

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
«Спеціальний курс електричних машин»
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(спеціалізація «Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Спеціальний курс електричних машин» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (спеціалізація «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання / Укл. : Т.П. Солодовнікова, О.О. Шлянін, Г.В. Дьомічева – Запоріжжя: ЗНТУ, 2018. – 70 с.

Укладачі:

Т. П. Солодовнікова, старш.викл,
О. О. Шлянін, старш. викл
Г. В. Дьомічева, зав. лаб.

Рецензент:

В. Г. Савельєв, доцент

Відповідальний
за випуск:

Д. С. Яримбаш, доцент, канд.техн.наук.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 8
від «22» березня 2018 р.

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

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Дослідження зміни взаємоіндуктивного опору розсіювання між обмотками трансформатора при нерівномірному розподілу МРС.	6
1.1 Теоретичні відомості	6
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	14
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки	14
1.4 Програма роботи	15
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи	15
1.6 Зміст звіту	18
2 Дослідження впливу феромагнітних поверхонь на взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками	18
2.1 Теоретичні відомості	18
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	23
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки	23
2.4 Програма роботи	24
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи	24
2.6 Зміст звіту	26
3 Дослідження роботи автотрансформатора в режимі сталого короткого замикання при різних схемах з'єднання обмоток ...	26
3.1 Теоретичні відомості	26
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	30
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки	31
3.4 Програма роботи	31
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи	31
3.6 Зміст звіту	32
4 Дослідження сталих режимів короткого замикання та режимів навантаження триобмоткового трансформатора	33
4.1 Теоретичні відомості	33
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	36
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки	36
4.4 Програма роботи	36
4.5 Порядок виконання лабораторної роботи	37
4.6 Зміст звіту	39
5 Дослідження перехідних процесів в трансформаторі при вмиканні в мережу.	40

5.1 Теоретичні відомості	40
5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	46
5.3 Контрольні запитання для самоперевірки	46
5.4 Програма роботи	47
5.5 Порядок виконання лабораторної роботи	47
5.6 Зміст звіту	51
6 Дослідження трансформатора у режимі раптового короткого замикання	51
6.1 Теоретичні відомості	51
6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	54
6.3 Контрольні запитання для самоперевірки	54
6.4 Програма роботи	54
6.5 Порядок виконання лабораторної роботи	54
6.6 Зміст звіту	59
Рекомендована література.	60
Додаток А. Питання до іспиту з дисципліни СКЕМ	69

ВСТУП

Завдяки винаходу трансформатора стало можливе широке застосування системи змінного струму. Його наявність дала можливість виробляти електроенергію при напрузі, зручній для її генерування, передавати з напругою, відповідною мінімальним втратам, і споживати при напрузі, розрахованій на параметри електроприймачів.

Із зростанням потужності енергосистем відбувається поступове збільшення потужності одиниць трансформаторів, що пояснюється як економічними, так і технічними і експлуатаційними причинами.

При збільшенні потужності трансформатора:

- вартість втрат виходить дуже значною;
- доводиться застосовувати усе більш інтенсивні засоби охолодження;
- ростуть поля розсіяння і, пов'язані з ними, втрати в активних і конструктивних матеріалах трансформатора;
- ростуть механічні зусилля в трансформаторі;
- ускладнюється регулювання напруги під навантаженням.

Незважаючи на свою відносну простоту, трансформатор висуває ряд проблем, досить складних, щоб притягнути до себе увагу інженерно-технічних працівників, зайнятих у виробництві, експлуатації і випробуваннях трансформаторів.

Зростання потужності трансформатора, підвищення напруги, ускладнення конструкції, широке застосування автотрансформаторного з'єднання обмоток постійно висувають нові теоретичні проблеми, рішення яких є завданням майбутніх фахівців як в області проектування, так і в області технологічного передування в життя конструкторських рішень.

Початкові дані

При виконанні лабораторних робіт студент одержує індивідуальний варіант завдання – шестизначне число, яке є комбінацією цифр 1 чи 2. Початкові дані визначаються за таблицями відповідно варіанту.

В кожній лабораторній роботі будуть зроблені конкретні вказівки що до вибору початкових даних в залежності від типу перехідного процесу або особливостей конструкції силового трансформатора.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

1 ДОСЛІДЖЕННЯ ЗМІНИ ВЗАЄМОІНДУКТИВНОГО ОПОРУ РОЗСПОВАННЯ МІЖ ОБМОТКАМИ ТРАНСФОРМАТОРА ПРИ НЕРІВНОМІРНОМУ РОЗПОДІЛУ МРС

Мета роботи: визначення впливу додаткових каналів розсіювання виникаючих при нерівномірному розподілу МРС.

1.1 Теоретичні відомості

Польові методи визначення активних і індуктивних опорів обмоток трансформатора на підставі картини поля дають непогані результати при розрахунку простих концентричних обмоток, а також симетричних обмоток, що чергуються.

Реальні обмотки трансформаторів зазвичай складаються з декількох ділянок (тобто складні обмотки), що відрізняються геометричними розмірами в напрямі, перпендикулярному потоку розсіювання, товщиною ізоляції, щільністю струму і так далі.

Для вирішення цих проблем застосовують метод, заснований на теорії багатообмоткового трансформатора, метод потужностей, який базується на використанні закону збереження енергії активної і реактивної потужності та ін.

1.1.1 Взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками при рівномірному розподілу МРС

При рівномірному розподілі магніторушійних сил (МРС) в обох обмотках утворюється лише повздовжнє поле розсіювання. Це поле пронизує загальний канал розсіювання між обмотками, див. рис. 1.1.а.

Взаємоіндуктивний опір розсіювання у відносних одиницях визначається за формулою:

$$x_{\sigma d} = \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot k_{pd} \cdot S}{m \cdot u_g \cdot H} \cdot \sum_{i=1}^n D_{ci} \cdot a_i, \quad (1.1)$$

де f – частота прикладеної напруги, Гц;

k_{pd} – коефіцієнт Роговського повздовжнього поля розсіювання;

S – потужність трансформатора, кВА;

m – кількість фаз;

u_g – електрорушійна сила витка (ЕРС), В/виток;

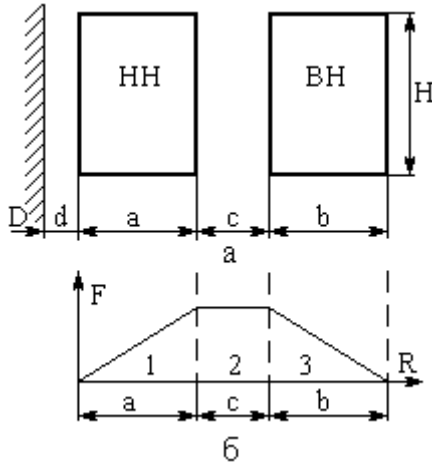
H – висота обмотки, м;

$\sum_{i=1}^n D_{ci} \cdot a_i$ – площа приведеного каналу розсіювання, м²;

n – кількість ділянок з лінійним розподілом;

D_{ci} – середній діаметр i -ої ділянки з лінійним розподілом МРС, м;

a_i – ширина i -ої ділянки каналу розсіювання, м.



a – розташування обмоток на стрижні;

b – епюра розподілу МРС для обмоток

Рисунок 1.1 – Розподіл МРС концентричних обмоток трансформатора

Коефіцієнт Роговського повздовжнього поля розсіювання визначається за формулою:

$$k_{pd} = 1 - \frac{1}{\pi \cdot u} \cdot (1 - e^{-\pi \cdot u}), \quad (1.2)$$

де u – відношення висоти каналу розсіювання (рівного висоті обмоток) до радіального розміру активної частини обмоток, між якими визначається взаєміндуктивний опір розсіювання

$$u = \frac{H}{a + b + c},$$

де a, b – радіальні розміри обмоток низької напруги (НН) та високої напруги (ВН), м;

c – радіальний розмір каналу між обмотками, м.

Для обмоток наведених на рис. 1.1.а епюра розподілу МРС в радіальному перерізі має вигляд рис 1.1.б.

Таким чином, згідно епюрі, $n = 3$ та площа приведенного каналу розсіювання визначається за наступною формулою:

$$\sum_{i=1}^n D_{ci} \cdot a_i = \frac{a}{3} \cdot D_{cHH} + c \cdot D_{cHH-BH} + \frac{b}{3} \cdot D_{cBH}, \text{ м}^2. \quad (1.3)$$

1.1.2 Вплив вертикальних каналів в обмотках на взаємоіндуктивний опір розсіювання

В обмотках із великим радіальним розміром (особливо в багатшарових обмотках), для покращення відводу тепла передбачають вертикальні канали, які розбивають обмотку на декілька концентрів (наприклад, на два (рис. 1.2)). При цьому МРС рівномірно розподіляється по висоті обмотки. Така конструкція обмоток призводить до зміни взаємоіндуктивного опору розсіювання.

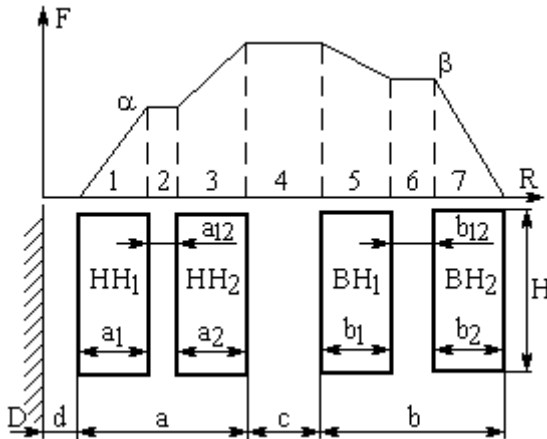


Рисунок 1.2 – Розташування обмоток з вертикальними каналами та епюра розподілу МРС

При цьому враховується, що епюра розподілу МРС в радіальному перерізі складається із семи ділянок з лінійним розподілом МРС.

Площа приведенного каналу розсіювання дорівнює

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n D_{ci} \cdot a_i &= \frac{\alpha^2}{3} \cdot a_1 \cdot D_{cHH1} + \alpha^2 \cdot a_{12} \cdot D_{cHH1-HH2} + \\ &+ \frac{1+\alpha+\alpha^2}{3} \cdot a_2 \cdot D_{cHH2} + c \cdot D_{cHH-BH} + \frac{1+\beta+\beta^2}{3} \cdot b_1 \cdot D_{cBH1} +, \quad (1.4) \\ &+ \beta^2 \cdot b_{12} \cdot D_{cBH1-BH2} + \frac{\beta^2}{3} \cdot b_2 \cdot D_{cBH2} \end{aligned}$$

де

$$\alpha = \frac{a_1}{a_1 + a_2}, \quad \beta = \frac{b_1}{b_1 + b_2}.$$

При дослідженні прийемо (див. рис. 1.2), що

$$a = a_1 + a_{12} + a_2, \quad b = b_1 + b_{12} + b_2.$$

Порядок проведення досліджень

При дослідженні застосуємо метод планування експерименту другого порядку. Складемо матрицю плану експерименту другого порядку для чотирьох факторів $y = f(x_1, x_2, x_3, x_4)$ в кодованих одиницях.

