

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання практичних завдань і
самостійної роботи з дисципліни
«Спеціальний курс електричних машин»
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(освітня програма «Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання**

Методичні вказівки до виконання практичних завдань і самостійної роботи з дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання / Укл.: Т. П. Солодовнікова, О.О. Шлянін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 34 с.

Укладачі: Т. П. Солодовнікова, старш. викл.,
О.О. Шлянін, старш. викл.

Рецензент В. Г. Савельєв, доцент

Відповідальний
за випуск І.Д. Галушко, зав.лаб.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 7
від «01» травня 2018 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол № 8
від «29» травня 2018 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Теоретичні відомості та задачі.....	5
1.1 Використання теорії багатообмоткового трансформатора для визначення індуктивних параметрів.....	5
1.2 Визначення електромагнітних характеристик трансформаторів та їх параметрів.....	7
1.3 Визначення напруги короткого замикання між обмотками трансформатора, що довільно розміщені на стрижні.....	8
1.4 Використання методу потужності для визначення опорів складних обмоток трансформаторів.....	10
1.5 Розрахунок параметрів автотрансформаторів.....	12
1.6 Визначення параметрів короткого замикання трансформатора з декількома ступенями свободи.....	18
1.7 Розрахунок параметрів перехідних процесів трансформаторів.....	19
2 Самостійна робота.....	25
2.1 Початкові дані для самостійної роботи.....	25
2.2 Завдання самостійної роботи.....	28
Рекомендована література.....	30

ВСТУП

У відповідності з навчальним планом дисципліна «Спеціальний курс електричних машин» (СКЕМ) вивчається студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») у восьмому семестрі. В професійній діяльності спеціаліста з електромеханіки виникають практичні питання при різноманітних режимах роботи електрообладнання. Для набуття навиків вирішення цих питань при вивченні дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» студент повинен самостійно вирішувати комплексні питання сталих та перехідних режимів роботи трансформаторів. Навчальним планом зі СКЕМ передбачено 4 години практичних занять.

В методичних вказівках крім практичних завдань наведені також завдання для самостійної роботи, які мають короткі вказівки та перелік посилань на учбову та методичну літературу.

Працюючи над матеріалом дисципліни, бажано користуватись одним із рекомендованих джерел, оскільки завдяки використанню однозначних позначень та визначень полегшується його засвоєння. Додаткову літературу необхідно використовувати для поглиблення знань з окремих тем після повного попереднього опрацювання розділу дисципліни.

1 ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ЗАДАЧІ

1.1 Використання теорії багатообмоткового трансформатора для визначення індуктивних параметрів

Для багатообмоткових трансформаторів формула для визначення напруги короткого замикання (КЗ) між будь-якими двома обмотками має вид

$$U_p - U_m = \sum_{q=2}^n Z_{\sigma mpq} \cdot i_q, \quad (1.1)$$

$$\text{де } Z_{\sigma mpq} = \frac{1}{2} (Z_{\sigma mp} + Z_{\sigma mq} - Z_{\sigma pq}).$$

При цьому, полю розсіювання пари обмоток – магнітному полю при рівності нулю сумарної магніторушійної сили (ΣMPC) обмоток – відповідає поле при зустрічному послідовному вмиканні цих двох обмоток, приведених до одної кількості витків. Замість взаємних індуктивностей розуміється комбінація власних індуктивностей і індуктивностей розсіювання. Знак «-» перед взаємодуктивністю обумовлений зустрічним вмиканням обмоток. Такий дослід називається «противвмикання» або «протинамагнічування».

Задача 1.1.1

Автотрансформатор із третиною обмоткою та з введенням у середину послідовної обмотки (рис. 1.1) має такі індуктивні опори короткого замикання між простими обмотками $x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{23}, x_{24}, x_{34}$.

Визначити відношення струмів у паралельних гілках обмотки ПО.

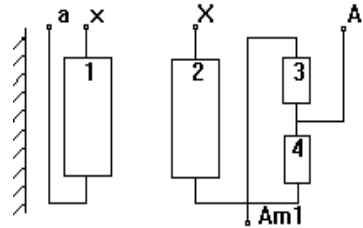


Рисунок 1.1

Рішення

$$\left. \begin{aligned} I_1 + I_2 + I_3 + I_4 &= 0 \\ I_2 &= I_3 + I_4 \\ U_3 &= U_4 \end{aligned} \right\}, \quad \left. \begin{aligned} U_2 - U_1 &= x_{122} \cdot I_2 + x_{123} \cdot I_3 + x_{124} \cdot I_4 \\ U_3 - U_1 &= x_{132} \cdot I_2 + x_{133} \cdot I_3 + x_{134} \cdot I_4 \\ U_4 - U_1 &= x_{142} \cdot I_2 + x_{143} \cdot I_3 + x_{144} \cdot I_4 \end{aligned} \right\}.$$

Відніmemo з другого рівняння третє

$$0 = (x_{132} - x_{142}) \cdot I_2 + (x_{133} - x_{143}) \cdot I_3 + (x_{134} - x_{144}) \cdot I_4,$$

$$0 = (x_{132} - x_{142} + x_{133} - x_{143}) \cdot I_3 + (x_{132} - x_{142} + x_{134} - x_{144}) \cdot I_4,$$

$$\frac{I_3}{I_4} = \frac{-(x_{132} - x_{142} + x_{134} - x_{144})}{(x_{132} - x_{142} + x_{133} - x_{143})},$$

$$\text{де } x_{\text{mpq}} = \frac{1}{2} \cdot (x_{\text{mp}} + x_{\text{mq}} - x_{\text{pq}}):$$

$$x_{132} = 0.5 \cdot (x_{13} + x_{12} - x_{23});$$

$$x_{134} = 0.5 \cdot (x_{13} + x_{14} - x_{34});$$

$$x_{142} = 0.5 \cdot (x_{14} + x_{12} - x_{24});$$

$$x_{143} = 0.5 \cdot (x_{14} + x_{13} - x_{34});$$

$$x_{133} = 0.5 \cdot (x_{13} + x_{13});$$

$$x_{144} = 0.5 \cdot (x_{14} + x_{14}).$$

Завдання

Вирішити 2 задачі за вищенаведеною методикою. Індуктивні опори короткого замикання між простими обмотками (у %) в табл. 1.1

Таблиця 1.1 – Індуктивні опори короткого замикання у відсотках

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{23}	x_{24}	x_{34}
	Цифра 1	11	22	27	19	24	28
	Цифра 2	10	21	25	20	22	26
Задача 2	Параметр	x_{12}	x_{13}	x_{14}	x_{23}	x_{24}	x_{34}
	Цифра 1	15	24	26	21	23	27
	Цифра 2	14	20	23	18	25	29

Задача 1.1.2

Методом багатообмоткового трансформатора визначити реактивну складову напруги короткого замикання трансформатора, обмотки якого з'єднані за схемою рис. 1.2.

