

ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
Кафедра гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**

до виконання курсового проекту

з дисципліни "Електричні машини"

за темою: «Розрахунок трансформатора»

для студентів III курсу

спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

факультету архітектури та будівництва

Кропивницький  
2023

Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту з дисципліни «Електричні машини» за темою: «Розрахунок трансформатора» для студентів III курсу спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» факультету архітектури та будівництва

Укладачі: к.т.н., доцент Литвиненко В.М., к.т.н., доцент Рагулін С.В.

Методичні рекомендації до виконання курсового проєкту затверджені на засіданні кафедри гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії


Протокол № 1 від “25” серпня 2023 року

Схвалено методичною комісією факультету архітектури та будівництва

Протокол від “30” серпня 2023 року № 1

Схвалено на Вченій раді факультету архітектури та будівництва

Протокол від “30” серпня 2023 року № 1

Завідувача кафедри \_\_\_\_\_  (Микола ВОЛОШИН)  
(підпис) (прізвище та ініціали)  
“30” серпня 2023 року

## ЗМІСТ

Вступ.....	4
1. Рекомендації до виконання курсового проєкту.....	5
2. Проєктування трансформатора.....	8
Список використаних джерел.....	15
Додаток 1. Приклад виконання розрахункового завдання.....	16
Додаток 2. Вихідні дані для виконання розрахункових завдань на основі прикладу, приведеному в Додатку 1.....	20
Додаток 3. Зразки титульних листів курсового проєкту.....	21

## ВСТУП

Вивчення деяких загальнонаукових, загальнотехнічних і спеціальних дисциплін завершується виконанням курсових проєктів (робіт).

Кількість курсових проєктів (робіт) визначається учбовими планами для кожної спеціальності.

Курсовий проєкт є письмовим звітом про проведені дослідження яких-небудь питань або проблем і отримані при цьому результати.

Курсові проєкти більшою мірою пов'язані з науковими дослідженнями або рішенням різних практичних задач і виконуються, як правило, по нетехнічних дисциплінах.

Виконання курсових проєктів (робіт) ставить своєю метою:

а) залучення студентів до практики професійної діяльності, виховання їх у дусі відповідальності за виконувану інженерно-технічну або дослідницьку роботу, прививання їм умінь і навиків творчої праці;

б) закріплення, поглиблення і узагальнення придбаних знань, і застосування їх до комплексного рішення конкретних інженерних, теоретичних або інших завдань;

в) прививає уміння і навиків в постановці наукових експериментів, проведенні розрахунків, користуванні довідковою літературою, оформленні звітної і проєктної документації, виконанні вимог стандартів і ін.

Креслення є графічним зображенням інженерної розробки і винні чітко і ясно виражати технічну думку автора роботи.

Записка пояснення містить обґрунтування розглянутого медичного устаткування, опису конструкції, принципу роботи, принципу відображення досліджуваного образу і інше на основі техніко-економічного аналізу і проведених розрахунків.

Курсові проєкти по своїй структурі різноманітніші, ніж курсові роботи, і можуть складатися з декількох частин залежно від характеру проведеної роботи і змісту учбової дисципліни. Незалежно від цього, в них повинно відбиватися наступне:

- а) обґрунтування актуальності вибраної теми і досліджуваних питань;
- б) аналіз стану рішень в науці та на практиці питань, які вивчаються;
- в) формулювання початкових посилок, гіпотез і завдань дослідження або практичної роботи, що проводиться;
- г) методика і зміст дослідження;
- д) аналіз отриманих результатів;
- е) формулювання висновків і рекомендацій.

До роботи можуть також пред'являтися специфічні вимоги, визначувані її характером.

Метою курсового проєкту є проектування трансформатора.

## 1. РЕКОМЕНДАЦІЇ ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЄКТУ

Для виконання курсового проєкту треба спочатку вивчити необхідний теоретичний матеріал по одному з рекомендованих підручників або по даному посібнику. Уважно прочитати завдання на розрахунково-графічну роботу і значення параметрів елементів електричного кола для свого варіанта.

При рішенні задач, які входять в завдання, необхідно чітко вказувати порядок рішення і використані при розрахунку формули. В ході рішення задачі не слід міняти одного разу прийняті напрямки струмів і найменування вузлів, опорів, а також позначення, завданні умовами завдання. При рішенні однієї і тої ж задачі різними методами одну і ту ж величину необхідно позначати одним і тим же буквеним символом.

Розрахунок кожної величини, яка підлягає розрахунку, необхідно виконувати спочатку в загальному виді, а потім в отриману формулу підставити числові значення і привести кінцевий результат, вказуючи одиниці вимірювання.

Кінцевий результат по кожному пункту задачі повинен бути виділений з загального тексту рішення задачі. Рішення задач не слід перенавантажувати детальними математичними перетвореннями. Кожний етап рішення задачі повинен мати коротке пояснення.

Результати розрахунку необхідно приводити з точністю до трьох - чотирьох цифр.

При оформленні рішення задачі необхідно спочатку чітко викласти умови задачі, привести початкову електричну схему і проставити на неї буквені і числові значення параметрів елементів. Всі малюнки, схеми і графіки повинні бути виконані акуратно за допомогою інструментів для креслення. Графіки необхідно виконувати на міліметровому папері, вказуючи вибраний масштаб. Допускається використання логарифмічних шкал, а також розтягнутих шкал зі зміщеним нулем. На осях координат повинні бути вказані значення величин і одиниця вимірювання.