Функцією мети оберемо індуктивний опір розсіювання по осі d (вздовж осі стрижня) – $x_{\sigma d}$.

Факторами, що впливають на функцію мети, прийемо ширину каналів a_{12}, b_{12} , та місце розташування цих каналів в радіальному перерізі обмоток – відношення радіальних розмірів концентрів, які пропорційні відношенням МРС концентрів $HH_1 - HH_2$ й $BH_1 - BH_2$.

Таким чином, отримаємо поліном залежності функції мети від чотирьох факторів

$$x_{\sigma d} = f\left(a_{12}, b_{12}, \frac{a_1}{a_2}, \frac{b_1}{b_2}\right).$$

Перерахуємо значення факторів із кодованих у абсолютні значення.

Проведемо розрахунок $x_{\sigma d}$ за формулами (1.1) та (1.4).

Визначимо коефіцієнти полінома.

Проведемо аналіз полінома. Визначимо оптимальні значення ширини вертикальних каналів та місця їх розташування за умови, що

$$x_{\sigma d} \rightarrow \min.$$

1.1.3 Вплив горизонтальних каналів в обмотках на поперечне поле розсіювання та опір розсіювання

При наявності горизонтальних охолоджуючих каналів в обмотках трансформатора окрім повздовжнього поля розсіювання виникає поперечне поле, силові лінії якого замикаються по горизонтальним каналам, збільшуючи індуктивності розсіювання.

Методика визначення індуктивних опорів в цьому випадку базується на заміні намагнічуючої дії кожної обмотки сумою намагнічуючих дій двох обмоток

- обмотки НН – сумою дій двох обмоток НН₁ та НН₂,
- обмотки ВН – сумою дій ВН₁ та ВН₂.

Обмотки НН₁ та ВН₁ мають рівномірний розподіл МРС та створюють повздовжнє поле розсіювання, опір якого визначається за формулою (1.1).

Кожна із обмоток НН₂ та ВН₂ складена із котушок, що чергуються. Сума МРС кожної із цих обмоток дорівнює нулю. Ці обмотки створюють лише поперечне поле.

В цьому випадку взаємоіндуктивний опір між реальними обмотками НН та ВН дорівнює

$$x_{\sigma HH-BH} = x_{\sigma d} + x_{\sigma qHH} + x_{\sigma qBH}. \quad (1.5)$$

Якщо прийняти, що величина охолоджуючих каналів (h_2) між усіма котушками однакова, то

$$\begin{aligned} x_{\sigma qHH} &= \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot S \cdot h_2 \cdot D_c \cdot k_{pq}}{6 \cdot m \cdot u_6^2 \cdot n \cdot (h_1 + h_2) \cdot a}, \\ x_{\sigma qBH} &= \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot S \cdot h_2 \cdot D_c \cdot k_{pq}}{6 \cdot m \cdot u_6^2 \cdot n \cdot (h_1 + h_2) \cdot b}, \end{aligned} \quad (1.6)$$

де D_c - середній діаметр обмотки, м;

n - кількість котушок обмотки;

h_1 - висота котушки, м;

h_2 - висота горизонтального каналу, м;

k_{pq} - коефіцієнт Роговського поперечного поля розсіювання

a, b - радіальні розміри обмоток, м.

Коефіцієнт Роговського поперечного поля розсіювання визначається за формулою

$$k_{pq} = 1 - \frac{(1 - e^{-\pi \cdot u}) \cdot [1 - 0.5 \cdot e^{-2\pi \cdot v} \cdot (1 - e^{-\pi u})]}{\pi \cdot u}, \quad (1.7)$$

де

$$u_{HH} = \frac{a}{\tau_q}, \quad v_{HH} = \frac{\delta_{HH}}{\tau_q},$$

$$u_{BH} = \frac{b}{\tau_q}, \quad v_{BH} = \frac{\delta_{BH}}{\tau_q}.$$

δ - відстань від внутрішньої поверхні обмотки до осердя;

τ_q - ширина півхвилі МРС поперечного поля $\tau_q = h_1 + h_2$.

Дослідимо залежність $x_{\sigma q} = f(h_2, n)$, враховуючи діапазон зміни факторів, при висоті обмотки H

$$H = n \cdot (h_1 + h_2).$$

Для дослідження застосовують метод планування експерименту аналогічно пп. 1.1.2.

Визначають коефіцієнт збільшення взаємоіндуктивного опору між обмотками при наявності горизонтальних каналів за формулою

$$k_q = 1 + \frac{x_{\sigma q HH} + x_{\sigma q BH}}{x_{\sigma d}}. \quad (1.8)$$

1.1.4 Вплив наявності регулювальних котушок в обмотках на взаємоіндуктивний опір розсіювання

При наявності регулювальних витків в обмотках взаємоіндуктивний опір у великій мірі буде залежати від положення перемика-

ча напруги та від місця розташування регулювальної зони по висоті обмотки. В сучасному трансформаторобудуванні найчастіше розміщують регулювальні витки:

- на торці обмотки, (рис. 1.3, а);
- в середині обмотки, (рис. 1.3, б);
- по половині регулювальної зони, на відстані x від торців обмоток, (рис. 1.3, в), при цьому зазвичай

$$x = \left(\frac{1}{3} \div \frac{1}{4} \right) \cdot H.$$

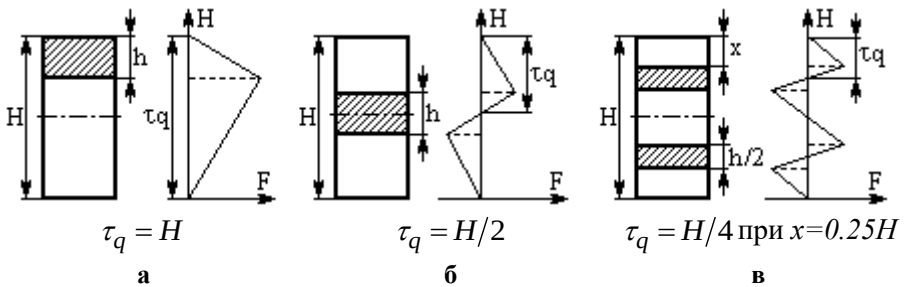


Рисунок 1.3 - Варіанти розташування регулювальних витків та епюри розподілу МРС поперечного поля по висоті обмотки

При відключенні будь-якої частини регулювальних витків, в залежності від положення перемикача, обмотка або зменшується по висоті на величину h (рис. 1.3, а), або в обмотці розривається МРС (рис. 1.3, б та в). Завдяки нерівномірному розподілу МРС по висоті обмотки виникає поперечне поле розсіювання.

Методика визначення взаємоіндуктивного опору в цьому випадку аналогічна пп. 1.1.3. Обмотку з нерівномірним розподілом МРС (частіше це обмотка ВН) замінюють двома обмотками:

- перша має рівномірний розподіл МРС та сумісно із обмоткою НН створює повздовжнє поле розсіювання,
- друга складається із котушок, що чергуються, та створює поперечне поле.

Тоді взаємоіндуктивний опір розсіювання

$$x_{\sigma HH-BH} = x_{\sigma dHH-BH} + x_{\sigma qBH}, \quad (1.9)$$

де $x_{sdHH-BH}$ – визначається за формулою (1.1);

$x_{\sigma qBH}$ – індуктивний опір розсіювання від поперечного поля визначається за формулою

$$x_{\sigma qBH} = A \cdot a_{pq}, \quad (1.10)$$

де

$$A = \frac{8 \cdot \pi^3 \cdot 10^{-5} \cdot f \cdot S \cdot H \cdot D_c \cdot k_{pq}}{m \cdot u_e^2 \cdot b}, \quad (1.11)$$

D_c – середній діаметр обмотки, м;

H – висота обмотки, м;

b – радіальний розмір обмотки, м;

a_{pq} – приведений канал розсіювання поперечного поля, в.о.

Коефіцієнт Роговського поперечного поля визначається за формулою (1.7), але для кожного варіанту розташування регулювальних витків ширина півхвилі МРС поперечного поля неоднакова (рис.1.3).

В реальних трансформаторах (рис.1.3, в) ширина другої та третьої півхвилі більше першої та четвертої. Значення ширини півхвилі залежить від значення x .

Приведений канал розсіювання також розраховується в залежності від схеми регулювання:

- для першого варіанту розташування регулювальної зони по висоті обмотки, (рис. 1.3, а)

$$a_{pq} = \frac{h^3}{3}, \quad (1.12)$$

- для другого (рис. 1.3, б)

$$a_{pq} = \frac{h^2 \cdot (1 + 2 \cdot h)}{12}, \quad (1.13)$$

- для третього (рис. 1.3, в)

$$a_{pq} = \frac{2}{3} \cdot \alpha^2 \cdot x + \frac{1}{3} \left(\alpha^2 + |\alpha| \cdot |\beta| + \beta^2 \right) \cdot h + \beta^2 (1 - 2x - h), \quad (1.14)$$

де

$$\alpha = \frac{x \cdot h}{1 - h}, \quad \beta = -\frac{h}{1 - h} \cdot \left(\frac{1}{2} - x - \frac{h}{2} \right),$$

h – частина висоти обмотки, котру займають регулювальні ампер-витки, в.о.;

x – відстань від торців обмотки до регулювальних витків, в.о.

Для визначення h та x у відносних одиницях за базовий розмір приймається висота обмотки H .

1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Визначення взаємоіндуктивного опору між двома обмотками рівної висоти та з рівномірним розподілом ампер-витків по висоті», «Визначення взаємоіндуктивних опорів між обмотками з нерівномірним розподілом ампер-витків по висоті». Ознайомитись з матеріалом п. 1.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1.3.1 Чому в трансформаторах визначається взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками, а не власний індуктивний опір окремих обмоток?

1.3.2 Які існують методи визначення взаємоіндуктивних опорів розсіювання?

1.3.3 На які динамічні характеристики трансформатора впливає взаємоіндуктивний опір?

1.3.4 Що таке приведений канал розсіювання?

1.3.5 Чим відрізняються методики визначення точного та наближеного значень приведенного каналу розсіювання?

1.3.6 Що враховує коефіцієнт Роговського при визначенні опору розсіювання?

1.3.7 Коли опір розсіювання буде більшим: при розташуванні регулювальних витків на торцях обмотки чи в середині?

1.3.8 Як впливає на динамічну стійкість обмоток трансформатора місце розташування регулювальних витків?

1.3.9 Нарисуйте епюру розподілу МРС трансформатора за умови, що кожна з обмоток (НН та ВН) складається з двох концентрів при порядку розташування на стрижні: $НН_1 \rightarrow ВН_1 \rightarrow НН_2 \rightarrow ВН_2$.

1.4 Програма роботи

1.4.1 Розрахувати взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками при рівномірному розподілі МРС.

1.4.2 Дослідити вплив вертикальних каналів в обмотках на взаємоіндуктивний опір розсіювання.

