text{н}}$;

5) в масштабі струму під кутом φ_2 до вектору $\dot{U}'_{2\phi\text{н}}$ з початку координат відкладається вектор приведенного струму вторинної обмотки $\dot{I}'_{2\phi\text{н}}$;

6) з кінця вектору $\dot{U}'_{2\phi\text{н}}$ паралельно вектору $\dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ будується в масштабі напруги вектор спаду напруги $R'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$;

7) з кінця вектору спаду напруги $R'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ під кутом 90° у масштабі напруги будується вектор спаду напруги $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ (якщо навантаження позитивне, то вектор $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ відкладається за годинниковою стрілкою, а якщо від'ємне, то в протилежному напрямі);

8) згрупувавши вектор струму $\dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ та вектори напруги $\dot{U}'_{2\phi\text{н}}$ і спадів напруг $R'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$, $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$, потрібно їх розмістити на комплексній площині таким чином, щоб початки векторів $\dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ та $\dot{U}'_{2\phi\text{н}}$ знаходилися в точці 0, а кінець вектору $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$ – на уявній осі j ;

9) після з'єднання початку координат з кінцем вектору $jX'_2 \dot{I}'_{2\phi\text{н}}$, утвориться вектор приведеної фазної ЕРС вторинної обмотки $\dot{E}'_{2\phi\text{н}}$, рівний ЕРС первинної обмотки $\dot{E}_{1\phi\text{н}}$;

10) від початку координат відкладається вектор $-\dot{I}'_{2\text{фн}}$;

11) за правилом паралелограма додаються вектори струмів $-\dot{I}'_{2\text{фн}}$ та $\dot{I}_{0\text{ф}}$.

Результатом побудов є вектор струму первинної обмотки $\dot{I}_{1\text{фн}}$;

12) з початку координат відкладається вектор $-\dot{E}_{1\text{фн}}$;

13) з кінця вектору $-\dot{E}_{1\text{фн}}$ у масштабі напруг паралельно вектору $\dot{I}_{1\text{фн}}$ відкладається вектор спаду напруги $R_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$;

14) з кінця вектору спаду напруги $R_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$ під кутом 90° у масштабі напруги в бік випередження відкладається вектор спаду напруги $jX_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$;

15) після з'єднання початку координат з кінцем вектору $jX_1 \dot{I}_{1\text{фн}}$, отримується вектор первинної напруги $\dot{U}_{1\text{фн}}$.

2.5 Дослідження паралельної роботи трансформаторів

Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{\text{нI}} = S_{\text{нII}} = S_{\text{н}}$, різними коефіцієнтами трансформації $k_{\text{I}} \neq k_{\text{II}}$ і однаковими напругами короткого замикання $U_{\text{кI}\%} = U_{\text{кII}\%}$, причому перший трансформатор включений на відпайку $\Delta U_{\text{I}\%} = 2,5\%$.

Обидва трансформатори живляться від однієї мережі, тому номінальні фазні напруги обох трансформаторів однакові, тобто $U_{1\text{фнI}} = U_{1\text{фнII}} = U_{1\text{фн}}$. Вторинна напруга другого трансформатора $U_{2\text{фнII}} = U_{2\text{фн}}$.

Оскільки перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_{I\%}$, то при цьому збільшується (при $+\Delta U_{I\%}$) або зменшується (при $-\Delta U_{I\%}$) на $\Delta U_{I\%}$ кількість витків обмотки високої напруги, а вторинна напруга на $\Delta U_{I\%}$ знижується (при $+\Delta U_{I\%}$) або підвищується (при $-\Delta U_{I\%}$), тобто

$$U_{2\text{фнI}} = \left(1 - \frac{\Delta U_{I\%}}{100}\right) \cdot U_{2\text{фнII}}. \quad (2.33)$$

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I = \frac{U_{1\text{фнI}}}{U_{2\text{фнI}}}, \quad (2.34)$$

$$k_{II} = \frac{U_{1\text{фнII}}}{U_{2\text{фнII}}}. \quad (2.35)$$

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k = |k_I - k_{II}|. \quad (2.36)$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{\text{сер}} = \sqrt{k_I k_{II}}. \quad (2.37)$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від $k_{\text{сер}}$:

$$\Delta k_{\%} = \frac{\Delta k}{k_{\text{сер}}} \cdot 100\% \quad (2.38)$$

Струм зрівноваження, який протікає по вторинних обмотках:

$$I_{\text{зр2}} = \frac{\Delta k_{\%} \cdot I_{2\text{фн}}}{2U_{\text{к}\%}}. \quad (2.39)$$

За виконання умови $k_I > k_{II}$ при номінальному навантаженні другий трансформатор буде перевантаженим за рахунок струму зрівноваження, а за $k_I < k_{II}$ – перевантаженим буде перший трансформатор.