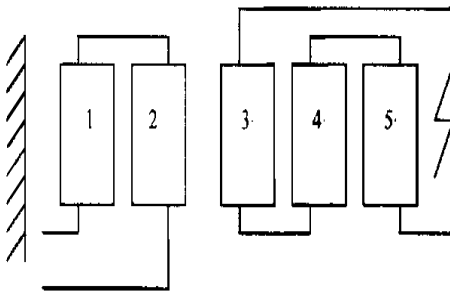


Рисунок 1.2

Дані трансформатора:

$W_1 = W_2 = W_5 = 100;$
 $W_3 = 200;$ $W_4 = 150;$
 $X_{12} = 0.02 \text{ в.о.};$ $X_{13} = 0.035 \text{ в.о.};$
 $X_{14} = 0.045 \text{ в.о.};$ $X_{15} = 0.055 \text{ в.о.};$
 $X_{23} = 0.03 \text{ в.о.};$ $X_{24} = 0.04 \text{ в.о.};$
 $X_{25} = 0.05 \text{ в.о.};$ $X_{34} = 0.015 \text{ в.о.};$
 $X_{35} = 0.025 \text{ в.о.};$ $X_{45} = 0.01 \text{ в.о.}$

1.2 Визначення електромагнітних характеристик трансформаторів та їх параметрів

Теоретичні відомості. Для трансформаторів доцільно складати не одну електромагнітну характеристику, а дві.

Зовнішня електромагнітна характеристика для трансформатора складається із всіх контурів

$$n \boxed{\psi}^1 - \varphi_1 \cdot \left(q \boxed{\Phi}^1 \cdot n \boxed{i}^1 \right) = 0. \quad (1.2)$$

Внутрішня характеристика трансформатора

$$\varphi_2 \cdot \left(q \boxed{\Phi}^1 \cdot n \boxed{i}^1 \right) = 0. \quad (1.3)$$

Параметри зовнішньої електромагнітної характеристики – повна похідна потокозчеплення по струму

$$S_{\psi} = \frac{d q \boxed{\psi}^1}{d n \boxed{i}^1}. \quad (1.4)$$

Параметри внутрішньої електромагнітної характеристики – повна похідна вектору потоку по вектору струму

$$S_{\Phi} = \frac{d q \boxed{\Phi}^1}{d n \boxed{i}^1}. \quad (1.5)$$

Задача 1.2.1

Дані трансформатора з рис. 1.3: $W_1 = W_2 = W_5 = 100;$ $W_3 = 200;$ $W_4 = 150;$ $X_{12} = 0.02 \text{ в.о.};$ $X_{13} = 0.035 \text{ в.о.};$ $X_{14} = 0.045 \text{ в.о.};$ $X_{15} = 0.055 \text{ в.о.};$ $X_{23} = 0.03 \text{ в.о.};$ $X_{24} = 0.04 \text{ в.о.};$ $X_{25} = 0.05 \text{ в.о.};$

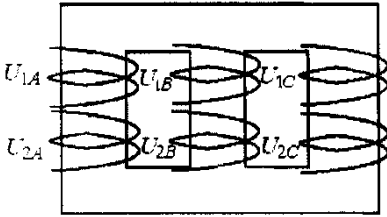


Рисунок 1.3

$$X_{34} = 0.015 \text{ в.о.}; \quad X_{35} = 0.025 \text{ в.о.}; \\ X_{45} = 0.01 \text{ в.о.}$$

Для трифазного двообмоткового трансформатора визначити параметри трансформатора.

1.3 Визначення напруги короткого замикання між обмотками трансформатора, що довільно розміщені на стрижні

Короткі теоретичні відомості. Існує багато методів для розрахунку взаємодуктивного опору трансформатора, який є реактивною складовою напруги короткого замикання, наприклад:

- метод розрахунку поточкозчеплень,
- метод розрахунку еквівалентних площ,
- метод розрахунку з використанням енергії магнітного поля,
- метод Роговського,
- метод середньгеометричних відстаней (СГВ) та ін.

Метод середньгеометричних відстаней

Середньо-геометрична відстань між прямокутними перерізами обмоток з паралельними сторонами, які довільно розташовані на стрижні

$$g_{12} = \frac{g_{AB}^{\alpha} g_{34}^{\beta}}{g_{CD}^{\delta} g_{HF}^{\gamma}}. \quad (1.6)$$

Після визначення СГВ знаходимо індуктивний опір трансформатора. Якщо трансформатор має великий радіальний переріз при $R_{cp} \approx 1$ використовуємо спрощену формулу на ділянці від R_1 до R_2

$$a_p = \int_{R_1}^{R_2} \left(\frac{W_i}{W_{i0}} \right)^2 dr.$$

Для будь-якої конструкції трансформаторів радіальна будова ампер-витків WI (тобто, епюра намагнічуючої сили,) може складатися з п'яти характерних ділянок.

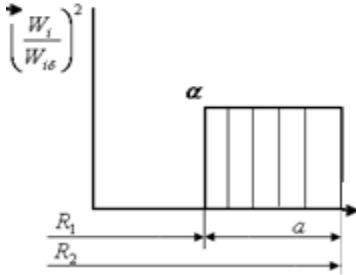


Рисунок 1.4 - Перша епюра

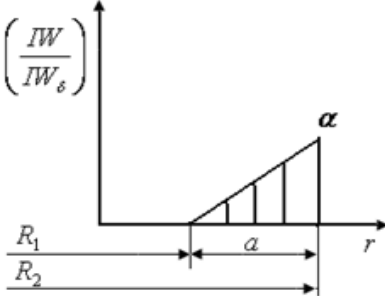


Рисунок 1.5 - Друга епюра

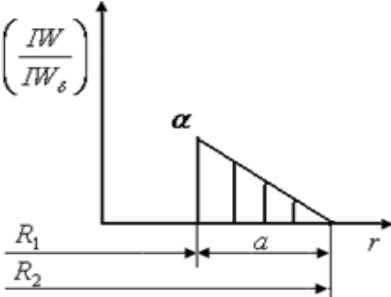


Рисунок 1.6 - Третя епюра

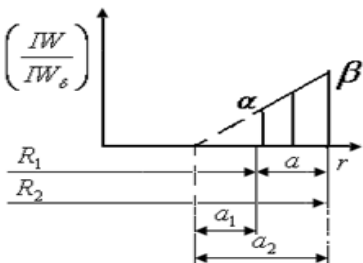


Рисунок 1.7 - Четверта епюра

Перша епюра (рис. 1.4) – коли відсутні ампер-витки (на ділянці від R_1 до R_2) їх немає взагалі, або вона не ввімкнена

$$(a_p)_T = \alpha^2 a \frac{R_1 + R_2}{2R_{сеп}},$$

$$(a_p)_{np} = \alpha^2 a.$$

Друга епюра (рис. 1.5) – має місце в обмотках розташованих ближче до стрижня, тобто радіальний перетин має місце в точці R_1

$$(a_p)_T = \frac{1}{3} \alpha^2 a \frac{R_1 - a/4}{R_{сеп}},$$

$$(a_p)_{np} = \frac{1}{3} \alpha^2 a.$$

Третя епюра (рис. 1.6) – у крайніх обмотках від стрижня

$$(a_p)_T = \frac{1}{3} \alpha^2 a \frac{R_1 + a/4}{R_{сеп}},$$

$$(a_p)_{np} = (\alpha^2 a) / 3.$$

Четверта епюра (рис. 1.7) – на ділянці, де ліворуч від даної ділянки є концентр, обтічний струмом того ж напрямку, що й розглянутий

$$(a_p)_T = \frac{1}{3} a \frac{\left(\beta^2 \left(R_2 - \frac{a_2}{4} \right) - \alpha^2 \left(R_1 - \frac{a_1}{4} \right) \right)}{R_{сеп}},$$

$$(a_p)_{np} = \frac{1}{3} a \left(\alpha^2 + \alpha\beta + \beta^2 \right).$$

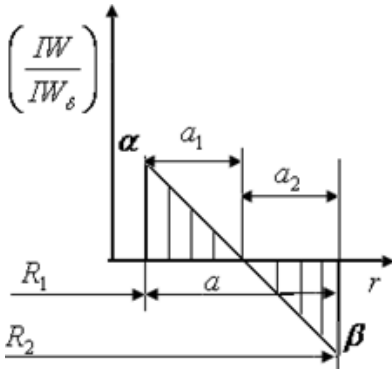


Рисунок 1.8 - П'ята еспора

П'ята еспора (рис. 1.8) – має місце в тих випадках, коли й ліворуч і праворуч від розглянутої обмотки, струм протікає в протилежному напрямку

$$(a_p)_T = \frac{1}{3} a \frac{\left(\alpha^2 \left(R_1 + \frac{a_1}{4} \right) + \beta^2 \left(R_2 - \frac{a_2}{4} \right) \right)}{R_{сер}},$$

$$(a_p)_{np} = \frac{1}{3} a \left(\alpha^2 - \alpha\beta + \beta^2 \right).$$

Задача 1.3.1

Трансформатор із подвійною концентричною обмоткою ВН має розташування обмоток на стрижні показане на рис. 1.9:

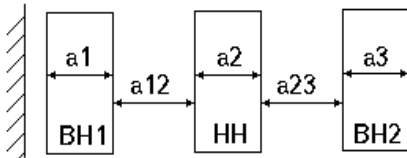


Рисунок 1.9

Геометричні розміри обмоток та каналів між ними

$$a_1 = a_3 = 150 \text{ мм}; \quad a_2 = 200 \text{ мм};$$

$$a_{12} = 50 \text{ мм}; \quad a_{23} = 50 \text{ мм}.$$

Число витків

$$w_{ВН1} = w_{ВН2} = 100; \quad w_{НН} = 50.$$

Визначити приведену ширину каналу розсіювання в режимі НН-ВН.

Задача 1.3.2

Визначити взаємодуктивність розсіювання між обмотками трансформатора, які приведені до базисних витків $w_0 = 50$, та які мають геометричні розміри: $D_{12} = 0.5$ м, $a_1 = a_2 = 0.05$ м, $a_{12} = 0.02$ м, $h_1 = h_2 = 0.2$ м, $h_3 = h_4 = 0.1$ м.

1.4 Використання методу потужності для визначення опорів складних обмоток трансформаторів

Короткі теоретичні відомості. Напруга короткого замикання та його складові у відносних одиницях чисельно дорівнюють опору КЗ і його складовим у відносних одиницях.

Вираз для визначення опору трансформатора з одним ступенем свободи на основі метода потужності

$$Z_{K3}(x_{K3}, r_{K3}) = -\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I_p \cdot I_q \cdot Z_{pq}(x_{pq}, r_{pq}), \quad (1.7)$$

де x_{pq} – взаємодуктивний опір між контурами p і q ;

r_{pq} – активний опір КЗ між контурами p і q , $r_{pq} = r_p + r_q$;

I_p, I_q – струми контурів у відносних одиницях.

Струм живлячої обмотки прийняти за «1», а струм короткозамкненої обмотки за «-1».

Струми в окремих контурах при послідовному з'єднанні визначаються за формулою

$$I_i = \frac{W_i}{W_{ob}}, \quad (1.8)$$

де W_i – число витків i -того концентра;

W_{ob} – алгебраїчна сума витків усієї обмотки, в якій розташовується i -тий концентр.

При визначенні W_{ob} число витків окремих концентрів підсумовується зі знаком «+» при послідовному вмиканні та зі знаком «-» при зустрічному вмиканні концентру.

Задача 1.4.1

Визначити напругу короткого замикання трансформатора, що складається з п'яти концентрів за схемою рис. 1.10.

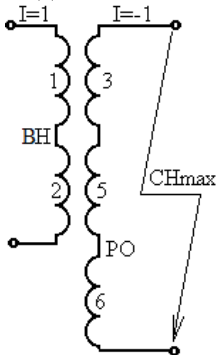


Рисунок 1.10

Число витків у концентрах:

$$w_1 = w_2 = 150; \quad w_3 = 40; \quad w_5 = w_6 = 25.$$

Активні опори концентрів е відносних одиницях: $r_1 = 0.02$; $r_2 = 0.03$; $r_3 = 0.01$,

$$r_5 = 0.005; \quad r_6 = 0.008.$$

Взаємодуктивні опори розсіювання між концентрами е відносних одиницях:

$$x_{12} = 0.05; \quad x_{13} = 0.1; \quad x_{15} = 0.25,$$

$$x_{16} = 0.26; \quad x_{23} = 0.08; \quad x_{25} = 0.18,$$

$$x_{26} = 0.28; \quad x_{35} = 0.17; \quad x_{36} = 0.22; \quad x_{56} = 0.2.$$

Перший та другий концентри, що з'єднані між собою послідовно, складають обмотку ВН. Третій, п'ятий та шостий концентри складають обмотку СН, при чому п'ятий та шостий концентри з'єднуються з третім концентром за схемою «реверс».

В обох завданнях положення перемикача відповідає максимальній напрузі в обмотці СН.

1.5 Розрахунок параметрів автотрансформаторів

Короткі теоретичні відомості. У автотрансформатора регулювання здійснюється загальною обмоткою на вторинній стороні за схемами: «у розтин», «виделка» й «регулювання в нейтралі».

Для автотрансформатора з одним ступенем свободи – схеми з'єднання «в розтин» й «регулювання в нейтралі» – опори КЗ визначається за формулою

$$Z_{кз} = K_{\epsilon}^2 Z_{mp}, \quad (1.9)$$

де K_{ϵ} – коефіцієнт вигідності автотрансформатора,

$$K_{\epsilon} = \frac{U_1 - U_2}{U_1}, \quad (1.10)$$

де Z_{mp} – опір трансформатора, одержаний при розриві електричного зв'язку між послідовною (ПО) та загальною обмотками (ЗО).

Наприклад, обмотки однієї фази автотрансформатора з'єднують за схемою рис. 1.11 а, для еквівалентного трансформатора маємо схему показану на рис.1.11 б.

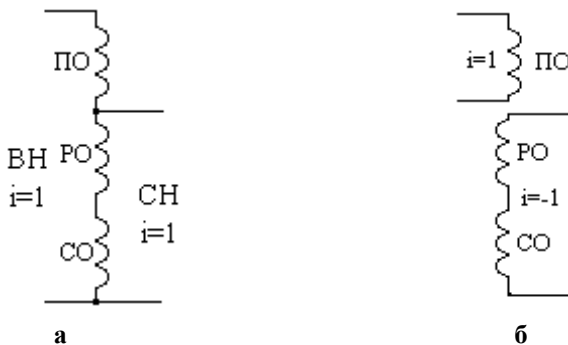


Рисунок 1.11 – Перетворення автотрансформаторного зв'язку на трансформаторний

Опір Z_{mp} , визначається за формулою

$$Z_{K3}(x_{K3}, r_{K3}) = -\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I_p \cdot I_q \cdot Z_{pq}(x_{pq}, r_{pq}), \quad (1.11)$$

де x_{pq} – взаємодуктивний опір між контурами p і q ;

r_{pq} – активний опір КЗ між контурами p і q , $r_{pq} = r_p + r_q$;

I_p, I_q – струми контурів у відносних одиницях.