1.4.3 Дослідити вплив горизонтальних каналів в обмотках на поперечне поле розсіювання та опір розсіювання.

1.4.4 Дослідити вплив регулювальних котушок в обмотках при різних положеннях перемикача напруги та різному положенні регулювальних котушок по висоті обмотки на взаємоіндуктивний опір розсіювання.

1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

В лабораторній роботі досліджується двообмотковий трансформатор потужністю $S = 40000$ кВА, з ЕРС витка $u_g = 100$ В/виток. Обмотка НН складається із 60 котушок ($n_{HH} = 60$), а обмотка ВН із 80 котушок ($n_{BH} = 80$). Геометричні розміри:

D – діаметр стрижня трансформатора, м;

H – висота обмотки, м;

d – радіальний розмір каналу між обмоткою НН та стрижнем, м;

a, b – радіальні розміри обмоток НН та ВН, м;

c – радіальний розмір каналу між обмотками, м,

згідно рис. 1.1 у відповідності з варіантом обираються з табл. 1.1.

Таблиця 1.1 – Початкові дані: геометричні розміри (в метрах)

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Геометричні розміри	D	H	d	a	b	c
Цифра 1	0.20	2.0	0.02	0.10	0.20	0.04
Цифра 2	0.25	2.3	0.03	0.12	0.23	0.05

1.5.1 Провести розрахунок взаємоіндуктивного опору розсіювання між обмотками при рівномірному розподілі МРС за (1.1).

Для цього (за пп. 1.1.1) розрахувати коефіцієнт Роговського по-
вздовжнього поля розсіювання за (1.2) та площу приведенного каналу
розсіювання за (1.3).

1.5.2 Провести дослідження впливу вертикальних каналів в об-
мотках на взаємоіндуктивний опір розсіювання (за пп. 1.1.2).

Прийняти діапазон зміни факторів

$$a_{12} = (0.05 \div 0.15)a,$$

$$b_{12} = (0.05 \div 0.15)b,$$

$$\frac{a_1}{a_2} = \frac{b_2}{b_1} = 0.8 \div 1.2.$$

Розбити обмотки НН та ВН на два концентри, див. рис. 1.2.

Дослідити вплив вертикальних каналів в обмотках НН та ВН
при різних розмірах цих каналів та знайти місця їх оптимального роз-
ташування. Врахувати, що епюра розподілу МРС в радіальному пере-
різі буде складатися із семи ділянок з лінійним розподілом МРС.

1.5.3 Провести дослідження впливу горизонтальних каналів в
обмотках (за пп. 1.1.3) на поперечне поле розсіювання та опір розсію-
вання.

Для дослідження застосувати метод планування експерименту
аналогічно пп. 1.1.2.

Функцією мети обрати індуктивний опір розсіювання по вісі q (у
радіальному напрямку) – $\chi_{\sigma q}$.

Факторами, що впливають на функцію мети, прийняти кількість
катушок у обмотках n , та висоту горизонтальних каналів між катуш-
ками.

Замінити намагнічуючу дію кожної обмотки сумою намагнічу-
ючих дій двох обмоток.

Прийняти величину охолоджуючих каналів (h_2) однаковою між
усіма катушками.

Визначити коефіцієнт Роговського поперечного поля розсію-
вання за (1.7).

Отримати поліном залежності функції мети

$$x_{\sigma q} = f(h_2, n),$$

при висоті обмотки

$$H = n \cdot (h_1 + h_2).$$

Прийняти діапазон зміни факторів

$$n = 60 \div 80, \quad h_1/h_2 = 1 \div 1.5.$$

Визначити коефіцієнт збільшення взаємоіндуктивного опору між обмотками при наявності горизонтальних каналів за (1.8).

Розрахувати взаємоіндуктивний опір між реальними обмотками НН та ВН за (1.5).

1.5.4 Провести дослідження (за **пп. 1.1.4**) впливу регулювальних котушок на взаємоіндуктивний опір розсіювання.

1.5.4.1 Для першого та другого варіантів розташування регулювальних витків (рис. 1.3, а та б) визначити залежності

$$k_q = 1 + \frac{x_{\sigma qBH}}{x_{\sigma dHH-BH}},$$

при діапазоні зміни висоти регулювальної зони

$$h = (0.05 \div 0.4) \text{ в.о.}$$

Побудувати графік залежностей $k_q = f(h)$.

1.5.4.2 Для третього варіанту (рис. 1.3, в) розташування регулювальних витків визначити залежність

$$k_q = f(x)$$

при діапазоні зміни відстані від торців обмоток x для трьох фіксованих значень висоти регулювальної зони:

$$h = 0.1 \text{ в.о.,}$$

$$x = (0 \div 0.5) \text{ в.о.} \quad \text{при} \quad h = 0.2 \text{ в.о.,}$$

$$h = 0.3 \text{ в.о.}$$

Побудувати графік залежностей $k_q = f(x)$ для трьох значень h .

Для визначення h та x у відносних одиницях за базовий розмір приймається висота обмотки Н.

1.6 Зміст звіту

1.6.1 Розрахунок взаємоіндуктивного опору при рівномірному розподілі МРС.

1.6.2 Матриця планування експерименту для визначення впливу вертикальних каналів. Поліном залежності $\chi_{\sigma d}$ в функції від місця розташування та величини вертикальних каналів.

1.6.3 Матриця планування експерименту для визначення впливу горизонтальних каналів. Поліном залежності $\chi_{\sigma q}$ в функції від висоти горизонтальних каналів та їх кількості. Коефіцієнт збільшення взаємоіндуктивного опору між обмотками при наявності горизонтальних каналів.

1.6.4 Розрахунки залежності k_q від різних варіантів розташування регулювальних витків та графіки залежностей k_q .

1.6.5 Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2

2 ДОСЛІДЖЕННЯ ВПЛИВУ ФЕРОМАГНІТНИХ ПОВЕРХОНЬ НА ВЗАЄМОІНДУКТИВНИЙ ОПІР РОЗСПІВАННЯ МІЖ ОБМОТКАМИ

Мета роботи: визначити зміну взаємоіндуктивного опору розсіювання при різному розміщенні обмоток відносно осердя та ярем.

2.1 Теоретичні відомості

Врахувати вплив феромагнітних поверхонь при розрахунку взаємоіндуктивних опорів розсіювання дозволяє метод середньо-геометричних відстаней (СГВ). Розглянемо його на прикладі двообмоткового трансформатора.

Взаємоіндуктивний опір визначається за формулою

$$\chi = \frac{4\pi^2 \cdot 10^{-4} \cdot f \cdot S}{m \cdot u_g^2} \cdot (A + B + C), \%, \quad (2.1)$$

де S – потужність трансформатора, кВА;

u_g – ЕРС витка, В/виток;

f – частота напруги, Гц;

A – коефіцієнт, що враховує середньо-геометричну відстань між обмотками;

B та C – коефіцієнти, що враховують вплив феромагнітних поверхонь – осердя та ярем відповідно.

Порядок проведення досліджень

При дослідженні зазвичай застосовують метод планування експерименту другого порядку.

Функціями мети обирають:

- X_1 – взаємоіндуктивний опір між обмотками без врахування феромагнітних поверхонь. У формулі (2.1) приймають $B = C = 0$ та визначають лише A ;

- X_2 – взаємоіндуктивний опір між обмотками із врахуванням впливу осердя. У формулі (2.1) приймають $C = 0$, визначають A та B ;

- X_3 – взаємоіндуктивний опір між обмотками із врахуванням впливу ярем. У формулі (2.1) приймають $B = 0$, визначають A та C ;

- X_4 – взаємоіндуктивний опір між обмотками із врахуванням впливу всіх феромагнітних поверхонь. Визначають всі три коефіцієнти: A , B та C .

Факторами, які впливають на функції мети, приймають міжосьові відстані між центрами обмоток:

- в радіальному напрямку – x ;

- в осьовому напрямку – y .

Відстані x та y змінюють у діапазонах, необхідних для проведення дослідів. Величини цих відстаней в наведених нижче формулах застосовують у відносних одиницях

$$x' = x / a, \quad y' = y / h.$$

Визначають поліноми

$$\left. \begin{aligned} X_1 &= f(x, y) \\ X_2 &= f(x, y) \\ X_3 &= f(x, y) \\ X_4 &= f(x, y) \end{aligned} \right\}. \quad (2.2)$$

Розраховують коефіцієнти зміни взаємоіндуктивних опорів, що обумовлені феромагнітними поверхнями:

- коефіцієнт впливу стрижня $k_{cm} = X_2 / X_1$;
- коефіцієнт впливу ярем $k_{я} = X_3 / X_1$;
- коефіцієнт впливу всіх феромагнітних поверхонь $k_c = X_4 / X_1$.

Коефіцієнт A враховує середньо-геометричну відстань між первинною (індекс 1) та вторинною (індекс 2) обмотками (рис. 2.1)

$$A = 2D_{12} \cdot \ln q_{12} - D_1 \cdot \ln q_1 - D_2 \cdot \ln q_2, \quad (2.3)$$

де D_1, D_2 та D_{12} – середні діаметри первинної й вторинної обмоток та каналу між ними, см;

q_{12} – середньо-геометрична відстань між обмотками;

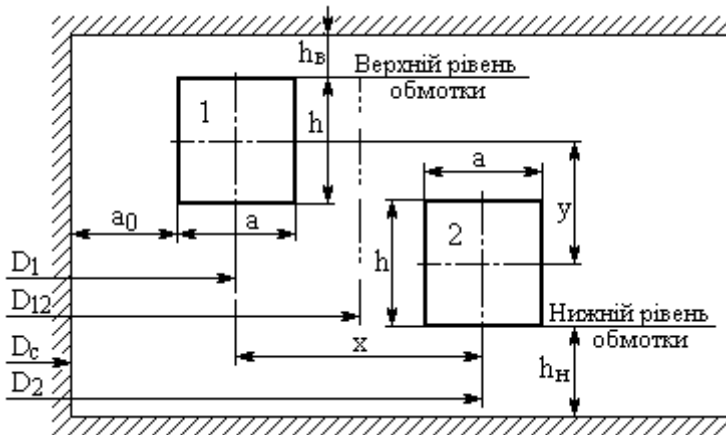
q_1, q_2 – середньо-геометричні відстані обмоток відносно самих себе.

Геометричні розміри обмоток рівні (тобто $q_1 = q_2 = q$)

$$q = h + a. \quad (2.4)$$

Тоді спростимо формулу (2.3)

$$A = 2D_{12} \cdot \ln q_{12} - (D_1 + D_2) \cdot \ln q. \quad (2.5)$$



D_c – діаметр стрижня; h – висоти обмоток; a – радіальні розміри обмоток; a_0 – ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою НН; h_B, h_H – ізоляційні відстані від ярем до обмоток; x, y – відстані між центрами обмоток у радіальному та осьовому напрямках відповідно

Рисунок 2.1 – Розташування обмоток у вікні магнітної системи

Вплив феромагнітних поверхонь враховується за допомогою коефіцієнтів **B** (вплив осердя) та **C** (вплив ярем). Визначення цих коефіцієнтів здійснюється за методом дзеркальних відображень (рис. 2.2)

$$B = D_c \cdot (2 \ln q_{14} - \ln q_{13} - \ln q_{24}), \quad (2.6)$$

$$C = 2D_{12} \cdot (\ln q_{16} + \ln q_{18}) - D_1 \cdot (\ln q_{15} + \ln q_{17}) - D_2 \cdot (\ln q_{26} + \ln q_{28}). \quad (2.7)$$

Таким чином, для визначення коефіцієнтів A, B та C необхідно визначити десять середньо-геометричних відстаней між обмотками, які поділяються на дві групи.