Оскільки перевантажувати трансформатори не можна, то потрібно при визначенні результуючих струмів, які протікають по вторинних обмотках трансформаторів, виходити з того, що результуючий вторинний струм перевантаженого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, тобто потрібно прийняти при

$$\text{➤ } k_I > k_{II} \quad I_{2II} = I_{2\text{фн}};$$

$$\text{➤ } k_I < k_{II} \quad I_{2I} = I_{2\text{фн}}.$$

Струм $I_{\text{нав}}$ ($I_{\text{навII}}$ при $k_I > k_{II}$ або $I_{\text{навI}}$ при $k_I < k_{II}$), який перевантажений трансформатор віддає в навантаження, визначається з рівняння

$$I_{\text{нав}} = -I_{\text{зр2}} \cdot \cos(\varphi_k + \varphi_2) \pm \sqrt{\left[I_{\text{зр2}} \cdot \cos(\varphi_k + \varphi_2) \right]^2 - \left(I_{\text{зр2}}^2 - I_{2\text{фн}}^2 \right)}. \quad (2.40)$$

Оскільки струм, який віддається в навантаження, повинен бути меншим результуючого струму, то у виразі (2.40) вибирається знак «+» або «-» виходячи з виконання умови:

$$I_{\text{нав}} \leq I_{2\text{фн}}. \quad (2.41)$$

Напруга на шинах навантаження за рахунок дії струму зрівноваження дорівнює середньому значенню, тобто

$$U_{2\text{ср}} = \frac{U_{1\text{фн}}}{k_{\text{ср}}}. \quad (2.42)$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню, однакові за значенням, тобто $I_{\text{навI}} = I_{\text{навII}}$.

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора (I_{2I} при $k_I > k_{II}$ і I_{2II} при $k_I < k_{II}$) становить:

$$I_2 = \sqrt{I_{\text{нав}}^2 + I_{\text{зр2}}^2 + 2I_{\text{нав}} \cdot I_{\text{зр2}} \cos(\varphi_k \pm \varphi_2)}. \quad (2.43)$$

У формулі (2.43) знак «+» береться при активно-індуктивному або індуктивному навантаженні, а знак «-» – при активно-ємнісному або

ємнісному навантаженні.

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_I = \frac{I_{2I}}{I_{2фн}} \cdot 100; \quad (2.44)$$

$$N_{II} = \frac{I_{2II}}{I_{2фн}} \cdot 100. \quad (2.45)$$

При $k_I > k_{II}$ завантаженість другого трансформатора повинна вийти $N_{II} = 100\%$ ($N_I < 100\%$), а при $k_I < k_{II}$ завантаженість першого трансформатора повинна вийти $N_I = 100\%$ ($N_{II} < 100\%$).

Установлена потужність:

$$S_{уст} = S_{нI} + S_{нII} = 2S_n. \quad (2.46)$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 2U_{2сер} (I_{набI} + I_{набII}). \quad (2.47)$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S = S_{уст} - S_{\Sigma}, \quad (2.48)$$

а у відсотках –

$$\Delta S_{\%} = \frac{\Delta S}{S_{уст}} \cdot 100\%. \quad (2.49)$$

Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

Розглядаються два трансформатори з однаковими потужностями $S_{нI} = S_{нII} = S_n$, однаковими коефіцієнтами трансформації $k_I = k_{II}$ і різними напругами короткого замикання $U_{кII\%} = U_{кI\%}$, причому напруга короткого замикання другого трансформатора на $\Delta U_{к3\%} = 8\%$ більша, ніж першого:

$$U_{кП\%} = \left(1 + \frac{\Delta U_{кЗ\%}}{100}\right) \cdot U_{кІ\%}. \quad (2.50)$$

При паралельній роботі трансформаторів з різними напругами короткого замикання їхні струми навантаження розподіляються обернено пропорційно напругам короткого замикання і прямо пропорційно їх номінальним потужностям.