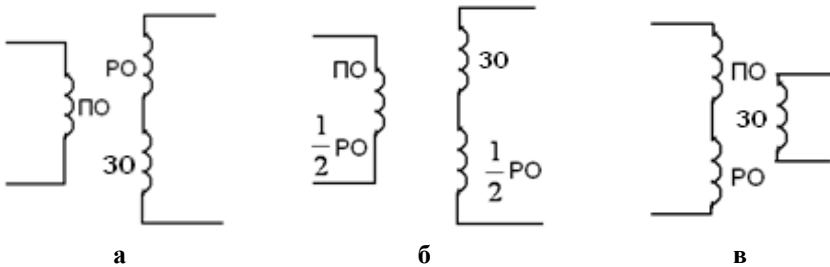
Струм живлячої обмотки прийняти за «1», а струм короткозамкненої обмотки за «-1». Струми в окремих контурах при послідовному з'єднанні визначаються за формулою

$$I_i = \frac{W_i}{W_{об}}, \quad (1.12)$$

де W_i – число витків i -того центра;

$W_{об}$ – алгебраїчна сума витків усієї обмотки i -того центра.

При визначенні $W_{об}$ число витків окремих центрів підсумовується зі знаком «+» при послідовному та зі знаком «-» при зустрічному вмиканні центрів. При визначенні опору трансформатора умовно необхідно відмовитись від електричного зв'язку й розглядати трансформатор залежно від положення перемикачів, рис. 1.12.



а, б, в – відповідно перше, друге та третє положення перемикача

Рисунок 1.12 – Схеми розрахунку

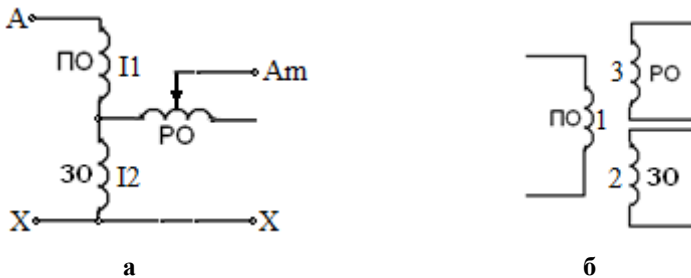
Для кожної схеми розрахунку необхідно перераховувати свій коефіцієнт вигідності $k_g = (W_{BH} - W_{HH}) / W_{BH}$:

– для схеми з рис. 1.12, а $k_g = \frac{W_{ПО} - W_{РО} - W_{ЗО}}{W_{ПО}};$

– для схеми з рис. 1.12, б $k_g = \frac{W_{ПО} + \frac{1}{2}W_{РО} - \frac{1}{2}W_{РО} - W_{ЗО}}{W_{ПО} + \frac{1}{2}W_{РО}};$

– для схеми з рис. 1.12, в $k_g = \frac{W_{ПО} + W_{РО} - W_{ЗО}}{W_{ПО} + W_{РО}}.$

Для схеми з'єднання послідовної (1), загальної (2) і регулювальної (3) обмоток за схемою «виделка» розривається електричний зв'язок між обмотками, рис. 1.13. $I_1 = k_g;$
 $I_2 = -k_g \cdot k;$ $I_3 = -k_g \cdot (1 - k)$



а – автотрансформаторний зв'язок; б – трансформаторний зв'язок

Рисунок 1.13 – Перетворення автотрансформаторного зв'язку на трансформаторний

Опори КЗ автотрансформатора визначаються за формулою

$$Z_{кз} = k_g^2 (k \cdot Z_{12} + (1 - k) \cdot Z_{13} - k(1 - K) \cdot Z_{23}), \quad (1.13)$$

де Z_{12} – опір КЗ трансформатора, що складається з послідовної й загальної обмоток;

Z_{13} – опір КЗ трансформатора, що складається з послідовної й регулювальної обмоток;

Z_{23} – опір КЗ трансформатора, що складається з загальної й регулювальної обмоток.

Коефіцієнт k визначається за формулою

$$k = \frac{W_2 \cdot (W_1 - W_3)}{W_1 \cdot (W_2 + W_3)}, \quad (1.14)$$

де W_1 – число витків послідовної обмотки;

W_2 – число витків спільної обмотки;

W_3 – число витків регулювальної обмотки. Береться зі знаком «+» при згідному з'єднанні й зі знаком «-» при зустрічному вмиканні.

Задача 1.5.1

Автотрансформатор із регулюванням напруги під навантаженням за схемою «виделка» має дані: w_{no} , w_{zo} , w_{po} .

Реактивні опори: x_{no_zo} , x_{no_po} , x_{zo_po} . Визначити реактивну складову напруги короткого замикання (у в. о.).

Рішення

Коефіцієнти вигідності та трансформації відповідно

$$k_B = \frac{w_{po}}{w_{po} + w_{zo}}; \quad k = \frac{w_{zo} \cdot (w_{po} - w_{po})}{w_{po} \cdot (w_{zo} + w_{po})}.$$

Еквівалентний опір автотрансформатора

$$x_{ekv} = k_B^2 \cdot [k \cdot x_{no_zo} + (1 - k) \cdot x_{no_po} - k \cdot (1 - k) \cdot x_{zo_po}]$$

$$u_{p_kz} = x_{ekv}, \text{ в.о.}$$

Завдання

Вирішити задачу за вищенаведеною методикою. Дані для розрахунку в табл. 1.2.

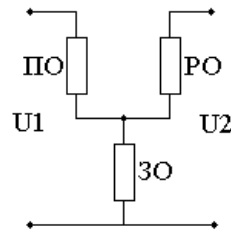


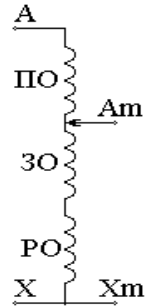
Рисунок 1.14

Таблиця 1.2 – Дані для розрахунку

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	w_{no}	w_{zo}	w_{po}	x_{no_zo} , в.о.	x_{no_po} , в.о.	x_{zo_po} , в.о.
	Цифра 1	200	250	50	0.19	0.16	0.085
	Цифра 2	186	258	46	0.175	0.175	0.092

Задача 1.5.2

Знижувальний автотрансформатор із регулюванням напруги в нейтралі за схемою «реверс» має концентричне розташування загальної w_{zo} , послідовної w_{no} і регулювальної w_{po} обмоток (рис. 1.15) із наступні значеннями парних реактивних опорів при номінальній напрузі в лінії ВН у в. о.: x_{no_zo} , x_{no_po} , x_{zo_po} . Визначити реактивну складову напруги КЗ (у в. о.) у режимі ВН-НН_{max}.

**Рисунок 1.15****Рішення**

$$k = \frac{w_{zo}}{w_{zo} + w_{po}}; \quad \beta = \frac{w_{max}}{w_{nom}} = \frac{w_{po} + w_{zo} + w_{po}}{w_{po} + w_{zo}};$$

$$x_{пз.мах} = x_{по_зо} \cdot \beta^2; \quad x_{зр.мах} = x_{зо_по} \cdot \beta^2; \quad x_{пр.мах} = x_{по_по} \cdot \beta^2;$$

$$k_B = w_{по} / (w_{по} + w_{zo} + w_{po});$$

$$x_{ekv} = k_B^2 \cdot \left[k \cdot (x_{по_зо} \cdot \beta^2) + (1 - k) \cdot (x_{по_по} \cdot \beta^2) - k \cdot (1 - k) \cdot (x_{зо_по} \cdot \beta^2) \right]$$

$$U_{p_kz} = x_{ekv} \text{ в.о.}$$

Завдання

Вирішити задачу за даними для розрахунку з табл. 1.3

Таблиця 1.3 – Дані для розрахунку

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	w_{no}	w_{zo}	w_{po}	x_{no_zo} , в.о.	x_{no_po} , в.о.	x_{zo_po} , в.о.
	Цифра 1	210	210	46	0.175	0.25	0.07
	Цифра 2	224	196	52	0.18	0.195	0.08

Задача 1.5.3

Автотрансформатор із регулюванням напруги в лінії СН має розташування і з'єднання обмоток на основному і бічному стрижнях, як

1.6 Визначення параметрів короткого замикання трансформатора з декількома ступенями свободи

Короткі теоретичні відомості. Для триобмоткового трансформатора з двома ступенями свободи струми вторинної і третинної обмоток не знаходяться в протифазі до первинної обмотки, але завжди повинна виконуватися умова: геометрична сума векторів струму всіх обмоток дорівнює нулю. Тому струми у вторинній і третинній обмотках розкладаємо за двома ортогональними осями (рис. 1.17). Задаємось струмами в одній обмотці по осях p і q . Якщо обмотка складається з декількох концентрів, то струми в окремих концентррах дорівнюють певній частині від p і q , пропорційній числу витків концентрра. Наприклад, обмотка НН складається з першого й другого концентрів з рівними числами витків, тому струми в окремих концентррах дорівнюють по $0.5 p$ й $0.5 q$.