Перша група для обмоток, що мають зміщення між центрами, як в радіальному, так і у осьовому напрямках. Це середньо-геометричні відстані

$$q_{12}, q_{14}, q_{16}, q_{18} \text{ тобто } q_{1i}, \text{ де } i = 2, 4, 6, 8.$$

Логарифм цих середньо-геометричних відстаней визначається за формулою

$$\begin{aligned} \ln q_{1i} = & \alpha \cdot [\alpha' \cdot \ln(h_1 + z_1) + \beta' \cdot \ln(h_1 + z_2) - 2\gamma' \cdot \ln(h_1 + z_3)] + \\ & + \beta \cdot [\alpha' \cdot \ln(h_2 + z_1) + \beta' \cdot \ln(h_2 + z_2) - 2\gamma' \cdot \ln(h_2 + z_3)] - , \quad (2.8) \\ & - 2\gamma \cdot [\alpha' \cdot \ln(h_3 + z_1) + \beta' \cdot \ln(h_3 + z_2) - 2\gamma' \cdot \ln(h_3 + z_3)] \end{aligned}$$

де

$$\begin{aligned} \alpha &= \frac{h_1^2}{2h^2}, \quad \beta = \frac{h_2^2}{2h^2}, \quad \gamma = \frac{h_3^2}{2h^2}, \\ \alpha' &= \frac{z_1^2}{2a^2}, \quad \beta' = \frac{z_2^2}{2a^2}, \quad \gamma' = \frac{z_3^2}{2a^2}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Залежності h_i та z_i від геометричних розмірів трансформатора для різних значень **i** наведено в таблиці 2.1.

В таблиці 2.1 геометричні розміри h , a , a_0 , h_6 , h_n в сантиметрах, а x , y у відносних одиницях.

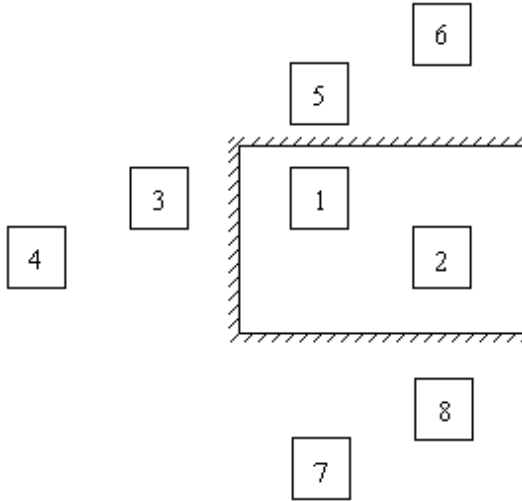


Рисунок 2.2 – Дзеркальне відображення обмоток 1 та 2 від стрижня та ярем

Таблиця 2.1 – Значення h_i та z_i для різних значень i у (2.7)

	$i = 2$	$i = 4$	$i = 6$	$i = 8$
h_1	$h \cdot (1 + y)$	$h \cdot (1 + y)$	$2h_g + h \cdot (y + 2)$	$2h_g + h \cdot (y + 2)$
h_2	$h \cdot (y - 1)$	$h \cdot (y - 1)$	$2h_g + h \cdot y$	$2h_n + h \cdot y$
h_3	$h \cdot y$	$h \cdot y$	$2h_g + h \cdot (y + 1)$	$2h_n + h \cdot (y + 1)$
z_1	$a \cdot (1 + x)$	$2a_0 + a \cdot (x + 2)$	$a \cdot (1 + x)$	$a \cdot (1 + x)$
z_2	$a \cdot (x - 1)$	$2a_0 + a \cdot x$	$a \cdot (x - 1)$	$a \cdot (x - 1)$
z_3	$a \cdot x$	$2a_0 + a \cdot (x + 1)$	$a \cdot x$	$a \cdot x$

Друга група середньо-геометричних відстаней для обмоток із зміщенням між центрами обмоток в одному напрямку: радіальному – q_{13} та q_{24} або осьовому – q_{15} , q_{26} , q_{17} , q_{28} визначається за формулою

$$\ln q_{ij} = \alpha \cdot \ln(H + z_1) + \beta \cdot \ln(H + z_2) - 2\gamma \cdot \ln(H + z_3). \quad (2.10)$$

Таблиця 2.2 – Значення величин у формулі (2.9)

	q_{13}	q_{24}	q_{15}	q_{26}	q_{17}	q_{28}
H	h	h	a	a	a	a
z_1	$2(a_0 + a)$	$2(a_0 + a) \times \times (x + 1)$	$2(h_g + h)$	$2(h_g + h) \times \times (y + 1)$	$2(h_n + h) \times \times (y + 1)$	$2(h_n + h)$
z_2	$2a_0$	$2(a_0 + a \cdot x)$	$2h_g$	$2(h_g + h \cdot y)$	$2(h_n + h \cdot y)$	$2h_n$
z_3	$2(a_0 + a)$	$2(a_0 + a) \times \times (x + 0.5)$	$2(h_g + h)$	$2(h_g + h) \times \times (y + 0.5)$	$2(h_n + h) \times \times (y + 0.5)$	$2(h_n + h)$
α	$\frac{Z_1^2}{2a^2}$	$\frac{Z_1^2}{2a^2}$	$\frac{Z_1^2}{2h^2}$	$\frac{Z_1^2}{2h^2}$	$\frac{Z_1^2}{2h^2}$	$\frac{Z_1^2}{2h^2}$
β	$\frac{Z_2^2}{2a^2}$	$\frac{Z_2^2}{2a^2}$	$\frac{Z_2^2}{2h^2}$	$\frac{Z_2^2}{2h^2}$	$\frac{Z_2^2}{2h^2}$	$\frac{Z_2^2}{2h^2}$
γ	$\frac{Z_3^2}{2a^2}$	$\frac{Z_3^2}{2a^2}$	$\frac{Z_3^2}{2h^2}$	$\frac{Z_3^2}{2h^2}$	$\frac{Z_3^2}{2h^2}$	$\frac{Z_3^2}{2h^2}$

Значення величин, що входять у формулу (2.10) в залежності від i та j наведені в таблиці 2.2.

При розрахунках за таблицями 2.1 – 2.2 величини H та z для формул (2.8) та (2.10) необхідно брати за модулем.

2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Метод середньогометричних відстаней (СГВ) для розрахунку індуктивних опорів або індуктивностей трансформатора». Ознайомитись з матеріалом п. 2.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

2.3.1 Що таке спряжені площини, та як цей термін застосовується при розрахунку взаєміндуктивних опорів між обмотками трансформатора?

2.3.2 На яких лемах засноване визначення взаємоіндуктивних опорів при вільному розташуванні обмоток на стрижні?

2.3.3 Як впливає середня довжина витка обмотки на точність розрахунку взаємоіндуктивних опорів?

2.3.4 Що більш впливає на взаємоіндуктивний опір: осердя чи ярмо? Чому?

2.4 Програма роботи

2.4.1 Провести аналіз метода розрахунку взаємоіндуктивного опору, що дозволяє визначити вплив феромагнітних поверхонь.

2.4.2 Дослідити вплив осердя на взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками.

2.4.3 Дослідити вплив ярма на взаємоіндуктивний опір розсіювання між обмотками.

2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Початкові дані

В лабораторній роботі дослідити двообмотковий трансформатор потужністю $S = 40000$ кВА, що має електрорушійну силу витка (ЕРС) $U_g = 100$ В/виток.

Геометричні розміри (рис. 2.1):

D_c – діаметр стрижня, см;

a_0 – ізоляційна відстань між осердям та обмоткою НН, яка розташована ближче до стрижня, см;

a – радіальний розмір (однаковий для обох обмоток), см;

h – висота обмотки (обмотки мають однакову висоту), см;

h_g – ізоляційна відстань від верхнього ярма до верхнього рівня обмотки, см;

h_n – ізоляційна відстань від нижнього ярма до нижнього рівня обмотки, см.

Геометричні розміри обрати, згідно варіанту із таблиці 2.3.

Дослідити вплив феромагнітних поверхонь при розрахунку взаємоіндуктивних опорів розсіювання методом середньо-геометричних відстаней, див. пп. 2.1.

При дослідженні застосувати метод планування експерименту другого порядку.

Таблиця 2.3 – Геометричні розміри (в сантиметрах)

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Геометричні розміри	D_c	a_0	a	h	h_g	h_n
Цифра 1	20	2	10	100	10	7
Цифра 2	25	3	12	120	12	7.5

Функціями мети обрати взаємоіндуктивні опори без та з врахуванням феромагнітних поверхонь - $X_1 - X_4$.

Факторами прийняти міжосьові відстані між центрами обмоток:

- в радіальному напрямку – x , в.о.;

- в осьовому напрямку – y , в.о.

Дослідження провести у наступних діапазонах змін цих величин

$$\left. \begin{array}{l} x' = 1 \div 2 \\ y' = 0 \div 2 \end{array} \right\}.$$

Визначити поліноми

$$\left. \begin{array}{l} X_1 = f(x, y) \\ X_2 = f(x, y) \\ X_3 = f(x, y) \\ X_4 = f(x, y) \end{array} \right\}.$$

Розрахувати коефіцієнти зміни взаємоіндуктивних опорів, що обумовлені феромагнітними поверхнями:

- коефіцієнт впливу стрижня $k_{cm} = X_2 / X_1$;

- коефіцієнт впливу ярем $k_{я} = X_3 / X_1$;

- коефіцієнт впливу всіх феромагнітних поверхонь $k_c = X_4 / X_1$.

Побудувати графіки залежностей k_{cm} , $k_{я}$, $k_c = f(y)$ при $x = 1.5$.

Побудувати графіки залежностей k_{cm} , $k_{я}$, $k_c = f(x)$ при $y = 0$.

Взаємоіндуктивні опори визначити по (2.1).

Коефіцієнт A розрахувати методом СГВ.

Вплив феромагнітних поверхонь врахувати за допомогою коефіцієнтів B та C методом дзеркальних відображень.

При розрахунках за таблицями 2.1 – 2.2 величини H та z для формул (2.8) та (2.10) необхідно брати за модулем.

2.6 Зміст звіту

2.6.1 Початкові дані.

2.6.2 Поліноми залежностей (2.2).

2.6.3 Графіки залежностей k_{cm} , k_y , $k_c = f(y)$ при $x = 1.5$.

2.6.4 Графіки залежностей k_{cm} , k_y , $k_c = f(x)$ при $y = 0$.