Тематика курсових проєктів визначається кафедрами і закріплюється за студентами з урахуванням їх побажань і інтересів. Студент може запропонувати свою тему і, у разі затвердження її кафедрою, приступити до розробки.

Кожному студентові призначається керівник, який видає індивідуальні завдання відповідно темі проєкту, контролює хід виконання і проводить консультації. У тих випадках, коли курсові проєкти виконуються за завданням або тематикою конкретного підприємства, наукової установи, керівником може бути працівник відповідної організації; він здійснює керівництво самостійно або спільно з викладачем кафедри.

На підставі індивідуального завдання слід скласти індивідуальний план-графік підготовки курсового проєкту, перерахувавши в нім все, що повинне бути зроблене для виконання завдання, вказавши терміни. Індивідуальний план затверджується керівником і для студента є основним регламентуючим документом при виконанні курсової роботи.

У всіх випадках, коли з якої-небудь причини зривається виконання індивідуального плану або виникають якісь утруднення, неясності, слід відразу ж звертатися до керівника або завідувача відповідної кафедри, не залишаючи питання невирішеними.

Підготовлений курсовий проєкт повинна бути оформлена належним чином. Текстовий матеріал акуратно, без помарок, пишеться від руки або друкується з одного боку стандартного листа формату А4. Разом з титульним листом, змістом, індивідуальним завданням і списком використаної літератури він повинен бути зброшурований і поміщений в теку або переплетений. Креслення, що додаються, схеми, програми для комп'ютера і інше виконуються відповідно до стандартів.

Курсові проєкти захищаються студентами в спеціальних комісіях з двох-трьох викладачів кафедри. При цьому можуть бути присутніми також представники тих підприємств чи наукових і інших установ, за замовленням або на базі яких виконувалися роботи.

Захист курсового проєкту складається з короткої доповіді студента (в межах 10 хвилин) і відповідей на питання. У доповіді повинні бути названі прізвище,

учені ступінь і звання керівника, тема, обґрунтований її вибір, даний аналіз наявних рішень, викладений характер проведеного дослідження або розробки і сформульовані висновки. Доповідь прийнято ілюструвати спеціально підготовленими кресленнями, схемами, діаграмами і ін. Можуть також демонструватися розроблені і виготовлені що захищає роботу прилади, механізми і ін. Відповіді даються як на поставлені присутніми питання, так і на критичні зауваження, якщо вони є у відгуку керівника або висловлюються в ході захисту.

Результати захисту оцінюються диференційованій (відмінно, добре, задовільно, незадовільно). При цьому враховуються: оцінка, висловлена у відгуку, якість доповіді при захисті, чіткість і правильність відповідей на питання, рівень проявлених знань.

Захищені курсові проекти зберігаються на кафедрі, і, при необхідності, можуть видаватися іншим студентам по дозволу завідувача кафедрою.

## **1.2. Основні етапи виконання курсового проєкту:**

1. Ознайомлення з завданнями курсового проєкту, представленими в методичних рекомендаціях.
2. Складання плану виконання курсового проєкту.
3. Підбір відповідної літератури.
4. Виконання всіх розділів курсового проєкту, які перераховані вище.



## 2. ПРОЄКТУВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

Трансформатором називається статичний електромагнітний апарат змінного струму, який має дві (або більше) індуктивно зв'язані обмотки і призначений для перетворення за рахунок електромагнітної індукції електричної енергії однієї системи в електричну енергію іншої системи.

У загальному випадку вторинна (вторинні) система може відрізнятися від первинної значеннями напруги і струму, числом фаз, формою кривої напруги (струму), частотою.

При підключенні первинної обмотки до джерела змінного струму створюється магнітний потік  $\Phi$ , що зчіплюється з витками обох обмоток і наводить в них ЕРС. Миттєві значення останніх такі:

у первинній обмотці

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt};$$

у вторинній обмотці:

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt},$$

де  $w_1$  та  $w_2$  – кількість витків первинної та вторинної обмоток відповідно.

У разі підключення трансформатора до джерела змінного струму синусоїдної форми діючі значення ЕРС, що наводяться у обмотках трансформатора:

$$E_1 = 4,44 f_1 w_1 \Phi_M; \quad E_2 = 4,44 f_2 w_2 \Phi_M.$$

Коефіцієнт трансформації:

$$k = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

У практичних розрахунках з деяким припущенням використовують іншу формулу:

$$k \cong \frac{U_{1н}}{U_{20}}, \quad (1.1)$$

де  $U_{1н}$   $U_{20}$  – номінальна напруга на затискачах первинної обмотки і напруга холостого ходу на затискачах вторинної обмотки трансформатора відповідно. У даному випадку нехтують втратами у сталі.