Струми у залежному концентрі визначаються за умови рівності нулю суми МРС всіх контурів окремо по кожному напрямку.

Задача 1.6.1

Параметри триобмоткового трансформатора у в.о.: $r_1, r_2, r_3, x_{12}, x_{13}, x_{23}$.

Визначити: струми КЗ вторинної й третинної обмоток (рис. 1.17), якщо в режимі КЗ живлячою є первинна обмотка, а вторинна й третинна короткозамкнені і якщо струм первинної обмотки дорівнює одиниці.

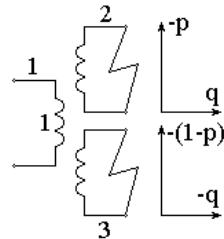


Рисунок 1.17

Рішення

Визначаємо активну й реактивну складову опору КЗ

$$\left. \begin{aligned} r_{екв} &= -\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I'_p \cdot I'_q \cdot r_{pq} - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I''_p \cdot I''_q \cdot r_{pq} \\ x_{екв} &= -\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I'_p \cdot I'_q \cdot x_{pq} - \frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I''_p \cdot I''_q \cdot x_{pq} \end{aligned} \right\}, \quad (1.15)$$

де

$$\begin{aligned} I_p &= I'_p + jI''_p \\ I_q &= I'_q + jI''_q \end{aligned}$$

З формули (1.15) визначаються залежності $r_{K3} = f(p, q)$ та $x_{K3} = f(p, q)$. Струми визначаються за умови

$$\left. \begin{aligned} \frac{d}{dp} r_{екв} - \frac{d}{dq} x_{екв} &= 0 \\ \frac{d}{dq} r_{екв} + \frac{d}{dp} x_{екв} &= 0 \end{aligned} \right\}. \quad (1.16)$$

Визначивши p та q , визначити r_{K3} та x_{K3} .

Завдання

Вирішити 2 задачі за вищенаведеною методикою. Параметри триобмоткового трансформатора (у в.о.) в табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Параметри у в.о.

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	r_1	r_2	r_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}
	Цифра 1	0.01	0.02	0.11	0.1	0.2	0.12
	Цифра 2	0.02	0.03	0.17	0.14	0.26	0.15
Задача 2	Параметр	r_1	r_2	r_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}
	Цифра 1	0.018	0.016	0.14	0.15	0.27	0.13
	Цифра 2	0.02	0.025	0.15	0.16	0.27	0.17

1.7 Розрахунок параметрів перехідних процесів трансформаторів

Короткі теоретичні відомості. Процес КЗ у одній фазі (наприклад фаза А) можна описати диференціальним рівнянням

$$u_A = r_{K3} i + x_{K3} \frac{d}{dt} i, \quad (1.17)$$

де U_A – миттєве значення напруги у відносних одиницях.

$$u_A = \sin(\omega t + \varphi_n).$$

За класичним методом струм представляє собою суму сталої та вільної складових:

$$i = i_c + i_\theta, \quad (1.18)$$

$$i_c = I_m \sin(\omega t + \varphi_n + \theta_\kappa), \quad (1.19)$$

де

$$\left. \begin{aligned} \theta_\kappa &= \arctg \frac{x_{\kappa 3}}{r_{\kappa 3}} \\ I_m &= \frac{1}{\sqrt{r_{\kappa 3}^2 + x_{\kappa 3}^2}} \end{aligned} \right\}.$$

де $x_{\kappa 3}$ й $r_{\kappa 3}$ – складові опору КЗ, що визначаються за формулою (1.15). Вільна складова струму

$$i_g = C \cdot e^{\frac{r_{\kappa 3}}{x_{\kappa 3}} t}, \quad (1.20)$$

де

$$C = I_n \sin(\varphi_n - \theta_n) - I_m \sin(\varphi_n - \theta_\kappa). \quad (1.21)$$

Початковий струм I_n і кут θ_n визначаються навантаженням до короткого замикання. Тоді сталий струм у фазі А

$$I_A = \frac{1}{n} \left[(Z_{\kappa 3} + Z_{nB} + 2Z_{nC}) \cdot U_A + (Z_{nB} - Z_{nA}) \cdot U_B \right], \quad (1.22)$$

$$\begin{aligned} n &= (Z_{\kappa 3} + Z_{nB} + 2Z_{nC}) \cdot (Z_{\kappa 3} + Z_{nB} + 2Z_{nA}) + \\ &+ (Z_{nB} - Z_{nA}) + (Z_{nC} - Z_{nB}) \end{aligned}$$

Підставивши значення опорів

$$\begin{aligned} Z_{\kappa 3} &= r_{\kappa 3} + jx_{\kappa 3} \\ Z_n &= r_n + jx_n \end{aligned},$$

стане можливим визначити струм у вигляді

$$I_A = I_n \cdot e^{j\theta_n} \quad (1.23)$$

та визначити I_n й θ_n . Задаючись значеннями $\varphi_n = 0$ та 90 градусів можна побудувати графіки залежності i , i_c , $i_g = f(t)$.

Сталі струми короткого замикання визначаються за формулами:

$$\text{– при однофазному КЗ} \quad I_c = \frac{3}{2Z_{\kappa 3} + Z_0}; \quad (1.24)$$

$$\text{– при двофазному КЗ} \quad I_c = \frac{\sqrt{3}}{2Z_{\kappa 3}}; \quad (1.25)$$

– при трифазному КЗ
$$I_c = \frac{1}{Z_{кз}}. \quad (1.26)$$

Час, за який температура обмотки трансформатора при короткому замиканні досягне граничного значення, що допускається, (для мідних обмоток 250°C), оцінюється за формулою

$$t_{кз} \approx 2.5 \left(\frac{100 \cdot u_{кз}}{J_n} \right)^2, \quad (1.27)$$

де J_n – номінальна щільність струму в обмотках.

Задача 1.7.1

Трифазний трансформатор має номінальну потужність S_n , номінальна лінійна первинна напруга U_{n1} . Лінійна напруга короткого замикання $u_{кз}$. Переріз проводу первинної обмотки q_1 . Визначити час, за який температура обмотки трансформатора при короткому замиканні досягне 250°.

Рішення

Лінійний струм первинної обмотки
$$J = \frac{I}{q_1 \cdot 10^{-6}}, \text{ А/м}^2.$$

Густина струму первинної обмотки
$$I = \frac{S_n \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{n1} \cdot 10^3}, \text{ А.}$$

Напруга короткого замикання у відсотках
$$u'_{кз} = \frac{u_{кз}}{U_{n1} \cdot 10^3} \cdot 100, \%$$

Час, за який температура обмотки трансформатора при короткому замиканні досягне 250°C

$$t_{k250} = 2.5 \cdot \left(\frac{u'_{кз}}{J \cdot 10^{-6}} \right)^2, \text{ с.}$$

Завдання

Вирішити задачу за вищенаведеною методикою. Дані для розрахунку в табл. 1.5.