2.6.5 Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 З ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ АВТОТРАНСФОРМАТОРА В РЕЖИМІ СТАЛОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ПРИ РІЗНИХ СХЕМАХ З'ЄДНАННЯ ОБМОТОК

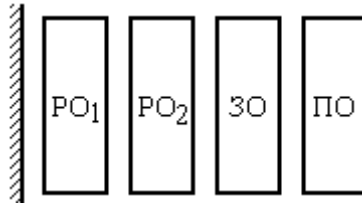
Мета роботи: визначити вплив схеми з'єднання послідовної, загальної та регулювальної обмоток на реактивну складову напруги короткого замикання.

3.1 Теоретичні відомості

Дослідимо однофазний автотрансформатор з регулюванням напруги в лінії низької напруги (НН). При цьому регулювальна обмотка складається з двох концентрів – PO_1 та PO_2 . Обмотки розташовані на стрижні концентрично (рис.3.1).

При проектуванні автотрансформаторів застосовують три схеми з'єднання (рис. 3.2) послідовної, загальної та регулювальної обмоток між собою:

- схема «в розтин» (рис.3.2, а),
- схема «виделка» (рис.3.2, б),
- схема «регулювання в нейтралі» (рис.3.2, в).



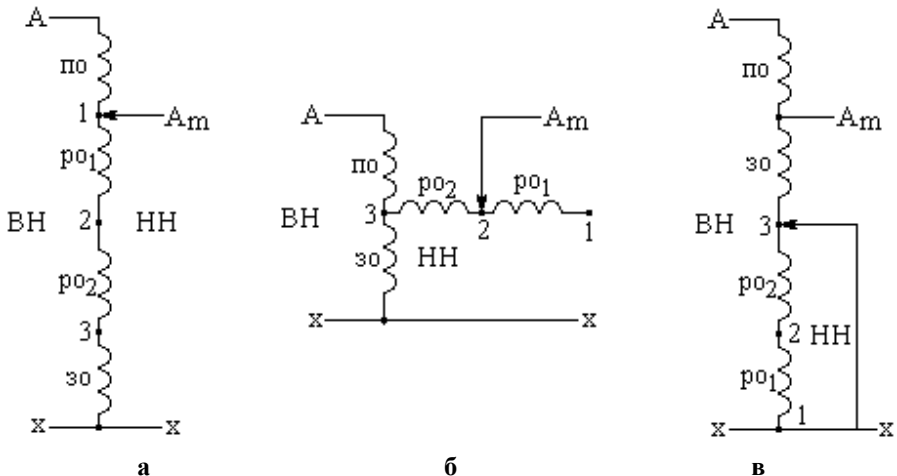
ZO – загальна обмотка; **ПО** – послідовна обмотка;
PO₁ та **PO₂** – регулювальні обмотки

Рисунок 3.1 – Розташування обмоток на стрижні

В схемах «в розтин» та «виделка» лінійний відвід сторони **НН** **Am** може займати три положення:

- **т. 1** – перше положення – максимальна напруга на стороні **НН**,
- **т. 2** – друге положення – номінальна напруга на стороні **НН**,
- **т. 3** – третє положення – мінімальна напруга на стороні **НН**.

В схемі «регулювання в нейтралі» аналогічне положення займає нейтральний відвід **x**.



а – схема «в розтин»; **б** – схема «виделка»;
в – схема «регулювання в нейтралі»

Рисунок 3.2 – Схеми з'єднання послідовної, загальної та регулювальної обмоток

Еквівалентний індуктивний опір автотрансформатора, чисельне значення якого дорівнює реактивній складовій напруги короткого замикання, із схемами з'єднання «в розтин» та «регулювання в нейтралі» визначається за формулою

$$x_{eA} = k_B^2 \cdot x_{eT}, \quad (3.1)$$

де k_B – коефіцієнт вигідності автотрансформатора при обмотках, розташованих на одному стрижні

$$k_B = \frac{U_{BH} - U_{HH}}{U_{BH}} = \frac{w_{BH} - w_{HH}}{w_{BH}},$$

x_{eT} – еквівалентний індуктивний опір трансформатора, отриманого при розриві електричного зв'язку між послідовною та загальною обмотками.

Наприклад, для автотрансформатора зі схемою з'єднання «в розтин» при трьох різних положеннях перемикача отримаємо еквівалентні трансформатори показані на рис. 3.3.



а – максимальна напруга на стороні НН; б – номінальна напруга на стороні НН;
в – мінімальна напруга на стороні НН

Рисунок 3.3 – Перетворення автотрансформаторного зв'язку в трансформаторний при схемі з'єднання «в розтин»

Використовуючи метод потужностей x_{eT} дорівнює

$$x_{eT} = -\frac{1}{2} \sum_{p=1}^n \sum_{q=1}^n I_p \cdot I_q \cdot x_{pq} \quad (3.2)$$

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

I_p, I_q – струми контурів у відносних одиницях.

Приймають, зазвичай, струми:

- первинної сторони за одиницю – 1,

- вторинної сторони за мінус одиницю – -1.

Струми в окремих контурах при їх послідовному з'єднанні визначають за формулою

$$I_i = \frac{w_i}{w_{o\delta}},$$

де w_i – кількість витків i -го контуру;

$w_{o\delta}$ – алгебраїчна сума витків усіх обмоток первинної та вторинної сторони, в залежності від того, на якому боці розташований i -й контур.

В автотрансформаторі зі схемою з'єднання «в розтин» кількість витків на стороні ВН не змінюється із зміною положення перемикача. Тому, при розрахунках за формулою (3.2) x_{pq} однакове при всіх положеннях перемикача.

В автотрансформаторі зі схемою «регулювання в нейтралі» при кожному положенні перемикача змінюється кількість витків на стороні ВН, тобто змінюється електрорушійна сила витка (ЕРС). Це призводить до зміни взаємодуктивних опорів між контурами (див. (1.1) з п. 1.1).

При положеннях перемикача на номінальному та максимальному ступенях регулювання, тобто в т. 1 та 2, значення опору x_{pq} необхідно перерахувати за формулою

$$x'_{pq} = \beta^2 \cdot x_{pq},$$

де β – коефіцієнт, при номінальному положенні перемикача

$$\beta = \frac{w_{ПО} + w_{3O} + w_{PO2}}{w_{ПО} + w_{3O}};$$

при максимальному положенні перемикача

$$\beta = \frac{w_{ПО} + w_{ЗО} + w_{РО1} + w_{РО2}}{w_{ПО} + w_{ЗО}}.$$

При з'єднанні обмоток за схемою «виделка» розривається електричний зв'язок між послідовною (1), загальною (2) та регулювальною (3) обмотками (рис. 3.4).

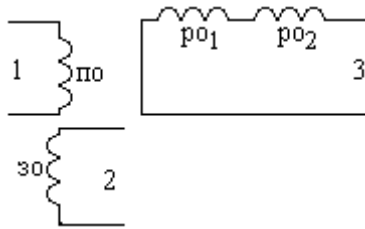


Рисунок 3.4 – Перетворення автотрансформаторного зв'язку в трансформаторний при схемі з'єднання «виделка»

Еквівалентний індуктивний опір автотрансформатора визначається за формулою

$$x_{eA} = k_B^2 \cdot [k \cdot x_{12} + (1-k) \cdot x_{13} - k(1-k) \cdot x_{23}], \quad (3.3)$$

де

$$k_B = \frac{w_{ПО}}{w_{ПО} + w_{ЗО}}, \quad k = \frac{w_{ЗО}(w_{ПО} - w_{РО})}{w_{ПО}(w_{ЗО} + w_{РО})},$$

x_{12} – еквівалентний опір двообмоткового трансформатора, складеного з послідовної та загальної обмоток;

x_{13} – еквівалентний опір двообмоткового трансформатора, складеного з послідовної та регулювальної обмоток;

x_{23} – еквівалентний опір двообмоткового трансформатора, складеного з загальної та регулювальної обмоток.

3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Визначення еквівалентних індуктивних опорів автотрансформатора». Ознайомитись з мате-

ріалом п. 3.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки

3.3.1 Які існують засоби передавання енергії від первинної обмотки у вторинну в автотрансформаторах?

3.3.2 Що таке повна та електромагнітна потужності автотрансформатора, яке співвідношення між ними?

3.3.3 Коли доцільно застосовувати автотрансформатори?

3.3.4 Переваги та недоліки регулювання напруги за схемою «в розтин».

3.3.5 Застосування схеми «регулювання в нейтралі».

3.4 Програма роботи

3.4.1 Дослідити параметри автотрансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «в розтин».

3.4.2 Дослідити параметри автотрансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «виделка».

3.4.3 Дослідити параметри автотрансформатора при з'єднанні обмоток за схемою «регулювання в нейтралі».

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Початкові дані

В лабораторній роботі дослідити однофазний автотрансформатор з регулюванням напруги в лінії НН. При цьому регульовальна обмотка складається з двох концентрів – PO_1 та PO_2 . Обмотки розташовані на стрижні концентрично, як показано на рис.3.1.

Взаємоіндуктивні опори між обмотками обирати з таблиці 3.1.

Таблиця 3.1 – Взаємоіндуктивні опори між концентрами (у %)

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Параметр	$X_{po1-po2}$	X_{po1-zo}	X_{po1-no}	X_{po2-zo}	X_{po2-no}	X_{zo-no}
Цифра 1	4.3	32	65	18	60	35
Цифра 2	4.5	33	67	20	64	40

Кількість витків в обмотках: загальна - $w_{3O} = 450$; послідовна - $w_{1O} = 500$; 1-ий концентр регулювальної обмотки - $w_{PO1} = 25$; 2-ий концентр регулювальної обмотки - $w_{PO2} = 25$.

3.5.1 Розрахувати реактивні складові напруг короткого замикання для трьох схем з'єднання обмоток при трьох положеннях перемикача. Результати розрахунків звести до таблиці 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунку u_{PK}

Схема з'єднання обмоток	Положення перемикача		
	1	2	3
«В розтин»			
«Виделка»			
«Регулювання в нейтралі»			

3.5.2 Провести дослідження залежності напруги короткого замикання від коефіцієнту вигідності. Дослідження провести для всіх трьох схем з'єднання при номінальному положенні перемикача, зберігаючи незмінною суму числа витків послідовної та загальної обмоток

$$w_{1O} + w_{3O} = 950.$$

Розрахувати реактивну складову напруги короткого замикання при числі витків послідовної обмотки: 400, 450, 500, 550, 600.

Накреслити графіки залежності $u_{PK} = f(k_B)$ при номінальному положенні перемикача для трьох схем з'єднання обмоток.

3.6 Зміст звіту

3.6.1 Початкові дані.

3.6.2 Розрахунок реактивної складової напруги короткого замикання автотрансформатора при трьох положеннях перемикача для всіх трьох схем з'єднання обмоток.

3.6.3 Графіки залежності $u_{PK} = f(k_B)$ при номінальному положенні перемикача для трьох схем з'єднання обмоток.