Номінальна потужність трансформатора – повна його потужність при номінальних режимах:

$$S_H = I_{1н} \cdot U_{1н}, \text{ для однофазного;} \quad (1.2)$$

$$S_H = 3U_{1нф} I_{1нл} = \sqrt{3}U_{1нл} I_{1нл}, \text{ для трифазного.}$$

Номінальний струм вторинної обмотки:

$$I_{2H} = \frac{S_H}{U_{20}}. \quad (1.3)$$

Коефіцієнт завантаження трансформатора:

$$\beta = \frac{I_2}{I_{2H}}. \quad (1.4)$$

ККД трансформатора розраховується за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_k}{\beta S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_k}, \quad (1.5)$$

де  $P_0$  і  $P_k$  – потужності, що споживає трансформатор відповідно у режимах х.х. (магнітні втрати) і к.з. (електричні втрати).

Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, при якому магнітні втрати дорівнюють електричним:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}. \quad (1.6)$$

У загальному випадку параметри первинної обмотки трансформатора відрізняється від параметрів вторинної обмотки. Ця різниця найбільш відчутна при великих коефіцієнтах трансформації, що викликає труднощі під час побудови векторних діаграм, оскільки у цьому випадку вектори електричних величин первинної обмотки відчутно відрізняються по своїй довжині від однойменних векторів вторинної обмотки. Вказані труднощі усуваються зведенням всіх параметрів трансформатора до однакової кількості витків, зазвичай до числа витків первинної обмотки  $w_1$ . З цією метою всі величини, що характеризують вторинне коло трансформатора, – ЕРС, напругу, струм і опір – перераховуються на кількість витків  $w_1$  первинної обмотки.

Таким чином, замість реального трансформатора з коефіцієнтом трансформації  $k$  отримуємо еквівалентний трансформатор з  $k = w_1 / w'_2 = 1$ , де  $w'_2 = w_1$ . Такий трансформатор називають *зведеним*. Але зведення вторинних параметрів трансформатора не повинно відбитися на енергетичних показниках – усі потужності та фазові зсуви у вторинній обмотці зведеного трансформатора повинні залишитись такими, як і в реальному трансформаторі. Так, електромагнітна потужність вторинної обмотки реального трансформатора  $E_2 I_2$  повинна дорівнювати електромагнітній потужності вторинної обмотки зведеного трансформатора:

$$E_2 I_2 = E'_2 I'_2$$

Тоді зведений вторинний струм, зведена вторинна ЕРС, зведена напруга вторинної обмотки відповідно:

$$I'_2 = \frac{I_2}{k}; E'_2 = kE_2; U'_2 = kU_2.$$

З умови рівноваги втрат в активному опорі вторинної обмотки, зведений активний опір:

$$r'_2 = r_2 k^2$$

Зведений індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки:

$$x'_2 = x_2 k^2.$$

Зведені повні опори вторинної обмотки та навантаження:

$$Z'_2 = Z_2 k^2; Z'_n = Z_n k^2$$

Рівняння ЕРС та струмів для зведеного трансформатора мають вигляд:

$$\begin{aligned} \dot{U}_1 &= (-\dot{E}_1) + \dot{I}_1 Z_1 = (-\dot{E}_1) + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z'_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x'_2 - \dot{I}_2 r'_2; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2). \end{aligned} \quad (1.7)$$

Ці рівняння встановлюють аналітичний зв'язок між параметрами трансформатора в усьому діапазоні навантажень від режиму х.х. до номінальної.

Ще одним засобом, що полегшує дослідження електромагнітних процесів та розрахунок трансформаторів, є застосування електричної схеми заміщення зведеного трансформатора. На рис 1.1 наведена еквівалентна схема зведеного трансформатора, на якій опори  $r$  та  $x$  умовно винесені з відповідних обмоток та включені послідовно до них. Як було встановлено раніше, у зведеному трансформаторі  $k=1$ , а тому  $E_1 = E'_2$ . У результаті точки  $A$  та  $a$ , а також точки  $X$  та  $x$  на схемі мають однакові потенціали, що дозволяє електрично з'єднати вказані точки, отримавши Т-подібну схему заміщення зведеного трансформатора (рис 1.2). На даній схемі магнітний зв'язок між колами замінено електричним.