Таблиця 1.5 – Дані для розрахунку

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	S_n , кВА	U_{n1} , кВ	u_{kz} , В	q_1 , мм ²	m	f , Гц
	Цифра 1	40	10	27	8.5	3	50
	Цифра 2	42	13.7	25	9	3	50

Задача 1.7.2

При короткозамкненій вторинній обмотці до первинної обмотки однофазного трансформатора підведена напруга з діючим значенням U_1 . У момент вмикання миттєве значення напруги дорівнює u , складові напруги короткого замикання трансформатора відповідно u_a , u_p .

Визначити залежність вільної складової струму короткого замикання у функції часу t , якщо прийняти $I_c = 1$.

Рішення

$$i_B = C \cdot e^{-\left(\frac{u_a}{u_p}\right) \cdot t},$$

$$\text{де } C = i_c = I_c \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi - \phi_k),$$

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f.$$

У момент вмикання ($t = 0$) миттєве значення напруги

$$u = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi),$$

при діючій напрузі $U_m = \sqrt{2} \cdot U_1$. Тоді кути

$$\phi = \arcsin\left(\frac{u}{U_m}\right) \text{ рад}, \quad \phi_k = \arctan\left(\frac{u_p}{u_a}\right) \text{ рад}.$$

Залежність вільної складової струму короткого замикання у функції часу

$$i_B = I_c \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi - \phi_k) \cdot e^{-\left(\frac{u_a}{u_p}\right) \cdot t}.$$

Завдання

Вирішити задачу за вищенаведеною методикою. Дані для розрахунку в табл. 1.6

Таблиця 1.6 – Дані для розрахунку

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	$U_1, \text{В}$	$u, \text{В}$	$u_a, \%$	$u_p, \%$	$I_c, \text{В.о.}$	m
	Цифра 1	220	164.45	1.42	5.61	1	1
	Цифра 2	230	172.13	1.35	6.48	1	1

Задача 1.7.3

Однофазний трансформатор із розімкненою вторинною обмоткою ввімкнено в мережу з напругою $U = U_m \cdot \cos(\omega t + \varphi)$. Активний опір первинної обмотки R_1 . Середнє значення індуктивності первинної обмотки L_0 . Число витків первинної обмотки w_1 .

Визначити найбільше миттєве значення магнітного потоку. Залишковим магнітним потоком знехтувати.

Рішення

Амплітудне значення напруги $U_m = 4.44 \cdot f \cdot \Phi_m \cdot w_1, \text{В}$.

Амплітудне значення магнітного потоку $\Phi_m = \frac{U_m}{4.44 \cdot f \cdot w_1}, \text{Вб}$.

Найбільше миттєве значення магнітного потоку спостерігається при $\varphi = 0.5\pi$ в момент часу $t = \pi / \omega$.

$$\Phi_{\max} = \Phi_m + \Phi_m \cdot e^{\frac{-R_1}{X_1} \cdot \pi} + \Phi_{\text{осм}} \cdot e^{\frac{-R_1}{X_1} \cdot \pi} = \Phi_m \cdot \left(1 + e^{\frac{-R_1}{X_1} \cdot \pi} \right), \text{Вб},$$

де $X_1 = \omega \cdot L_0 = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_0, \text{Ом}$.

Завдання

Вирішити задачу за вищенаведеною методикою. Дані для розрахунку в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Дані для розрахунку

		Місце цифри за варіантом					
		1	2	3	4	5	6
Задача 1	Параметр	$U_m, \text{В}$	$R_1, \text{Ом}$	$L_0, \text{Гн}$	w_1	$f, \text{Гц}$	m
	Цифра 1	8185	0.073	0.005	370	50	1
	Цифра 2	8225	0.085	0.0045	382	60	1

Задача 1.7.4

Порівняти відношення максимально значення струму КЗ до амплітуди сталого струму КЗ двох трифазних трансформаторів із наступними даними: $u_{a1} = 1.24 \%$; $u_{p1} = 5.2 \%$; $u_{a2} = 1.65 \%$; $u_{p2} = 6.2 \%$.

Рішення

$$\frac{I_{\max 1}}{I_{c1}} = 1 + e^{-\left(\frac{U_{a1}}{U_{p1}}\right) \cdot \pi} \quad \text{порівняти} \quad \frac{I_{\max 2}}{I_{c2}} = 1 + e^{-\left(\frac{U_{a2}}{U_{p2}}\right) \cdot \pi}.$$

2 САМОСТІЙНА РОБОТА

2.1 Початкові дані для самостійної роботи

Кожному студенту надається варіант завдання, номер якого складається з шестизначного числа. Кожна цифра цього числа є 1 або 2, наприклад: 112212.

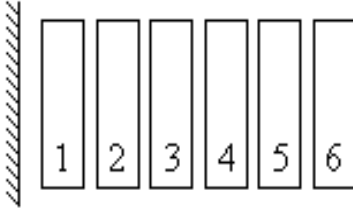


**Рисунок 2.1 - Розташування
концентрів однієї фази на стрижні**

Активні опори концентрів, взаємоіндуктивні опори розсіювання між концентрами, а також активні та реактивні опори нульової послідовності у відносних одиницях вибираються з таблиці 2.1 відповідно варіанту.

На кожному стрижні магнітної системи розташован по шість концентрів, відповідно до рис. 2.1.

Число витків у концентрах:

$$W_1 = W_2 = 100;$$

$$W_3 = 450; \quad W_4 = 500;$$

$$W_5 = W_6 = 25.$$

Таблиця 2.1 – Параметри концентрів у в.о.

	Місце цифри за варіантом					
	1	2	3	4	5	6
Параметр	R₁	R₂	R₃	R₄	R₅	R₆
Цифра 1	0.014	0.004	0.002	0.003	0.045	0.007
Цифра 2	0.019	0.003	0.015	0.02	0.005	0.015
Параметр	X₁₂	X₁₃	X₁₄	X₁₅	X₁₆	X₄₆
Цифра 1	0.059	0.13	0.17	0.18	0.34	0.21
Цифра 2	0.049	0.11	0.16	0.21	0.3	0.22
Параметр	X₂₃	X₂₄	X₂₅	X₂₆	X₄₅	X₅₆
Цифра 1	0.069	0.14	0.19	0.24	0.17	0.15
Цифра 2	0.019	0.12	0.17	0.31	0.16	0.19
Параметр	X₃₄	X₃₅	X₃₆	R₀	X₀	
Цифра 1	0.14	0.16	0.21	0.018	1.52	
Цифра 2	0.12	0.15	0.22	0.016	1.86	

Відповідним з'єднанням концентрів можна зібрати:

- схему трифазного триобмоткового трансформатора (рис.2.2)
- три схеми трифазного триобмоткового автотрансформатора з різноманітними схемами з'єднання обмоток послідовної, спільної та регулювальної:

- схема «у розтин» (рис. 2.3);
- схема «виделка» (рис. 2.4);
- схема «регулювання в нейтралі» (рис. 2.5).