3.6.4 Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

4 ДОСЛІДЖЕННЯ СТАЛИХ РЕЖИМІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ ТА РЕЖИМІВ НАВАНТАЖЕННЯ ТРИБОМОТКОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: визначення струморозподілу в обмотках триобмоткового трансформатора при різних режимах роботи.

4.1 Теоретичні відомості

Дослідимо триобмотковий трансформатор (рис.4.1). Обмотки розташовані на стрижні концентрично. Обмотка ВН (1) являється живлячою обмоткою, а обмотки СН (2) та НН (3) підключені до навантаження або короткозамкнені.

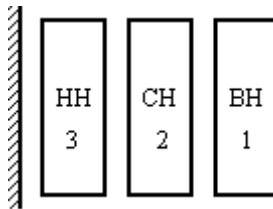


Рисунок 4.1 – Розташування обмоток на стрижні

Триобмотковий трансформатор має два ступеня волі, тому струми вторинної та третинної обмоток знаходяться не в протифазі до первинної обмотки, але завжди виконується умова: геометрична сума векторів струму всіх обмоток дорівнює нулеві (рис 4.2).

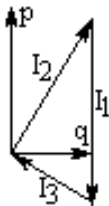


**Рисунок 4.2 – Сума векторів
струмів всіх обмоток**

Прийmemo струм первинної обмотки за одиницю, а струми вторинної та третинної обмоток розкладемо по двом взаємоперпендикулярним напрямкам:

$$\left. \begin{aligned} I_1 &= 1 \\ I_2 &= -p + j \cdot q \\ I_3 &= -(1-p) - j \cdot q \end{aligned} \right\}. \quad (4.1)$$

Струморозподіл у вторинній та третинній обмотках (значення p та q) залежить від параметрів обмоток та навантаження цих обмоток, та визначається за формулами

$$p = \frac{(r_{H2} - r_{H3} - 2r_{23})(r_{12} - r_{13} - r_{23} - r_{H3}) + (x_{H2} - x_{H3} - 2x_{23})(x_{12} - x_{13} - x_{23} - x_{H3})}{(r_{H2} - r_{H3} - 2r_{23})^2 + (x_{H2} - x_{H3} - 2x_{23})^2} \quad (4.2)$$

$$q = \frac{(x_{H2} - x_{H3} - 2x_{23})(r_{12} - r_{13} - r_{23} - r_{H3}) - (r_{H2} - r_{H3} - 2r_{23})(x_{12} - x_{13} - x_{23} - x_{H3})}{(r_{H2} - r_{H3} - 2r_{23})^2 + (x_{H2} - x_{H3} - 2x_{23})^2} \quad (4.3)$$

де r_{H2}, r_{H3} – активні навантаження вторинної й третинної обмоток;

x_{H2}, x_{H3} – індуктивні навантаження вторинної й третинної обмоток;

r_{12}, r_{13}, r_{23} – сумарні активні опори обмоток трансформатора;

$$r_{12} = r_1 + r_2, \quad r_{13} = r_1 + r_3, \quad r_{23} = r_2 + r_3;$$

x_{12}, x_{13}, x_{23} – взаємоіндуктивні опори обмоток трансформатора.

Визначення струмів короткого замикання вторинної та третинної обмоток при одночасному короткому замиканні цих обмоток

Режиму короткого замикання в (4.2) та (4.3) відповідають опори

$$r_{H2} = r_{H3} = x_{H2} = x_{H3} = 0.$$

Складові напруги КЗ трансформатора у відносних одиницях (в.о.) для цього режиму визначаються за формулами

$$u_{pK} = p \cdot x_{12} + (1 - p) x_{13} - p(1 - p) x_{23} + q^2 \cdot x_{23} \quad (4.4)$$

$$u_{aK} = p \cdot r_{12} + (1 - p) r_{13} - p(1 - p) r_{23} + q^2 \cdot r_{23} \quad (4.5)$$

Кидки струму в первинній, вторинній та третинній обмотках зазвичай оцінюють за допомогою коефіцієнтів кидку сталого струму КЗ

$$k_1 = \frac{I_1}{u_K}, \quad k_2 = \frac{I_2}{u_K}, \quad k_3 = \frac{I_3}{u_K}, \quad (4.6)$$

де I_1 – номінальний струм первинної обмотки, $I_1 = 1$ в.о.;

I_2 – номінальний струм вторинної обмотки, в.о.;

$$I_2 = \sqrt{p^2 + q^2}; \quad (4.7)$$

I_3 – номінальний струм третинної обмотки, в.о.;

$$I_3 = \sqrt{(1 - p)^2 + q^2}; \quad (4.8)$$

u_K – повна напруга короткого замикання,

$$u_K = \sqrt{u_{aK}^2 + u_{pK}^2}. \quad (4.9)$$

Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при короткому замиканні вторинної й зміні навантаження третинної обмоток

В цьому режимі в формулах (4.2) та (4.3)

$$r_{H2} = x_{H2} = 0.$$

В третинній обмотці прийемо номінальне навантаження $z_3 = 1$.

Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при різних значеннях коефіцієнту потужності $\cos \varphi_3$ проводять перераховуючи p та q .

Активний та індуктивний опори третинної обмотки визначають за формулами

$$\left. \begin{aligned} r_{H3} &= z_3 \cdot \cos \varphi_3 \\ x_{H3} &= z_3 \cdot \sin \varphi_3 \end{aligned} \right\}. \quad (4.10)$$

Для кожного значення коефіцієнта потужності проводять розрахунок струмів I_2 та I_3 за формулами (4.7) та (4.8).

Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при зміні навантаження в обох обмотках

Перший режим.

Вторинна та третинна обмотки є навантажувальними. Обидві обмотки мають однаковий коефіцієнт потужності

$$\cos \varphi_2 = \cos \varphi_3 = 0.8.$$

Загальне навантаження обмоток дорівнює номінальному, тобто

$$z_2 + z_3 = 1,$$

але навантаження розподілене нерівномірно.

Дослідження струморозподілу в обмотках проводять при різних значеннях навантаження обмоток.

Другий режим.

Вторинна обмотка працює на навантаження, а третинна обмотка живить синхронний генератор, тобто третинна обмотка навантажена лише реактивним струмом.

Коефіцієнти потужності обмоток для цього режиму

$$\cos \varphi_2 = 0.8, \quad \cos \varphi_3 = 0.$$

Потужність третинної обмотки постійна $z_3 = 0.1$.

Розрахунок складових струмів p та q проводять при зміні навантаження вторинної обмотки.

4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Визначення еквівалентних опорів трансформатора з декількома (трьома) ступенями волі методом потужностей». Ознайомитись з матеріалом п. 4.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки

4.3.1 Чим визначається ступінь волі трансформатора?

4.3.2 В чому відмінність розрахунку еквівалентних опорів трансформатора з декількома ступенями волі від трансформатора з одним ступенем волі?

4.3.3 Коли струми вторинної обмотки знаходяться у протифазі із первинним струмом?

4.3.4 На яких законах заснований метод потужності при розрахунку еквівалентних опорів складних обмоток?

4.3.5 Коли кидок струму в первинній обмотці більший: при короткому замиканні однієї чи обох обмоток вторинної сторони, чому?

4.4 Програма роботи

4.4.1 Визначення струмів короткого замикання вторинної та третинної обмоток при одночасному замиканні цих обмоток.

4.4.2 Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при короткому замиканні вторинної обмотки та зміни навантаження на третинній обмотці.

4.4.3 Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при короткому замиканні третинної обмотки та зміни навантаження на вторинній обмотці.

4.4.4 Дослідження зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при зміні навантаження в обох обмотках.

4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Початкові дані

В лабораторній роботі дослідити триобмотковий трансформатор (рис.4.1). Обмотки розташовані на стрижні концентрично:

- обмотка ВН (1) – живляча обмотка,
- обмотки СН (2) та НН (3):
 - підключені до навантаження;
 - короткозамкнені.

Параметри обмоток:

r_1, r_2, r_3 – активні опори обмоток трансформатора, в.о.;

x_{12}, x_{13}, x_{23} – взаємодуктивні опори обмоток, в.о.;

обрати згідно варіанту із таблиці 4.1.

Таблиця 4.1 – Параметри обмоток, в.о.

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Параметр	r_1	r_2	r_3	x_{12}	x_{13}	x_{23}
Цифра 1	0.005	0.012	0.025	0.25	0.40	0.10
Цифра 2	0.008	0.016	0.035	0.30	0.45	0.12

Триобмотковий трансформатор має два ступеня волі, тому струми вторинної та третинної обмоток знаходяться не в протифазі до первинної обмотки, але завжди виконується умова: геометрична сума векторів струму всіх обмоток дорівнює 0, (рис 4.2).

Струми обмоток розкласти по двом взаємоперпендикулярним напрямкам згідно (4.1) та розрахувати складові струмів за формулами (4.2) – (4.3).

4.5.1 Визначити струми короткого замикання вторинної та третинної обмоток при одночасному замиканні цих обмоток

Для розрахунку складових струмів у (4.2) - (4.3) прийняти опори

$$r_{H2} = r_{H3} = x_{H2} = x_{H3} = 0.$$

Складові напруги КЗ визначити за (4.4) - (4.5).

Розрахувати коефіцієнти кидку сталого струму КЗ по (4.6).

4.5.2 Дослідити зміну струмів у вторинній та третинній обмотках при КЗ вторинної обмотки та зміни навантаження на третинній обмотці

В формулах (4.2) та (4.3) прийняти

$$r_{n2} = x_{n2} = 0.$$

В третинній обмотці – номінальне навантаження $z_3 = 1$.

Дослідити зміну струмів, перераховуючи p та q , у вторинній та третинній обмотках при різних значеннях коефіцієнту потужності

$$\cos \varphi_3 = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.$$

Активний та індуктивний опори третинної обмотки визначити за (4.9). Для кожного значення коефіцієнта потужності провести розрахунок струмів I_2 та I_3 за формулами (4.7) та (4.8).

Побудувати графіки залежності струмів $I_2, I_3 = f(\cos \varphi_3)$.

4.5.3 Дослідити зміну струмів у вторинній та третинній обмотках при КЗ третинної обмотки та зміни навантаження на вторинній обмотці

Провести дослід аналогічно пп. 4.5.2, міняючи індекси «2» та «3» місцями.

Прийняти в (4.2) та (4.3) $r_{n3} = x_{n3} = 0$.

Номінальне навантаження $z_2 = 1$.

Дослідити зміну струмів при значеннях коефіцієнту потужності

$$\cos \varphi_2 = 1, 0.8, 0.6, 0.4, 0.2, 0.$$

Активний та індуктивний опори вторинної обмотки визначити за (4.9). Для кожного значення коефіцієнта потужності провести розрахунок струмів I_2 та I_3 за формулами (4.7) та (4.8).

Побудувати графіки залежності струмів $I_2, I_3 = f(\cos \varphi_2)$.

4.5.4 Дослідити зміни струмів у вторинній та третинній обмотках при зміні навантаження в обох обмотках

Перший дослід.