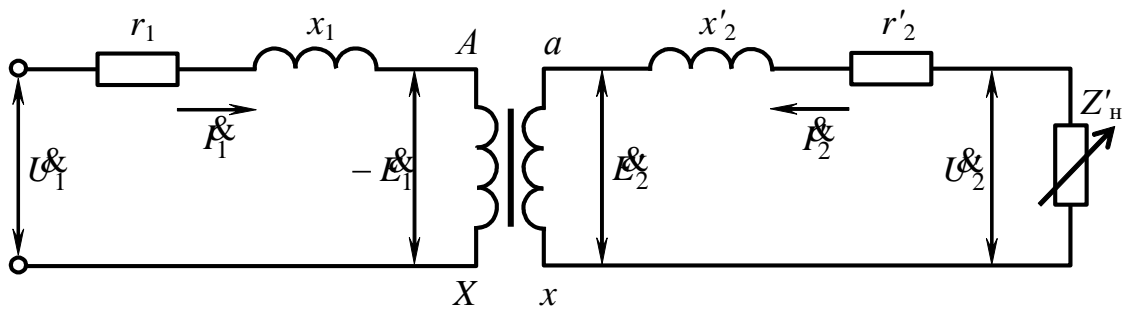


Рис.1.1. Еквівалентна схема зведеного трансформатора

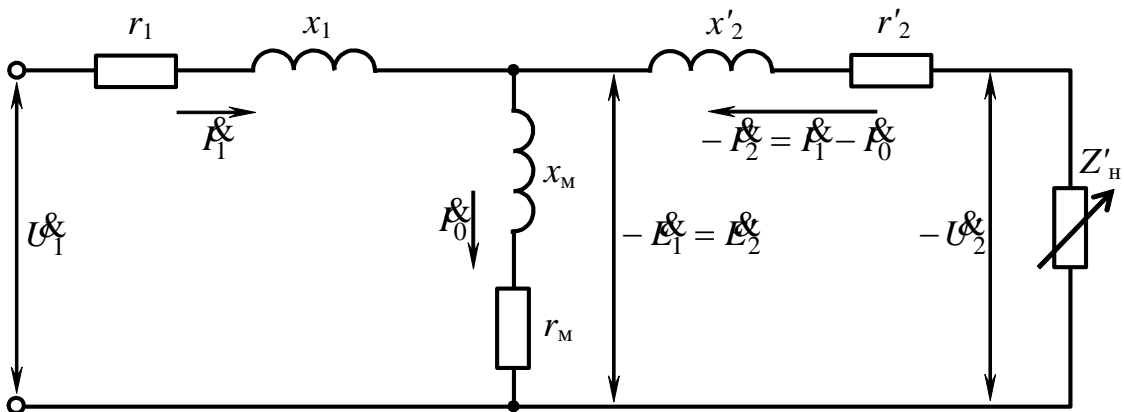


Рис.1.2. Схема заміщення зведеного трансформатора

Схема заміщення трансформатора задовольняє всім рівнянням ЕРС та струмів зведеного трансформатора (1.4) і являє собою сукупність трьох гілок:

- а) первинної – з опором  $Z_1 = r_1 + jx_1$  і струмом  $I_1$ ;
- б) намагнічування – з опором  $Z_m = r_m + jx_m$  і струмом  $I_0$ ;
- в) вторинної із двома опорами – опором вторинної обмотки  $Z'_2 = r'_2 + jx'_2$ , опором навантаження  $Z'_H = r'_H + jx'_H$  та струмом  $I'_2$ .

Зміною опору навантаження  $Z'_H$  на схемі заміщення можуть бути відтворені всі режими роботи трансформатора.

Параметри кола намагнічення  $Z_m = r_m + jx_m$  визначаються струмом х.х. Наявність у цьому колі активної складової  $r_m$  обумовлено магнітними втратами в трансформаторі.

Всі параметри схеми заміщення, за виключенням  $Z'_2$ , є постійними для даного трансформатора та можуть бути визначені за результатами дослідів к.з. та х.х.

Опори первинної і зведеної вторинної обмоток:

$$R_1 = R'_2 = \frac{R_K}{2}; \quad X_1 = X'_2 = \frac{X_K}{2}. \quad (1.8)$$

Опір випробувального короткого замикання та його складові:

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к}}}{I_{1\text{н}}}; \quad (1.9)$$

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{н}}^2}; \quad X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2}. \quad (1.10)$$

Реальні опори вторинної обмотки:

$$R_2 = \frac{R'_2}{k^2}; \quad X_2 = \frac{X'_2}{k^2}. \quad (1.11)$$

Повний опір первинного кола в режимі х.х. та його складові:

$$Z_{10} = \frac{U_{1\text{н}}}{I_0}; \quad (1.12)$$

$$R_{10} = \frac{P_0}{I_0^2}; \quad X_{10} = \sqrt{Z_{10}^2 - R_{10}^2}. \quad (1.13)$$

Опори гілки намагнічування:

$$R_0 = R_{10} - R_1; \quad X_0 = X_{10} - X_1. \quad (1.14)$$

Опори обмоток є причиною втрати напруги у вторинній обмотці трансформатора:

$$\Delta U_2 \% = \beta U_{\text{к}} \% \cos(\varphi_{\text{к}} - \varphi_2); \quad (1.15)$$

$$\cos \varphi_{\text{к}} = \frac{R_{\text{к}}}{Z_{\text{к}}}.$$

Напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора визначають за формулою:

$$U_2 = U_{20} \frac{100 - \Delta U_2 \%}{100}. \quad (1.16)$$

Скориставшись схемою заміщення зведеного трансформатора та основних рівнянь ЕРС і струмів (1.7), побудуємо векторну діаграму трансформатора.

Побудову діаграми (рис. 1.3) слід починати з вектора максимального значення основного магнітного потоку  $\Phi_{\text{max}} = E_1 / (4,44 f w_1)$ .

Вектор струму  $I_0$  випереджає по фазі вектор потоку  $\Phi_{\text{max}}$  на кут  $\delta$ , а ЕРС  $\mathcal{E}_1$  та  $\mathcal{E}_2$  відстають від цього вектора на кут  $90^\circ$ .