При $U_{кІ\%} < U_{кП\%}$ перший трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{кЗ\%}/100)$ разів більший, ніж другий трансформатор. При $U_{кІ\%} > U_{кП\%}$ другий трансформатор віддає в навантаження струм в $1 + (\Delta U_{кЗ\%}/100)$ разів більший, ніж перший трансформатор.

Для запобігання перевантаження потрібно прийняти струм навантаження перевантаженого трансформатора рівним номінальному струму вторинної обмотки:

$$\text{➤ при } U_{кІ\%} < U_{кП\%} \quad I_I = I_{2фн};$$

$$\text{➤ при } U_{кІ\%} > U_{кП\%} \quad I_{II} = I_{2фн}.$$

Тоді недовантажений трансформатор буде віддавати в навантаження струм $I_{I(II)}$ (I_{II} при $U_{кІ\%} < U_{кП\%}$; I_I при $U_{кІ\%} > U_{кП\%}$)

$$I_{I(II)} = \frac{I_{2фн}}{1 + \frac{\Delta U_{кЗ\%}}{100}}. \quad (2.51)$$

Ступінь завантаження трансформаторів:

$$N_I = \frac{I_I}{I_{2фн}} \cdot 100\%; \quad (2.52)$$

$$N_{II} = \frac{I_{II}}{I_{2фн}} \cdot 100\%. \quad (2.53)$$

При $U_{кІ\%} < U_{кП\%}$ завантаженість першого трансформатора повинна вийти $N_I = 100\%$ ($N_{II} < 100\%$), а при $U_{кІ\%} > U_{кП\%}$ завантаженість другого

трансформатора повинна вийти $N_{II} = 100\%$ ($N_I < 100\%$).

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3U_{2\phi n} \cdot (I_I + I_{II}). \quad (2.54)$$

Недовикористана потужність ΔS розраховується за (2.48) та (2.49) з урахуванням усталеної потужності $S_{уст}$, розрахованої за (2.46), та сумарної потужності S_{Σ} , розрахованої за (2.54).

2.6 Розрахунок ударних струмів

Ударний струм короткого замикання:

$$i_{к.уд} = K_{уд} I_{к.м}, \quad (2.55)$$

де $K_{уд}$ – ударний коефіцієнт:

$$K_{уд} = 1 + e^{-\pi \frac{R_k}{X_k}}; \quad (2.56)$$

$I_{к.м}$ – амплітуда усталеного струму короткого замикання:

$$I_{к.м} = \sqrt{2} I_n \frac{100}{U_{к\%}}, \quad (2.57)$$

де I_n – номінальний струм в обмотці.

Амплітуда усталеного струму короткого замикання:

➤ для первинної обмотки

$$I_{к.м1} = \sqrt{2} I_{1\phi n} \frac{100}{U_{к\%}}; \quad (2.58)$$

➤ для вторинної обмотки

$$I_{к.м2} = \sqrt{2} I_{2\phi n} \frac{100}{U_{к\%}}. \quad (2.59)$$

Ударні струми короткого замикання:

➤ для первинної обмотки

$$i_{1к.уд} = K_{уд} I_{к.м1}; \quad (2.60)$$

➤ для вторинної обмотки

$$i_{2к.уд} = K_{уд} I_{к.м2}. \quad (2.61)$$

3. ПРИКЛАД РОЗРАХУНКУ

Розглядається трансформатор з параметрами, вказаними в табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Дані трансформатора

S_H , кВ·А	$U_{1лн}$, кВ	$U_{2лн}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група	$\cos \varphi_2$	Тип навантаж.
100	3	0,4	4,5	2,6	0,365	1,97	Y/Y _{H-0}	0,72	ємнісний