Вторинна та третинна обмотки є навантажувальні. Коефіцієнт потужності обох обмоток прийняти $\cos \varphi_2 = \cos \varphi_3 = 0.8$.

Загальне навантаження обмоток прийняти номінальним, тобто

$$z_2 + z_3 = 1.$$

Розподіл навантаження між обмотками прийняти за табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Значення навантаження обмоток, в.о.

№ досліджу	1	2	3	4	5
Навантаження вторинної обмотки	0.9	0.8	0.7	0.6	0.5
Навантаження третинної обмотки	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5

Дослідження струморозподілу в обмотках провести при різних значеннях навантаження обмоток.

Побудувати графіки залежності струмів $I_2, I_3 = f\left(\frac{z_2}{z_3}\right)$.

Другий дослід.

Вторинна обмотка працює на навантаження, а третинна обмотка живить синхронний генератор, тобто третинна обмотка навантажена лише реактивним струмом.

Коефіцієнти потужності обмоток для цього режиму

$$\cos \varphi_2 = 0.8, \quad \cos \varphi_3 = 0.$$

Навантаження третинної обмотки постійне $z_3 = 0.1$.

Розрахунок складових струмів p та q провести при зміні навантаження вторинної обмотки

$$z_2 = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9.$$

Побудувати графіки залежності струмів $I_2, I_3 = f(z_2)$.

4.6 Зміст звіту

4.6.1 Початкові дані.

4.6.2 Значення складових напруг короткого замикання.

4.6.3 Значення коефіцієнтів кидку струмів всіх дослідів.

4.6.4 Графіки залежності струмів.

4.6.5 Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

5 ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ПРОЦЕСІВ В ТРАНСФОРМАТОРІ ПРИ ВМИКАННІ В МЕРЕЖУ

Мета роботи: дослідити вплив різних факторів на характер зміни параметрів трансформатора при вмиканні в мережу.

5.1 Теоретичні відомості

Математична модель однієї фази трансформатора при вмиканні на синусоїдальну напругу, в.о.

$$\frac{di}{dt} = \frac{\sin(\omega t + \varphi)}{x(i)} - \frac{r}{x(i)} i, \quad (5.1)$$

де $x(i)$ – індуктивний опір обмотки трансформатора, який змінюється в процесі вмикання та залежить від ступеню насичення магнітної системи, в.о.;

r – активний опір первинної обмотки, в.о.;

φ – початкова фаза вмикання.

Цю модель одержано з рівняння рівноваги електрорушійних сил (ЕРС) обмотки, на яку подається напруга. При вмиканні великий інтерес представляють не тільки змінення струму неробочого ходу але й зміни магнітного потоку, тобто, процес намагнічування магнітної системи.

Доповнимо модель (5.1) рівнянням магнітного потоку

$$\Phi = x(i) \cdot i + \Phi_0 \cdot e^{\frac{-\omega r}{x} t}. \quad (5.2)$$

За базисний опір приймемо фазний опір трансформатора, Ом

$$Z_\phi = \frac{U_\phi}{I_\phi}, \quad (5.3)$$

де U_ϕ, I_ϕ – фазні напруга (у В) та струм (у А) обмотки.

Тоді активний опір первинної обмотки трансформатора, в.о.

$$r = \frac{R_\phi}{Z_\phi}, \quad (5.4)$$

де R_{ϕ} – активний опір первинної обмотки, Ом.

Індуктивний опір первинної обмотки трансформатора, в.о.

$$x = \frac{\omega L}{Z_{\phi}}, \quad (5.5)$$

де L – індуктивність первинної обмотки, Гн;

$$\omega = 2\pi \cdot f = 100\pi.$$

Індуктивність обмотки залежить від числа витків, геометричних розмірів обмотки й магнітної системи, а також від марки сталі

$$L = w^2 \cdot D_c \cdot \beta \cdot \frac{k_P}{k_1} \left[\mu_0 \cdot (1 - k_1^2 \cdot k_3) + \mu_c \cdot k_1^2 \cdot k_2 \cdot k_3 \right], \quad (5.6)$$

де w – число витків обмотки;

D_c – діаметр стрижня, м;

β – відношення довжини кола середнього діаметра обмотки до висоти обмотки;

$$\beta = \frac{D_o}{h_o}; \quad (5.7)$$

k_P – коефіцієнт Роговського;

k_1 – відношення діаметру стрижня до середнього діаметра обмотки, в.о.,

$$k_1 = \frac{D_c}{D_o}; \quad (5.8)$$

k_2 – відношення висоти обмотки до довжини шляху магнітного потоку, в.о.;

$$k_2 = \frac{h_o}{l_m}; \quad (5.9)$$

k_3 – коефіцієнт заповнення сталлю;

μ_0 – магнітна проникність повітря, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м;

μ_c – магнітна проникність сталі магнітної системи, Гн/м.

Вираз (5.6) одержано з формули Роговського для індуктивності обмоток трансформатора.

Характеристики сталей надано в таблиці 5.1 та на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Крива намагнічування сталі

Таблиця 5.1 - Характеристика сталей

Індукція В, Тл	Напруженість Н, А/м		Індукція В, Тл	Напруженість Н, А/м	
	Сталь 3407	Сталь 3408		Сталь 3407	Сталь 3408
0.80	15.50	14.00	1.58	48.20	38.40
1.00	18.50	17.00	1.60	53.35	42.00
1.10	20.72	19.00	1.62	59.75	47.60
1.20	22.87	20.95	1.64	68.00	54.70
1.25	24.07	21.95	1.66	82.00	63.60
1.30	25.37	23.05	1.68	103.00	75.50
1.35	27.00	24.35	1.70	129.00	90.00
1.40	28.76	26.00	1.72	159.50	108.80
1.45	31.10	28.00	1.74	195.00	136.50
1.50	35.20	30.68	1.76	247.00	173.00
1.52	37.69	32.10	1.78	327.00	225.00
1.54	40.54	33.70	1.80	400.00	295.00
1.56	43.75	35.80			

Проведемо аналітичні дослідження за побудованою математичною моделлю трансформатора.

5.1.1 Визначення сталого значення струму неробочого ходу обмотки, на яку подається напруга, й магнітного потоку в магнітному колі

При початковій фазі $\varphi = 90^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = 0$ будуть найбільш сприятливі умови вмикання. З першого ж моменту процес протікатиме як сталий, тобто, потік й струм неробочого ходу (НХ) будуть змінюватись за синусоїдальним законом.

За результатами такого дослідження визначають сталі значення магнітного потоку й струму НХ. Для цього розраховують діючі значення потоку й струму за визначеними з дослідження максимальними значеннями струму та потоку – I_m та Φ_m

$$I_0 = \frac{I_m}{\sqrt{2}}, \quad \Phi_0 = \frac{\Phi_m}{\sqrt{2}}. \quad (5.10)$$

5.1.2 Визначення аперіодичної складової струму неробочого ходу й магнітного потоку в магнітному колі

Для визначення аперіодичної складової потоку й струму НХ необхідно провести дослід при початковій фазі $\varphi = 0^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = 0$.

За результатами дослідження визначають максимальні значення струму НХ, потоку й час досягнення цих значень.

Потім розраховують аперіодичні складові струму й потоку. Для цього з отриманих даних віднімають амплітудні значення струму й потоку, які було знайдено у пп. 5.1.1.

Аперіодичні складові затухають з постійною часу T

$$I_a = A \cdot e^{-\frac{1}{T}t}, \quad \Phi_a = B \cdot e^{-\frac{1}{T}t}. \quad (5.11)$$

Для визначення постійної часу T необхідно з дослідження визначити по два перші максимальні значення струму I_{ma} та потоку Φ_{ma} двох перших періодів (див. рис. 5.2) та скласти по два рівняння

$$\begin{aligned} I_{a1} &= A \cdot e^{-\frac{1}{T}t_1}, & \Phi_{a1} &= B \cdot e^{-\frac{1}{T}t_1}, \\ I_{a2} &= A \cdot e^{-\frac{1}{T}t_2}, & \Phi_{a2} &= B \cdot e^{-\frac{1}{T}t_2}. \end{aligned} \quad (5.12)$$

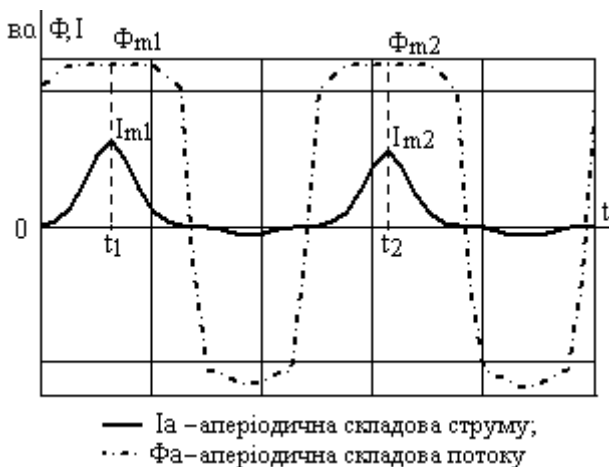


Рисунок 5.2 – Графоаналітичне визначення постійної часу затухання аперіодичної складової потоку

Логарифмування рівнянь (5.12) дає

$$\ln I_{a1} = \ln A - \frac{1}{T} t_1, \quad \ln \Phi_{a1} = \ln B - \frac{1}{T} t_1, \quad (5.13)$$

$$\ln I_{a2} = \ln A - \frac{1}{T} t_2, \quad \ln \Phi_{a2} = \ln B \cdot e^{-\frac{1}{T} t_2}.$$

Віднімемо з першого рівняння друге й одержимо

$$T_I = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{I_{a2}}{I_{a1}}}, \quad T_\Phi = \frac{t_1 - t_2}{\ln \frac{\Phi_{a2}}{\Phi_{a1}}}. \quad (5.14)$$

Постійна часу T залежить від відношення активного й індуктивного опорів. Так як $x \gg r$, постійна часу може бути настільки велика, що

$$\Phi_{a1} \cong \Phi_{a2}, \text{ тоді } T \rightarrow \infty.$$

5.1.3 Визначення максимального кидку струму й магнітного потоку при вмиканні

Найбільший несприятливий момент вмикання – при початковій фазі $\varphi = 0^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = +\Phi_3$.

Тоді магнітний потік складається з трьох складових:

- сталої;
- аперіодичної;
- складової залишкового магнітного потоку.

В трансформаторах залишковий магнітний потік може бути до 0.6 в.о. від номінального основного потоку.

5.1.4 Аналіз впливу кривої намагнічування сталі на процес вмикання трансформатора

Індуктивний опір трансформатора залежить від μ_c . Але μ_c величина змінна й залежить від кривої намагнічування сталі.

Криву намагнічування зазвичай апроксимують ломаною кривою. Точність рішення задачі залежить від того на скільки відрізків розбита крива намагнічування.

5.1.5 Аналіз впливу довжини шляху магнітного потоку на струм неробочого ходу для обмоток різних фаз й магнітний потік стрижня

Струм неробочого ходу залежить від довжини шляху магнітного потоку. У крайніх фазах А та С довжина шляху магнітного потоку більш, ніж у фазі В.