Кут магнітних втрат  $\delta$  визначають за формулами:

$$\cos \varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1\text{н}} I_0}; \quad \delta = 90^\circ - \varphi_0. \quad (1.17)$$

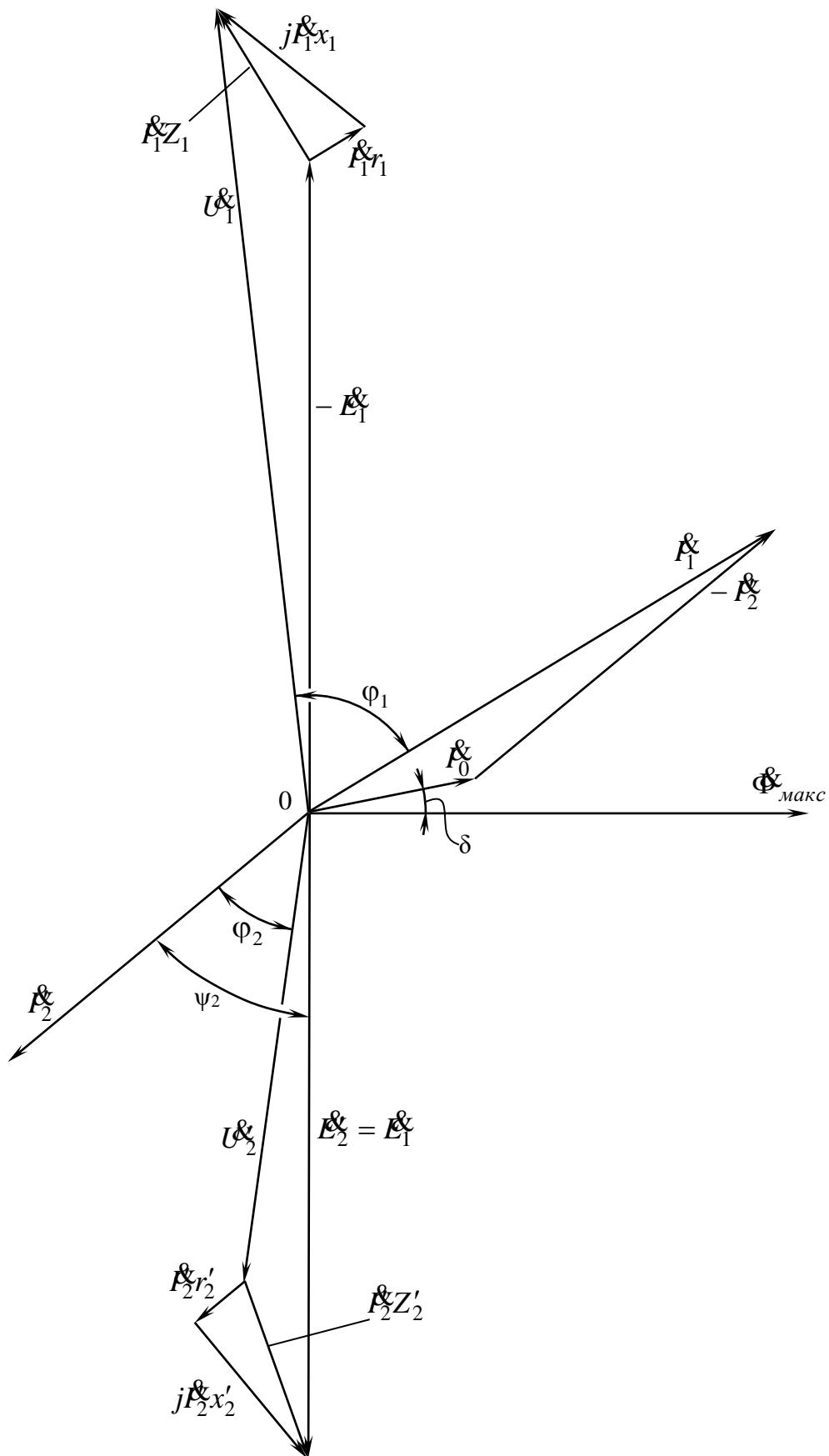


Рис.1.3. Векторна діаграма зведеного трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

Далі будемо вектор  $I'_2$ . Для визначення кута зсуву фаз між  $E'_2$  та  $I'_2$  необхідно знати характер навантаження. Припустимо, що навантаження трансформатора активно-індуктивне. Тоді вектор  $I'_2$  відстає по фазі від  $E'_2$  на кут

$$\psi_2 = \arctg[(x'_2 + x'_n)/(r'_2 + r'_n)],$$

що обумовлений як родом зовнішнього навантаження, так і власними опорами вторинної обмотки.

Для побудови вектора вторинної напруги  $U'_2$  необхідно від вектора ЕРС  $E'_2$  відняти вектори падіння напруги  $jI'_2x'_2$  і  $I'_2r'_2$ . З цією метою з кінця вектора  $E'_2$  перпендикулярно напрямку вектора струму  $I'_2$  відкладаємо вектор  $jI'_2x'_2$ . Потім, перпендикулярно до нього додаємо вектор  $I'_2r'_2$ . Доданок  $I'_2Z'_2 = I'_2r'_2 + jI'_2x'_2$  є трикутником внутрішніх падінь напруги у вторинній обмотці. Іншими словами – трикутником втрат у вторинній обмотці. Потім із точки 0 проводимо вектор  $U'_2 = E'_2 + (-I'_2Z'_2)$  який випереджає по фазі струм  $I'_2$  на кут  $\varphi_2 = \arctg(x'_n/r'_n)$ .