Розрахунок номінальних струмів та напруг обмоток

Обмотка ВН:

$$U_{1фн} = \frac{U_{1лн}}{\sqrt{3}} = \frac{3000}{\sqrt{3}} = 1732 \text{ В};$$

$$I_{1лн} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{1лн}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 3000} = 19,245 \text{ А};$$

$$I_{1фн} = I_{1лн} = 19,245 \text{ А};$$

обмотка НН:

$$U_{2фн} = \frac{U_{2лн}}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 230,94 \text{ В};$$

$$I_{2лн} = \frac{S_H}{\sqrt{3} \cdot U_{2лн}} = \frac{100 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 144,338 \text{ А};$$

$$I_{2фн} = I_{2лн} = 144,338 \text{ А}.$$

Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора

Потужність КЗ на фазу:

$$P_{кф} = \frac{P_k}{3} = \frac{1970}{3} = 656,667 \text{ Вт}.$$

Напруга КЗ:

$$U_{1кф} = \frac{U_{к\%}}{100} \cdot U_{1фн} = \frac{4,5}{100} \cdot 1732 = 77,942 \text{ В.}$$

Опір трансформатора при КЗ:

повний -
$$Z_k = \frac{U_{1кф}}{I_{1фн}} = \frac{77,942}{19,245} = 4,05 \text{ Ом;}$$

активний -
$$R_k = \frac{P_{кф}}{I_{1фн}^2} = \frac{656,667}{19,245^2} = 1,773 \text{ Ом;}$$

реактивний -
$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} = \sqrt{4,05^2 - 1,773^2} = 3,641 \text{ Ом.}$$

Коефіцієнт потужності при КЗ:

$$\cos \varphi_k = \frac{R_k}{Z_k} = \frac{1,773}{4,05} = 0,438;$$

$$\varphi_k = \arccos(0,438) = 64,038^\circ .$$

Опори обмоток трансформатора:

повні -
$$Z_1 = \frac{Z_k}{2} = \frac{4,05}{2} = 2,025 \text{ Ом,} \quad Z_{2'} = Z_1;$$

активні -
$$R_1 = \frac{R_k}{2} = \frac{1,773}{2} = 0,887 \text{ Ом,} \quad R_{2'} = R_1;$$

реактивні -
$$X_1 = \frac{X_k}{2} = \frac{3,641}{2} = 1,821 \text{ Ом,} \quad X_{2'} = X_1.$$

Потужність втрат ХХ на фазу:

$$P_{0ф} = \frac{P_0}{3} = \frac{365}{3} = 121,667 \text{ Вт.}$$

Фазний струм ХХ:

$$I_{0ф} = I_{0\%} \cdot \frac{I_{1фн}}{100} = 2,6 \cdot \frac{19,245}{100} = 0,5 \text{ А.}$$

Опори кола намагнічування:

повний -
$$Z_m = \frac{U_{1\phi H}}{I_{0\phi}} - Z_1 = \frac{1732}{0,5} - 2,025 = 3,46 \cdot 10^3 \text{ Ом};$$

активний -
$$R_m = \frac{P_{0\phi}}{I_{0\phi}^2} = \frac{121,667}{0,5^2} = 485,06 \text{ Ом};$$

реактивний -
$$X_m = \sqrt{Z_m^2 - R_m^2} = \sqrt{3,46^2 \cdot 10^6 - 485,06^2} = 3,425 \cdot 10^3 \text{ Ом}.$$

Кут магнітних втрат:

$$\alpha = \arctg \frac{R_m}{X_m} = \arctg \frac{485,06}{3,425 \cdot 10^3} = 8,06^\circ.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{U_{1\phi H}}{U_{2\phi H}} = \frac{1732}{230,94} = 7,5.$$

Розрахунок напруги короткого замикання та зміни вторинної напруги

Складові напруг КЗ:

активна -
$$U_{ка\%} = R_k \cdot I_{1\phi H} \cdot \frac{100}{U_{1\phi H}} \% = 1,773 \cdot 19,245 \cdot \frac{100}{1732} \% = 1,97 \text{ } \%;$$

реактивна -
$$U_{кр\%} = X_k \cdot I_{1\phi H} \cdot \frac{100}{U_{1\phi H}} \% = 3,641 \cdot 19,245 \cdot \frac{100}{1732} \% = 4,046 \text{ } \%;$$

$$\varphi_2 = -\arccos \varphi_2 = -43,946^\circ.$$

Відсоткова зміна вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$\Delta U_{\%} = U_{ка\%} \cdot \cos \varphi_2 + U_{кр\%} \cdot \sin \varphi_2 = 1,97 \cdot 0,72 + 4,046 \cdot (-0,694) = -1,389 \text{ } \%.$$