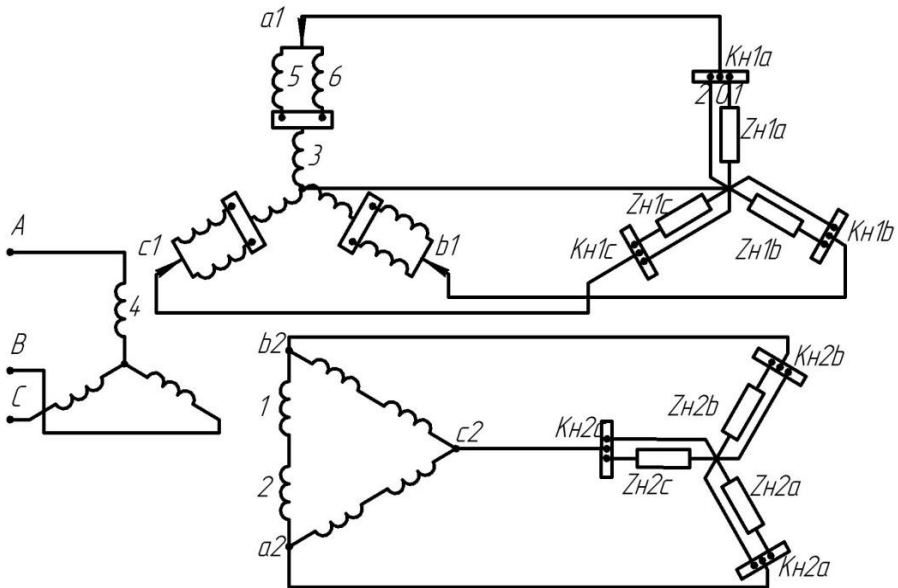


Рисунок 2.2 – Схема з'єднання обмоток трансформатора з навантаженням

Обмотка, на яку подається симетрична номінальна напруга, є живлячою. Діючі значення цієї напруги у відносних одиницях прийняти за (2.1).

Дві інші обмотки підключені на несиметричне навантаження. Величина навантаження вибирається з таблиці 2.2 відповідно з заданим варіантом.

$$\left. \begin{aligned} U_A &= 1 \\ U_B &= \frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \\ U_C &= \frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

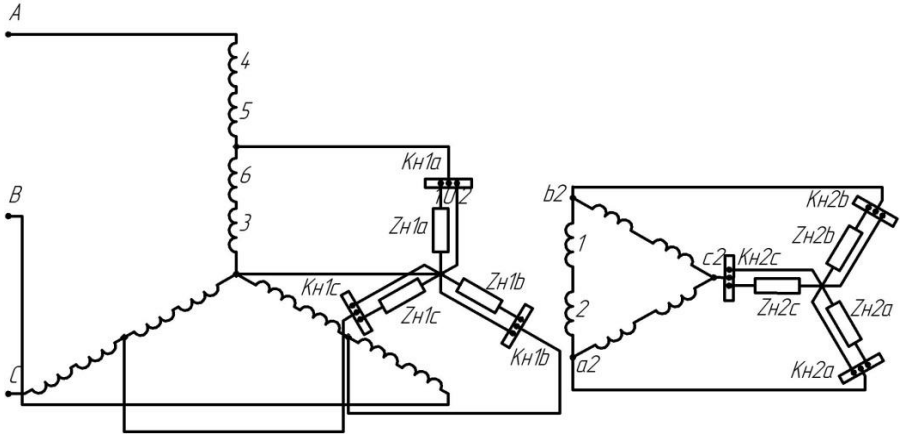


Рисунок 2.3 – З'єднання обмоток автотрансформатора за схемою «в розтин»

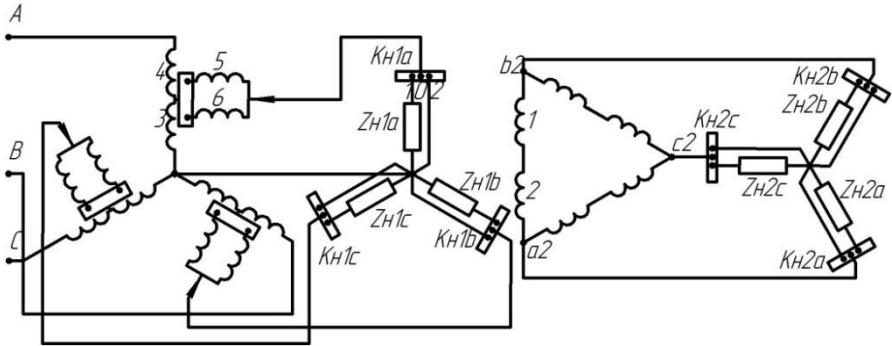


Рисунок 2.4 – З'єднання обмоток автотрансформатора за схемою «виделка»

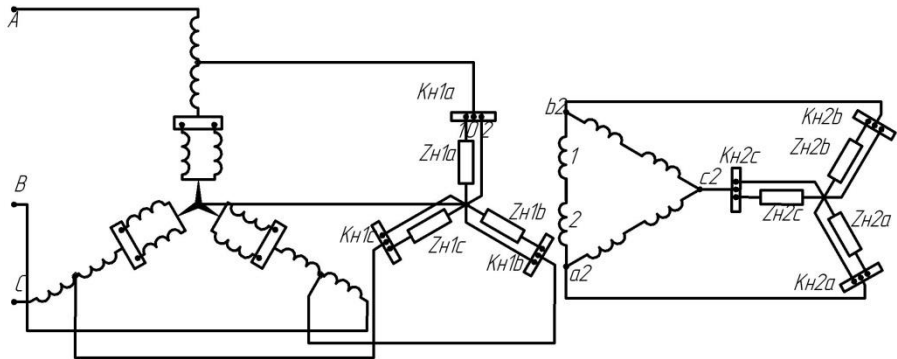


Рисунок 2.5 – З'єднання обмоток автотрансформатора за схемою «регулювання в нейтралі»

Таблиця 2.2 – Навантаження трансформатора

	Місце цифри за варіантом					
	1	2	3	4	5	6
Параметр	R_{H1A}	R_{H1B}	R_{H1C}	R_{H2A}	R_{H12}	R_{H2C}
Цифра 1	0.71	0.6	0.44	0.76	0.66	0.53
Цифра 2	0.66	0.53	0.31	0.71	0.6	0.44
Параметр	X_{H1A}	X_{H1B}	X_{H1C}	X_{H2A}	X_{H2B}	X_{H2C}
Цифра 1	0.05	0.1	0.15	0.2	0.3	0.2
Цифра 2	0.06	0.12	0.18	0.23	0.36	0.24

У схемах, представлених на рисунках 2.2 – 2.5, навантаження до вторинної і третинної обмотки підключається через контактори K_{H1A} , K_{H1B} , K_{H1C} , K_{H2A} , K_{H2B} , K_{H2C} , що мають три положення.

При з'єднанні лінійного дроту відповідної фази з положенням контактора «0» – обмотка перебуває у режимі неробочого ходу (НХ). З'єднання лінійного дроту з положенням контактора «1» – відповідає вмиканню фази на навантаження. При з'єднанні лінійного дроту з положенням контактора «2» – відповідна фаза короткозамкнена.

У всіх фазах концентри «5» і «6» з'єднано послідовно і вони складають регульовальну обмотку (РО). У схемах 2.2, 2.4, 2.5 концентри «3» з'єднано з обмоткою РО. Якщо з'єднання **послідовне**, то U_{CH} максимальна (max), якщо з'єднання **зустрічне**, то U_{CH} мінімальна (min), при **відключенні** обмотки РО маємо номінальну напругу (nom).

2.2 Завдання самостійної роботи

2.2.1 Визначити напругу короткого замикання й його складових за всіма чотирма схемами для режимів, що вказані у таблиці 2.3.