Вектор первинного струму будемо як векторний доданок:  $I_1 = I'_0 + (-I'_2)$ . Вектор  $-I'_2$  проводимо з кінця вектора  $I_0$  протилежно вектору  $I'_2$ .

Вектор  $U_1$  будемо як доданок  $U_1 = -E_1 + I_1Z_1$ . Для цього до вектора  $-E_1$ , що випереджає по фазі вектор потоку  $\Phi_{\max}$  на  $90^\circ$ , додаємо вектори внутрішнього падіння напруги первинної обмотки: вектор  $I_1r_1$ , паралельний струму  $I_1$  і вектор  $jI_1x_1$ , що випереджає вектор струму  $I_1$  на  $90^\circ$ . Доданок  $I_1Z_1 = I_1r_1 + jI_1x_1$  є трикутником внутрішніх падінь напруги у первинній обмотці. Іншими словами – трикутником втрат у первинній обмотці. З'єднавши точку 0 з кінцем вектора  $I_1Z_1$  одержимо вектор  $U_1$ , який випереджає по фазі вектор  $I_1$  на кут  $\varphi_1$ .

Згідно з завданням повинен бути спроектований однофазний трансформатор.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Осташевський М.О., Юр'єва О.Ю. Електричні машини і трансформатори. – Київ: Каравела, 2018. 452с.
2. Розрахунок електричних кіл та електротехнічних пристроїв : навч. посібник/ В.Ф. Болюх, К.В. Коритченко, В.С. Марков, І.В. Поляков. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. 288 с.
3. Бахор З.М., Журахівський А.В. Проектування підстанцій електричних мереж. - Львів: Львівська політехніка, 2019. 308с.
4. Рудницький В.Г.- Внутрішньозаводське електропостачання. Курсове проектування: Навчальний посібник. - Суми: ВТД''Університетська книга'', 2006. 153с.
5. Принц М.В., Цимбалістий В.М. Освітлювальне і силове електроустаткування. Монтаж і обслуговування. - Львів: Оріяна-Нова, 2005. 296с.
6. Півняк Г.Г., Довгань В.П., Шкрабець Ф.П. Електричні машини: Навч. посібник. – Д.: Національний гірничий університет, 2003. 327 с.



### Приклад виконання розрахункового завдання

Згідно з завданням повинен бути спроектований однофазний трансформатор.

#### 1.1. Вихідні дані для розрахунку

Для однофазного трансформатора з номінальною потужністю  $S_H=100\text{ВА}$ , відомі номінальна напруга на затискачах первинної обмотки  $U_{1H}=220\text{В}$ , напруга х.х. на затискачах вторинної обмотки трансформатора  $U_{20}=12\text{В}$ , напруга к.з.  $U_K\%=18\%$ , потужність к.з.  $P_K=11\text{Вт}$ , потужність х.х.  $P_0=5\text{Вт}$ , струм х.х.  $I_0\%=29\%$ . Навантаження активно-індуктивне з коефіцієнтом потужності  $\cos\varphi_2=0,85$ .

Визначити: а) коефіцієнт трансформації  $k$ ; б) номінальні струми обмоток  $I_{1H}$  та  $I_{2H}$ ; в) кут магнітних втрат  $\delta$ ; г) параметри схеми заміщення; д) навантаження, за якого трансформатор має максимальний ККД; максимальне значення ККД.

Побудувати: а) зовнішню характеристику трансформатора  $U_2=f_1(\beta)$ , де  $\beta$  – коефіцієнт навантаження трансформатора; б) залежність ККД від навантаження  $\eta=f_2(\beta)$ ; в) векторну діаграму трансформатора для номінального навантаження.

#### 1.2. Розрахунок трансформатора

Коефіцієнт трансформації:

$$k \cong \frac{U_{1H}}{U_{20}} = \frac{220}{12} = 18,3.$$

Номінальний струм первинної обмотки:

$$I_{1H} = \frac{S_H}{U_{1H}} = \frac{100}{220} = 0,45\text{А}.$$

Для визначення кута магнітних втрат  $\delta$  знаходимо струм х.х. і  $\cos\varphi_0$ :

$$I_0 = 0,29 I_{1H} = 0,29 \cdot 0,45 = 0,13\text{А};$$

$$\cos\varphi_0 = \frac{P_0}{U_{1H} I_0} = \frac{1,2}{220 \cdot 0,13} = 0,041, \quad \varphi_0 = 87,6^\circ.$$

$$\delta = 90^\circ - \varphi_0 = 90^\circ - 87,6^\circ = 2,4^\circ.$$

Визначаємо параметри схеми заміщення.