Приведене значення вторинної напруги при номінальному навантаженні:

$$U_{2\text{фн}'} = U_{1\text{фн}} \cdot \left(1 - \frac{\Delta U_{\%}}{100}\right) = 1732 \cdot \left(1 - \frac{-1,389}{100}\right) = 1756 \text{ В.}$$

Приведений струм вторинної обмотки:

$$I_{2\text{фн}'} = \frac{I_{2\text{фн}}}{k} = \frac{144,338}{7,5} = 19,245 \text{ А.}$$

Побудова векторної діаграми

Величини спаду напруги на опорах обмоток:

активні -	$R_1 \cdot I_{1\text{фн}} = 0,887 \cdot 19,245 = 17,061 \text{ В,}$
	$R_{2'} \cdot I_{2\text{фн}'} = 0,887 \cdot 19,245 = 17,061 \text{ В;}$
реактивні -	$X_1 \cdot I_{1\text{фн}} = 1,821 \cdot 19,245 = 35,038 \text{ В,}$
	$X_{2'} \cdot I_{2\text{фн}'} = 1,821 \cdot 19,245 = 35,038 \text{ В.}$

Векторна діаграма трансформатора за результатами розрахунків показана на рис. 3.1.

Дослідження паралельної роботи двох трансформаторів

Трансформатори з різними коефіцієнтами трансформації і однаковими напругами короткого замикання

$$k_I \neq k_{II}, \quad U_{\text{кI}\%} = U_{\text{кII}\%}.$$

$$U_{1\text{фнI}} = U_{1\text{фн}}, \quad U_{1\text{фнII}} = U_{1\text{фнI}}, \quad U_{2\text{фнII}} = U_{2\text{фн}}.$$

Перший трансформатор увімкнений на відпайку $\Delta U_I = 2,5 \%$.

Вторинна напруга першого трансформатора:

$$U_{2\text{фнI}} = \left(1 - \frac{\Delta U_I}{100}\right) \cdot U_{2\text{фнII}} = \left(1 - \frac{2,5}{100}\right) \cdot 230,94 = 225,167 \text{ В}$$

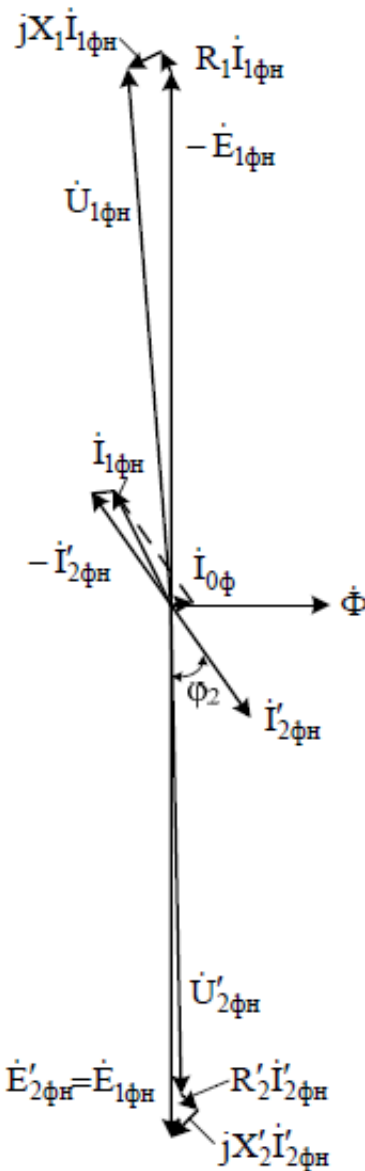


Рисунок 3.1 – Векторна діаграма трансформатора

Коефіцієнти трансформації:

$$k_I = \frac{U_{1\Phi H I}}{U_{2\Phi I}} = \frac{1732}{225,167} = 7,692;$$

$$k_{II} = \frac{U_{1\Phi H II}}{U_{2\Phi II}} = \frac{1732}{230,94} = 7,5.$$

Оскільки $k_I > k_{II}$, то перевантажений другий трансформатор.