2.2.2 Аналітично розрахувати перехідний процес у фазі А при трифазному КЗ першого режиму з таблиці 2.3. для схеми (рис. 2.2). До короткого замикання обмотка НН була під навантаженням.

2.2.3 Визначити сталі струми однофазного, двофазного й трифазного короткого замикання другого, третього, четвертого режимів з таблиці 2.3 для схеми (рис. 2.2). До короткого замикання обмотка СН була в стані неробочого ходу.

Таблиця 2.3 – Режими розрахунку напруги короткого замикання

Режим	Живляча обмотка	КЗ обмотка	Розімкнена обмотка	Розрахункові дані		
				U_{aK3}	U_{pK3}	U_{K3}
1	ВН	НН	СН			
2	ВН	CH_{min}	НН			
3	ВН	CH_{nom}	НН			
4	ВН	CH_{max}	НН			
5	НН	CH_{min}	ВН			
6	НН	CH_{nom}	ВН			
7	НН	CH_{max}	ВН			
8	ВН	CH_{min} , НН	-			
9	ВН	CH_{nom} , НН	-			
10	ВН	CH_{max} , НН	-			

Режим роботи визначається положенням контакторів навантаження, табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Режими роботи

Режим	K_{H1A}	K_{H1B}	K_{H1C}	K_{H2A}	K_{H2B}	K_{H2C}
1	1	1	1	2	2	2
2	2	2	2	1	1	1
3	1	1	1	1	1	

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. Васютинский С. Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов / Васютинский С. Б. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.
2. Лейтес Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с.
3. Сипайлов Г. А. Электрические машины (специальный курс) / Г. А. Сипайлов, Е. В. Кононенко, К. Л. Харьков. – [2-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. школа, 1987. – 287 с
4. Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : [учеб. для вузов] / И. П. Копылов. – [3-е изд., перераб. и доп.]. – М. : Высш. школа, 2001. – 327 с. - ISBN 5-06-003861-0.
5. Читечян В. И. Электрические машины. Сборник задач [учеб. для вузов] / В. И. Читечян. – М. : Высш. школа, 1988. – 231 с. : ил. Библиогр. : с. 238. – 25000 экз. – ISBN 5-06-001511-4.
6. Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання / Укл. : Т. В. Попова, Т. П. Солодовнікова. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2011. – 62 с.
7. Програма, методичні вказівки та контрольні завдання з дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») заочної форми навчання / Укл. : Т. П. Солодовнікова, О.О. Шлянін – Запоріжжя: ЗНТУ, 2016. – 26 с.
8. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання. / Укл. Т. В. Попова, Т. П. Солодовнікова, – Запоріжжя : ЗНТУ, 2011. – 42 с.
9. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования [Текст] / М.И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2013 –№1 – С.31-36.
10. Коцур М.И. Тепловое состояние асинхронного двигателя при пониженных скоростях вращения / М.И. Коцур, // Восточно-Европейский журнал передовых технологий –2013. – №2/8(62). – С.8-10.

11. Коцур М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков [Текст] / М. И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

12. Андриенко П. Д. Энергоэффективное торможение противовключением электроприводов на базе асинхронных двигателей с фазным ротором [Текст] / П. Д. Андриенко, Д. С. Андриенко, М. И. Коцур, С. В. Калюжный // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2014, – №15(91). – С. 89 – 91.

13. Андриенко Д. С. Преобразователь для электропривода согласованного вращения асинхронных двигателей с фазным ротором. / Д. С. Андриенко, П. Д. Андриенко, М. И. Коцур, И. М. Коцур // Энергосбережение, Энергетика, Энергоаудит – 2014 – №9(128) – С. 37–42.

14. Коцур М. И. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. В. Близняков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2015. – №1/8(73). – С.27-30.

15. Kotsur M. Impulse-controlled system for matched rotation of induction motors [Text] / M. Kotsur, P. Andrienko, O. Bliznyakov, A. Andrienko, D. Andrienko // Electrotechnic and Computer Systems – 2015. - № 19 (95). – С. 14 – 17.

16. Коцур, М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // Електротехніка та електроенергетика – 2016. – №1– С. 5 – 11.

17. Коцур, М. И. Повышение эффективности электропривода вентиляторных установок [Текст] / М. И. Коцур, И. М. Коцур, Н. С. Иваницкий, Д. А. Кравченко, В. Г. Савельев // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. №25(101) – С. 9 – 16.

18. Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu – 2017. - №4 – С. 49-54.

19. Литвинов, Д. А. Схемно-полевое моделирование тепловых процессов в асинхронных двигателях/ Д.А. Литвинов, А. А. Шлянин, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремидловская, Р. Матар // Електротехніка и електроенергетика. – 2017. – № 1. - С. 71-78.

20. Яримбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования

электромагнитных полей асинхронного двигателя [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика* – 2016. – №2 – С. 43 – 50.

21. Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliynyk, A. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, 2017, Catalog Number CFP17CDT-USB, pp. 452-457.

22. Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания [Текст] / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика* – 2017. – №1 – С. 24 – 30. DOI:

23. Kotsur, M. A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kotsur // *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, October 17th - 20th, Lviv, Ukraine, 2017, pp. 207-210.

24. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2017, pp. 88-91.

25. Ярымбаш Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 2. - С. 5-12.

26. Ярымбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 12-17.

27. Малюшевська А. П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / А. П. Малюшевська, О. Я. Дмитрішин, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 1. - С. 21–25.

28. Иванов В. Ф. Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В. Ф. Иванов, А. В. Басова, Н. В. Шульга // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2014. - № 2. - С. 41-53.

29. Тиховод С.М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений состояния магнитоэлектрических

схем замещения [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – № 1. – С. 46–49.

30. Тиховод С.М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва [Текст] / С.М. Тиховод // Электротехника и электроэнергетика – 2015. – №2 – С. 5–14. Милых В. И. Анализ гармонического состава переменного магнитного поля, связанного с вращающимся ротором турбогенератора, в режимах холостого хода и короткого замыкания / В. И. Милых, Н. В. Полякова // Электротехника та електроенергетика -2013. – №2. – С. 5–13.

31. Дивчук, Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – № 2. - С. 56-66.

32. Yarymbash D. Features of Defining Three-Phase Transformer No-Load Parameters by 3D Modeling Methods [Text] / D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk, D. Litvinov // International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017, pp. 132-135.

33. Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.

34. Дивчук, Т. Е. Особенности определения параметров силовых трансформаторов методами схемно-полевого моделирования / Дивчук, Т. Е., Д. К. Мимоход, С. А. Кутилин, А. Е. Кузнецов, Ю. В. Гуразда, И. С. Сирых // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – № 1. - С. 61-70.

35. Ярымбаш Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. №1. – С. 49 – 54

36. Ярымбаш Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006, Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.

37. Yarymbash D.S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D. S. Yarymbash, A. M. Oleinikov // Russian Electrical

Engineering. 2015. Т. 86. № 2. С. 86–92.

38. Ярымбаш Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.

39. Ярымбаш Д.С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и постоянного тока / Д.С. Ярымбаш, // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С.95–102.

40. Ярымбаш Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2011, С. 229–233

41. Ярымбаш Д. С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 64–69

42. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. - №1. – с. 74 – 76

43. Ярымбаш Д.С. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // Електротехніка та електроенергетика. – Запорожье: ЗНТУ, 2006. – № 1. – С. 56 – 60

44. Ярымбаш Д.С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та Електроенергетика. – 2015. – № 2. – С. 65–70

45. Ярымбаш Д. С. Идентификация электрических параметров шихтованных шинных пакетов мощных коротких сетей / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2012. – № 2. – С. 55 – 61.

46. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкции торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 26-34.