Опір випробувального короткого замикання та його складові:

$$Z_{\text{к}} = \frac{U_{\text{к}}}{I_{1\text{н}}} = \frac{0,18 \cdot 220}{0,45} = 88 \text{ Ом};$$

$$R_{\text{к}} = \frac{P_{\text{к}}}{I_{1\text{н}}^2} = \frac{11}{0,45^2} = 54,3 \text{ Ом};$$

$$X_{\text{к}} = \sqrt{Z_{\text{к}}^2 - R_{\text{к}}^2} = \sqrt{88^2 - 54,3^2} = 69,2 \text{ Ом}.$$

Опори первинної і зведеної вторинної обмоток:

$$R_1 = R_2' = \frac{R_{\text{к}}}{2} = \frac{54,3}{2} = 27,2 \text{ Ом};$$

$$X_1 = X_2' = \frac{X_{\text{к}}}{2} = \frac{69,2}{2} = 34,6 \text{ Ом}.$$

Реальні опори вторинної обмотки:

$$r_2 = \frac{r_2'}{k^2} = \frac{27,2}{18,3^2} = 0,081 \text{ Ом};$$

$$x_2 = \frac{x_2'}{k^2} = \frac{34,6}{18,3^2} = 0,1 \text{ Ом}.$$

Повний опір первинного кола в режимі х.х. та його складові:

$$z_{10} = \frac{U_{1\text{н}}}{I_0} = \frac{220}{0,13} = 1692 \text{ Ом};$$

$$r_{10} = \frac{P_0}{I_0^2} = \frac{5}{0,13^2} = 295 \text{ Ом};$$

$$x_{10} = \sqrt{z_{10}^2 - r_{10}^2} = \sqrt{1692^2 - 295^2} = 1666 \text{ Ом}.$$

Опори гілки намагнічування:

$$r_0 = r_{10} - r_1 = 295 - 27,2 = 267,8 \text{ Ом};$$

$$x_0 = x_{10} - x_1 = 1666 - 34,6 = 1631,4 \text{ Ом}.$$

Коефіцієнт навантаження, за якого трансформатор має максимальний ККД:

$$\beta_{\text{опт}} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{\text{к}}}} = \sqrt{\frac{5}{11}} = 0,67.$$

Максимальне значення ККД:

$$\eta_{\max} = 1 - \frac{2P_0}{\beta_{\text{опт}} S_H \cdot \cos \varphi_2 + 2P_0} = 1 - \frac{2 \cdot 5}{0,45 \cdot 100 \cdot 0,85 + 2 \cdot 5} = 0,79$$

Для побудови зовнішньої характеристики  $U_2=f_1(\beta)$  знаходимо втрати напруги у вторинній обмотці трансформатора:

$$\Delta U_2 \% = \beta U_K \% \cos(\varphi_K - \varphi_2)$$

$$\cos \varphi_K = \frac{r_K}{z_K} = \frac{54,3}{88} = 0,62; \varphi_K = 51,9.$$

Напругу на затискачах вторинної обмотки трансформатора визначаємо за формулою:

$$U_2 = U_{20} \frac{100 - \Delta U_2 \%}{100}.$$

Задаючись різними значеннями  $\beta$ , визначаємо напругу  $U_2$ .

Для побудови залежності  $\eta=f_2(\beta)$ , ККД розраховуємо за формулою:

$$\eta = 1 - \frac{P_0 + \beta^2 P_K}{\beta S_H \cdot \cos \varphi_2 + P_0 + \beta^2 P_K}.$$

Результати розрахунків  $U_2=f_1(\beta)$  та  $\eta=f_2(\beta)$  зводимо в табл. 1.

Характеристики показані на рис.1.4.

Таблиця 1

$\beta$	$\Delta U_2\%$	$U_2, \text{В}$	$\eta$
0	0	12,0	0
0,05	0,8	11,9	0,46
0,1	1,7	11,8	0,62
0,2	3,4	11,6	0,76
0,4	6,8	11,2	0,83

$\beta$	$\Delta U_2\%$	$U_2, \text{В}$	$\eta$
0,6	10,1	10,8	0,85
0,8	13,5	10,4	0,85
1	16,9	10,0	0,84
1,2	20,3	9,6	0,83

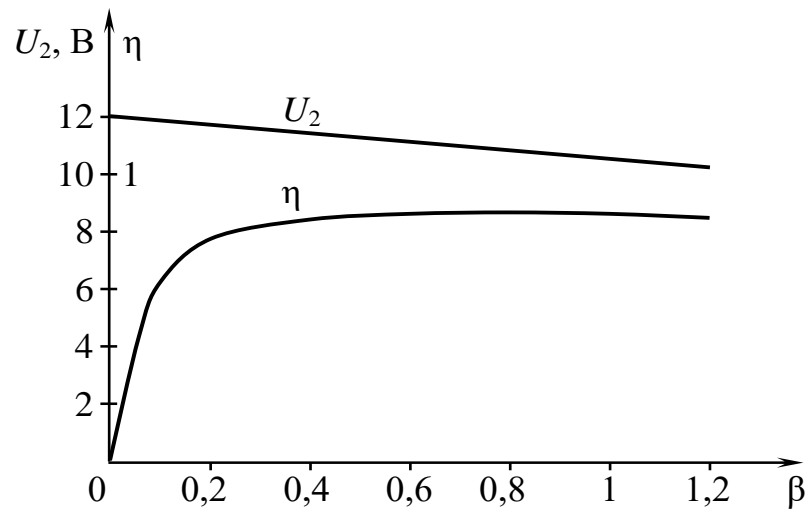


Рис.1.4. Залежність  $U_2=f_1(\beta)$  та  $\eta=f_2(\beta)$

Для побудови векторної діаграми знаходимо зведені параметри вторинної обмотки.