Різниця коефіцієнтів трансформації:

$$\Delta k = k_I - k_{II} = 7,692 - 7,5 = 0,192.$$

Середній коефіцієнт трансформації:

$$k_{\text{сер}} = \sqrt{k_{\text{I}} \cdot k_{\text{II}}} = \sqrt{7,692 \cdot 7,5} = 7,596.$$

Різниця коефіцієнтів трансформації у відсотках від $k_{\text{сер}}$:

$$\Delta k_{\%} = \frac{\Delta k}{k_{\text{сер}}} \cdot 100\% = \frac{0,192}{7,596} \cdot 100\% = 2,532\%.$$

Урівноважувальний струм:

$$I_{\text{зр2}} = \Delta k_{\%} \cdot \frac{I_{2\text{фн}}}{2 \cdot U_{\text{к}\%}} = 2,532 \cdot \frac{144,338}{2 \cdot 4,5} = 40,605 \text{ А.}$$

Оскільки результуючий вторинний струм перевантаженого першого трансформатора не повинен перевищувати його номінального значення, то приймаємо

$$I_{2\text{II}} = I_{2\text{фн}} = 144,338 \text{ А.}$$

Струм, який перевантажений трансформатор віддає навантаженню:

$$I_{\text{навII}} = -I_{\text{зр2}} \cdot \cos(\varphi_{\text{к}} + \varphi_2) + \sqrt{\left(I_{\text{зр2}} \cdot \cos(\varphi_{\text{к}} + \varphi_2)\right)^2 - \left(I_{\text{зр2}}^2 - I_{2\text{фн}}^2\right)},$$

$$I_{\text{навII}} = |I_{\text{навII}}| = 105,529 \text{ А.}$$

Умова $I_{\text{нав}} < I_{2\text{фн}}$ виконується.

Напруга на шинах навантаження за рахунок дії урівноважувального струму дорівнює середньому значенню:

$$U_{2\text{сер}} = \frac{U_{1\text{фн}}}{k_{\text{сер}}} = \frac{1732}{7,596} = 228,035 \text{ В.}$$

Струми, що віддаються обома трансформаторами навантаженню однакові за значенням:

$$I_{\text{навI}} = I_{\text{навII}} = 105,529 \text{ А.}$$

Результуючий струм вторинної обмотки недовантаженого трансформатора:

$$I_{2I} = \sqrt{I_{\text{набI}}^2 + I_{\text{зр2}}^2 + 2 \cdot I_{\text{набI}} \cdot I_{\text{зр2}} \cdot \cos(\varphi_k + \varphi_2)} = 100,693 \text{ А.}$$

Ступінь завантаження трансформаторів результуючими струмами:

$$N_I = \frac{I_{2I}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100\% = \frac{100,693}{144,338} \cdot 100\% = 69,762 \text{ \%};$$

$$N_{II} = \frac{I_{2II}}{I_{2\text{фн}}} \cdot 100\% = \frac{144,338}{144,338} \cdot 100\% = 100 \text{ \%}.$$

Усталена потужність:

$$S_{\text{уст}} = 2 \cdot S_{\text{н}} = 2 \cdot 100 = 200 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3 \cdot U_{2\text{сер}} \cdot (I_{\text{набI}} + I_{\text{набII}}) = 3 \cdot 228,035 \cdot (105,529 + 105,529) = 144,4 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S = S_{\text{уст}} - S_{\Sigma} = 200 - 144,4 = 55,6 \text{ кВ} \cdot \text{А};$$

$$\Delta S_{\%} = \frac{\Delta S}{S_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{55,6}{200} \cdot 100\% = 27,807 \text{ \%}.$$

Трансформатори з однаковими коефіцієнтами трансформації і різними напругами короткого замикання

$$k_I = k_{II}, \quad U_{\text{кI}\%} \neq U_{\text{кII}\%}, \quad \Delta U_{\text{к}\%} = 8\%.$$

$$U_{\text{кII}} = \left(1 + \frac{\Delta U_{\text{к}\%}}{100}\right) \cdot U_{\text{к}\%}, \quad U_{\text{кII}} = 4,86 \text{ \%}.$$

Щоб запобігти перевантаженню, прийемо струм навантаження першого трансформатора

$$I_I = I_{2\text{фн}} = 144,338 \text{ А.}$$

Тоді другий трансформатор буде віддавати в навантаження струм

$$I_{II} = \frac{I_{2фн}}{1 + \frac{\Delta U_{к\%}}{100}} = \frac{144,338}{1 + \frac{8}{100}} = 133,646 \text{ А.}$$

Ступінь навантаження трансформаторів:

$$N_I = \frac{I_I}{I_{2фн}} \cdot 100\% = \frac{144,338}{144,338} \cdot 100\% = 100\%;$$

$$N_{II} = \frac{I_{II}}{I_{2фн}} \cdot 100\% = \frac{133,646}{144,338} \cdot 100\% = 92,593\%.$$

Сумарна потужність, що віддається трансформаторами навантаженню:

$$S_{\Sigma} = 3 \cdot U_{2фн} \cdot (I_I + I_{II}) = 3 \cdot 230,94 \cdot (144,338 + 133,646) = 192,6 \text{ кВ}\cdot\text{А.}$$

Недовикористана потужність:

$$\Delta S = S_{уст} - S_{\Sigma} = 200 - 192,6 = 7,4 \text{ кВ}\cdot\text{А};$$

$$\Delta S_{\%} = \frac{\Delta S}{S_{уст}} \cdot 100\% = \frac{7,4}{200} \cdot 100\% = 3,7 \text{ \%}.$$

Визначення ударних струмів КЗ

Ударний коефіцієнт для заданого трансформатора

$$K_{уд} = 1 + e^{-\pi \frac{R_k}{X_k}} = 1 + e^{-3,14 \frac{1,773}{3,641}} = 1,217.$$

Амплітуда усталеного струму КЗ:

для первинної обмотки –

$$I_{км1} = \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{1фн}}{U_{к\%}} = 1,41 \cdot 100 \cdot \frac{19,245}{4,5} = 603,01 \text{ А.}$$

для вторинної обмотки –

$$I_{км2} = \sqrt{2} \cdot 100 \cdot \frac{I_{2фн}}{U_{к\%}} = 1,41 \cdot 100 \cdot \frac{144,338}{4,5} = 4522,59 \text{ А.}$$

Ударні струми КЗ:

$$i_{\text{куд1}} = K_{\text{уд}} \cdot I_{\text{км1}} = 1,217 \cdot 603,01 = 733,86 \text{ А};$$

$$i_{\text{куд2}} = K_{\text{уд}} \cdot I_{\text{км2}} = 1,217 \cdot 4522,59 = 5504 \text{ А}.$$

4. ВАРІАНТИ ЗАВДАНЬ

Виходячи із даних табл. 3.1, необхідно для трансформатора:

- 1) визначити лінійні й фазні первинні та вторинні напруги й струми в номінальному режимі;
- 2) накреслити електричну схему заміщення однієї фази приведенного трансформатора, визначити її параметри;
- 3) розрахувати активну й реактивну складові напруги короткого замикання, зміну вторинної напруги; приведені значення вторинних напруг і струму при номінальному навантаженні;
- 4) записати рівняння напруг і струмів приведенного трансформатора при номінальному навантаженні і заданому значенні коефіцієнта потужності $\cos \varphi_2$;
- 5) визначити розподіл струмів навантаження між двома трансформаторам однакової (заданої) потужності при їх паралельній роботі на спільне навантаження з заданим $\cos \varphi_2$, а також недовикористану потужність цих трансформаторів для двох випадків:
 - 5.1) один із трансформаторів включений на відпайку +2,5%, а інший – на відпайку, що відповідає номінальній напрузі;
 - 5.2) напруга короткого замикання другого трансформатора на 8% більша, ніж першого, вказаного в табл. 1.1;
- 6) розрахувати значення ударних струмів короткого замикання первинної й вторинної обмоток трансформатора та їх кратності відносно номінальних струмів обмоток.