$$U'_2 = kU_2 = 18,3 \cdot 10 = 183 \text{ В};$$

$$I_2 = \frac{S_{\text{н}}}{U_2} = \frac{100}{10} = 10 \text{ А};$$

$$I'_2 = \frac{I_2}{k} = \frac{10}{18,3} = 0,55 \text{ А}.$$

Падіння напруги (втрати) в первинній обмотці:

$$I_1 r_1 = 0,45 \cdot 27,2 = 12,2 \text{ В}; \quad I_1 x_1 = 0,45 \cdot 34,6 = 15,6 \text{ В}.$$

Падіння напруги (втрати) у вторинній обмотці:

$$I'_2 r'_2 = 0,55 \cdot 27,2 = 15 \text{ В}; \quad I'_2 x'_2 = 0,55 \cdot 34,6 = 19 \text{ В}.$$

Побудову діаграми при невизначеному  $\mathcal{E}_2$  слід починати з вектора  $U'_2$ .

Вектор  $\mathcal{E}_2$  відстає від  $U'_2$  на  $\varphi_{\text{н}}$ .

Далі будуємо трикутник втрат у вторинній обмотці; далі – вектор  $\mathcal{E}'_2$  як суму  $\mathcal{E}_2 = U'_2 + \mathcal{E}'_2$ .

Вектор потоку  $\Phi_{\text{max}}$  випереджає  $\mathcal{E}'_2$  на кут  $90^\circ$ .

Далі порядок побудови діаграми не відрізняється від описаного вище.

## Додаток 2

Таблиця 2

**Вихідні дані, у відповідності з варіантом, для розрахунку трансформатора**

№ варіанта	Номинальна потужність трансформатора $P_2$ , кВт	Напруга на затискачах первинної обмотки $U_{1н}$ , В	Напруга х.х. на затискачах вторинної обмотки $U_{20}$ , В	Напруга к.з. $U_k$ , %	Потужність к.з. $P_k$ , Вт	Потужність х.х. $P_0$ , Вт	Струм х.х. $I_0$ , %	Коефіцієнт потужності $\cos\varphi_2$
1	100	220	12	18	11	5	29	0,85
2	110	220	11	17	10	4	27	0,82
3	105	220	13	19	12	3,5	28	0,84
4	115	220	14	16	13	4,5	26	0,83
5	100	220	12	18	11	5	30	0,85
6	110	220	11	17	10	4	29	0,82
7	105	220	13	19	12	3,5	27	0,84
8	115	220	14	16	13	4,5	28	0,83
9	100	220	12	18	11	5	26	0,85
10	110	220	11	17	10	4	30	0,82
11	105	220	13	19	12	3,5	29	0,84
12	115	220	14	16	13	4,5	27	0,83
13	100	220	12	18	11	5	28	0,85
14	110	220	11	17	10	4	26	0,82
15	105	220	13	19	12	3,5	30	0,84
16	115	220	14	16	13	4,5	29	0,83
17	100	220	12	18	11	5	27	0,85
18	110	220	11	17	10	4	28	0,82
19	105	220	13	19	12	3,5	26	0,84
20	115	220	14	16	13	4,5	30	0,83
21	100	220	12	18	11	5	29	0,85
22	110	220	11	17	10	4	27	0,82
23	105	220	13	19	12	3,5	28	0,84
24	115	220	14	16	13	4,5	26	0,83
25	110	220	11	17	11	4	30	0,85

### **Додаток 3. Зразки титульних листів курсового проєкту**

**ХЕРСОНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ АГРАРНО-ЕКОНОМІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**Кафедра гідротехнічного будівництва, водної та електричної інженерії**

**КУРСОВИЙ ПРОЄКТ**

з \_\_\_\_\_  
(назва дисципліни)

на тему: \_\_\_\_\_  
 \_\_\_\_\_

Студента (ки) \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_ групи  
 напряму підготовки \_\_\_\_\_  
 спеціальності \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(прізвище та ініціали)

Керівник \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_  
(посада, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)

Національна шкала \_\_\_\_\_  
 Кількість балів: \_\_\_\_\_ Оцінка: ECTS

\_\_\_\_\_

Члени комісії

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

\_\_\_\_\_  
(підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

( повне найменування вищого навчального закладу )

Інститут, факультет, відділення \_\_\_\_\_

Кафедра, циклова комісія \_\_\_\_\_

Освітньо-кваліфікаційний рівень \_\_\_\_\_

Напрямок підготовки \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

Спеціальність \_\_\_\_\_

(шифр і назва)

**ЗАТВЕРДЖУЮ**

**Завідувач кафедри, голова циклової комісії** \_\_\_\_\_

“ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року

**З А В Д А Н Н Я  
НА КУРСОВИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ**

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи \_\_\_\_\_

керівник роботи \_\_\_\_\_,

( прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “ \_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 20\_\_ року № \_\_\_\_\_

2. Строк подання студентом роботи \_\_\_\_\_

3. Вихідні дані до роботи \_\_\_\_\_

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити) \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень)

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_



## 6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

7. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_

## КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів курсової роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка

Студент

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)

Керівник роботи

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (прізвище та ініціали)