Таблиця 4.1 – Варіанти завдань

№ вар.	S_H , кВ·А	$U_{1лн}$, кВ	$U_{2лн}$, кВ	$U_{к\%}$, %	$I_{0\%}$, %	P_0 , кВт	P_k , кВт	Схема і група	$\cos \varphi_2$	Наванта- ження
1.	1000	6,3	0,23	8	2	3	12	Y/Y _H – 0	1	активне
2.	630	15,75	0,4	8	2	2,3	8,7	Δ/Y_H – 11	0,86	індуктивне
3.	400	10,5	0,4	5,5	3	1,3	5,4	Δ/Y – 11	0,46	ємнісне
4.	250	6,5	0,23	5,5	3	1,3	5,4	Δ/Y_H – 11	0,36	індуктивне
5.	16000	38,5	10,5	8	0,6	17,8	90	Y _H / Δ – 11	0	ємнісне
6.	6300	20	3,15	7,5	0,9	9,4	46,5	Y _H / Δ – 11	0,8	індуктивне
7.	25	0,38	0,23	4	3,2	0,105	0,6	Y/ Δ – 11	0	індуктивне
8.	100	6,3	0,23	4,5	2,6	0,31	1,97	Y/ Δ – 11	1	активне
9.	40	3,15	0,23	4,6	4,5	0,24	0,88	Y/Y _H – 0	0,45	ємнісне
10.	63	0,66	0,4	4	2,8	0,22	1,28	Y/Y _H – 0	0,65	індуктивне
11.	100	20	0,69	6,5	2,6	0,465	1,97	Y/ Δ – 11	0,85	ємнісне
12.	160	6,3	0,4	4,5	3,86	0,73	2,65	Y/Y _H – 0	0,7	індуктивне
13.	250	35	10,5	6,5	2,3	0,82	3,7	Y/ Δ – 11	0,2	ємнісне
14.	400	10	3,15	4,5	2,1	0,92	5,5	Y/ Δ – 11	1	активне
15.	630	3	0,4	5,5	2	1,42	7,6	Y/Y _H – 0	0	індуктивне
16.	1000	35	0,69	6,5	1,5	2,75	12,2	Y/Y _H – 0	0,92	ємнісне
17.	1600	20	6,3	6,5	1,4	3,65	16,5	Y/ Δ – 11	0,82	індуктивне
18.	630	35	10,5	6,5	2	1,7	7,6	Y/ Δ – 11	0,68	ємнісне
19.	25	0,66	0,4	4	3,2	0,125	0,6	Y/Y _H – 0	0,1	індуктивне
20.	40	6	0,69	4,5	3	0,15	0,88	Y/ Δ – 11	0,55	ємнісне
21.	63	6	0,23	4,5	4,5	0,36	1,28	Y/Y _H – 0	0,75	індуктивне
22.	250	10	0,4	4,7	3,68	1,05	4,2	Y/Y _H – 0	0,35	ємнісне
23.	25	6	0,23	4,5	5,15	0,17	0,6	Y/Y _H – 0	1	активне
24.	630	35	3,15	6,5	2	2	7,6	Y/ Δ – 11	0,6	індуктивне
25.	1000	10,5	6,3	5,5	5	3,3	12,2	Y/ Δ – 11	0,95	ємнісне
26.	160	20	0,4	6,5	2,4	0,66	2,65	Y/Y _H – 0	0,5	індуктивне
27.	6300	20	6,3	7,5	0,9	9,4	46,5	Y/ Δ – 11	0,5	ємнісне
28.	4000	35	10,5	7,5	1	6,7	33,5	Y/ Δ – 11	0,4	індуктивне
29.	16000	38,5	6,3	8	0,75	21	90	Y _H / Δ – 11	0,4	ємнісне
30.	2500	35	0,69	6,5	1,1	5,1	25	Y/Y _H – 0	1	активне

Примітка. В табл. 3.1 введені такі позначення:

S_H – номінальна повна потужність;

$U_{1лн}$ – номінальна лінійна напруга первинної обмотки;

$U_{2лн}$ – номінальна лінійна напруга вторинної обмотки;

$U_{к\%}$ – напруга короткого замикання;

$I_{0\%}$ – струм холостого ходу;

P_0 – потужність холостого ходу;

P_k – потужність короткого замикання;

$\cos \varphi_2$ - коефіцієнт потужності вторинної обмотки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Осташевський М.О. Електричні машини і трансформатори: навч. посібник / М.О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. В.І. Мілих. – Харків: ФОП Панов А.М., 2017. – 452 с.
2. Електричні машини і апарати: навчальний посібник / Ю.М. Куценко, В.Ф. Яковлев та ін. – К.: Аграрна освіта, 2013. – 449 с.
3. Розводюк М. П. Електричні машини. Задачі для самостійного розв'язування: навчальний посібник / М.П. Розводюк. – Вінниця: ВНТУ, 2016. – 65 с.