Будемо вважати, що розрахунки струмів й потоку вмикання в попередніх пунктах проводились для фази В. Тоді для крайніх стрижнів магнітної системи довжина шляху магнітного потоку збільшиться на величину, яка залежить від геометричних розмірів конкретної магнітної системи.

Довжина шляху магнітного потоку для фаз А й С дорівнює

$$l_{mA} = l_{mC} = k_l \cdot l_{mB}, \quad (5.15)$$

де k_l – коефіцієнт збільшення шляху магнітного потоку.

Для розрахунку струму неробочого ходу необхідно розрахувати довжину шляху магнітного потоку за (5.15) й перерахувати коефіцієнт k_2 за (5.9).

5.1.6 Вплив додаткового активного опору, ввімкненого послідовно з обмоткою, на затухання перехідного процесу

Для зменшення постійної часу затухання перехідного процесу при вмиканні трансформатора послідовно з обмоткою з'єднують акти-

вний опір, після чого проводять дослідження та визначають постійну часу за методикою, яку описано у **пп. 5.1.2.**

5.1.7 Вплив насичення магнітного кола на процес пуску

Якщо магнітний ланцюг трансформатора ненасичений, кратність струму рівна кратності потоку.

При насиченні магнітного ланцюга ця пропорційність порушується. Збільшення магнітного потоку удвоє призводить до багатократного (у $80 \div 100$ разів) збільшення струму вмикання, якщо зрівнювати зі сталим струмом НХ. Так що струм вмикання може перевищити навіть номінальний струм трансформатора. Збільшити насичення можна збільшенням напруги, яка подається на обмотку, при незмінних інших початкових даних.

5.1.8 Вплив кроку інтегрування на точність рішення перехідного процесу

Математична модель трансформатора, описана рівняннями (5.1) та (5.2), нелінійна, тому аналітичного розв'язання не має.

При числовому розв'язанні цих рівнянь застосовують метод Рунге-Кутта. Точність цього методу в більшості залежить від кроку інтегрування.

Для визначення впливу кроку інтегрування проводять дослідження з початковими даними **пп. 5.1.3**, змінюючи тільки крок інтегрування.

5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Дослідження впливу різних факторів на характер зміни перехідних процесів в трансформаторі при вмиканні в мережу». Ознайомитись з матеріалом **п. 5.1** та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки

5.3.1 Чому з віддаленням обмотки від стрижня струм неробочого ходу збільшується, а потік стрижня зменшується?

5.3.2 Чому дорівнює аперіодична складова потоку в момент вмикання?

5.3.3 Чи залежить струм неробочого ходу й потік в стрижні від фази вмикання? Якщо залежить, то як?

5.3.4 Чому струм неробочого ходу в різних фазах трансформатора різний?

5.4 Програма роботи

5.4.1 Проаналізувати математичну модель трансформатора й початкові умови при вмиканні.

5.4.2 Визначити сталі значення струму неробочого ходу й магнітного потоку в магнітному колі при двох варіантах положення обмоток, на які подається напруга, відносно стрижня.

5.4.3 Визначити аперіодичну складову струму неробочого ходу й магнітного потоку в магнітному колі при двох варіантах положення обмотки відносно стрижня.

5.4.4 Визначити максимальний кидок струму й магнітного потоку при вмиканні.

5.4.5 Проаналізувати вплив кривої намагнічування сталі на процес вмикання трансформатора.

5.4.6 Визначити струм неробочого ходу й магнітний потік стрижня для обмоток різних фаз трансформатора.

5.4.7 Визначити вплив додаткового активного опору, ввімкненого послідовно з обмоткою, на затухання перехідного процесу.

5.4.8 Визначити вплив насичення магнітного кола на процес пуску.

5.4.9 Визначити вплив кроку інтегрування на точність рішення перехідного процесу.

5.5 Порядок виконання лабораторної роботи

Початкові дані для уводу в ЕОМ, наведено в табл. 5.2.

З таблиці 5.2 видно, що початкові дані поділяються на загальні для всіх варіантів та індивідуальні, які залежать від варіанту. Індивідуальні початкові дані наведено в табл. 5.3.

Коефіцієнти k_1, k_2, β розрахувати за формулами (5.7) – (5.9).

Характеристики сталей надано в табл. 5.1 та на рис. 5.1.

При завданні кривої намагнічування вказують кількість точок цієї кривої та значення індукції (B_c) й напруженості (H) в цих точках. При виконанні пп. 5.4.5 необхідно взяти 12 точок. При виконанні всіх інших пунктів програми – 5 точок. При цьому першою точкою повинна бути точка при індукції 0.8 Тл й останньою при індукції 1.8 Тл.

Таблиця 5.2 – Початкові дані

Назва	Позначення	Одиниця виміру	Величина
1 Фазна напруга	U_ϕ	В	6000
2 Фазний струм	I_ϕ	А	800
3 Число витків	w	--	100
4 Активний опір обмотки	r	Ом	1.5
5 Діаметр стрижня	D_c	м	з таблиці 5.3
6 Коефіцієнт Роговського	k_p	в.о.	0.96
7 Коефіцієнт заповнення кола сталлю	k_z	в.о.	0.93
8 Довжина магнітної силової лінії	l_m	м	з таблиці 5.3
9 Коефіцієнт K_1	k_1	в.о.	формула (5.7)
10 Коефіцієнт K_2	k_2	в.о.	формула (5.8)
11 Коефіцієнт β	β	в.о.	формула (5.9)
12 Залишковий магнітний потік	Φ_z	в.о.	0.45 або 0 в залежності від пункту програми
13 Початкова фаза вмикання	φ	рад.	0 або 1.57 в залежності від пункту програми
14 Крок інтегрування	Δt	с	0.001 або 0.00025 (пп. 5.5.8)
15 Інтервал часу	t	с	2
16 Крива намагнічування			число точок кривої намагнічування 5 або 12

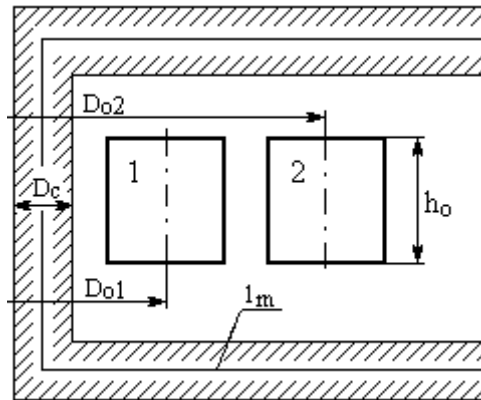
Таблиця 5.3 - Параметри трансформатора

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Параметр	D_c	D_{o1}	D_{o2}	h_o	l_m	марка сталі
Цифра 1	0.20	0.30	0.40	2.0	4.0	3407
Цифра 2	0.25	0.35	0.45	2.3	4.5	3408

5.5.1 Користуючись табл. 5.2, задати початкові дані при початковій фазі $\varphi = 90^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = 0$.

За результатами дослідів визначити сталі значення магнітного потоку й струму НХ. З дослідів визначити максимальні значення струму та потоку (I_m та Φ_m) й розрахувати діючі значення потоку й струму НХ за (5.10) при двох варіантах положень обмотки відносно стрижня, див. рис. 5.3.

Для варіантів розташування обмотки 1 та 2 перерахувати коефіцієнти β та k_1 за (5.7) та (5.8).



1 – варіант 1;

2 – варіант 2;

l_m – довжина шляху магнітного потоку магнітного ланцюга

Рисунок 5.3 – Варіанти розташування обмотки на стрижні

5.5.2 Провести дослід при початковій фазі $\varphi = 0^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = 0$. За результатами дослідів визначити максимальні значення струму НХ, потоку й час досягнення цих значень.

Для визначення аперіодичних складових потоку й струму НХ (5.11) з отриманих даних відняти амплітудні значення струму й потоку, які було знайдено у пп. 5.5.1.

Визначити постійну часу T як описано у пп. 5.1.2, рис. 5.2.

5.5.3 Провести дослід при початковій фазі $\varphi = 0^\circ$ та залишковому магнітному потоку $\Phi_3 = 0.45$ до $t = 0.05$. Розрахунок провести для 1 варіанту розташування обмотки.

За дослідними даними побудувати графіки зміни складових струму й потоку у функції часу.

5.5.4 Провести дослід за пп. 5.5.3. Криву намагнічування задати 12 точками через рівні проміжки за табл. 5.1. Розрахунок провести для 1 варіанту розташування обмотки.

За дослідними даними побудувати графіки зміни складових струму й потоку у функції часу. Криві зміни струму порівняти із кривими попереднього дослідів. Визначити підвищення точності розрахунку.

5.5.5 Провести дослід за пп. 5.5.3.

Довжину шляху магнітного потоку для фаз А й С розрахувати за (5.15), прийнявши коефіцієнт збільшення шляху магнітного потоку $k_1 = 1.5$ й перерахувавши коефіцієнт k_2 за (5.9).

5.5.6 Провести дослід за пп. 5.5.2, прийнявши

$$r = r + r_0,$$

де r_0 – активний опір, послідовно з'єднаний з обмоткою, $r_0 = 200$ Ом.

Визначити постійну часу за методикою, яку надано у пп. 5.1.2.

5.5.7 Провести дослід за пп. 5.5.3, збільшивши насичення магнітної системи за рахунок збільшення напруги фази – $U_\phi = 8000$ В.

Проаналізувати збільшення струму вмикання при незмінних інших початкових даних.

5.5.8 Провести дослід за пп. 5.5.3, прийнявши крок інтегрування $\Delta t = 0.00025$ с.

Криві зміни струму порівняти із кривими попереднього досліді. Визначити підвищення точності розрахунку.

5.6 Зміст звіту

5.6.1 Початкові дані трансформатора.

5.6.2 Результати розрахунку усіх пунктів програми.

5.6.3 Висновки.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

6 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРА У РЕЖИМІ РАПТОВОГО КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

Мета роботи: визначити параметри трансформатора при короткому замиканні та їх залежність від режимів роботи.

6.1 Теоретичні відомості

6.1.1 Дослідимо трансформатор зі схемою обмоток широкого застосування – обмотку високої напруги розбито на два концентри:

- основний (ВН);
- регулюючий (РО), (рис. 6.1).

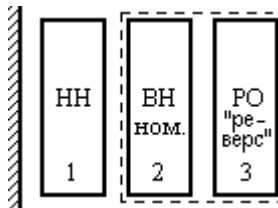


Рисунок 6.1 – Розташування обмоток на стрижні

Обмотки розташовані концентрично, тому система рівнянь трансформатора при приведенні обмоток ВН та РО до обмотки низької напруги (НН) має вигляд

$$\left. \begin{aligned} U_{HH} &= R_{HH} \cdot i_{HH} + L_{11} \cdot \frac{di_{HH}}{dt} + L_{11} \cdot \frac{di_{BH}}{dt} + L_{11} \cdot \frac{di_{PO}}{dt} \\ U_{BH} &= R_{BH} \cdot i_{BH} + (L_{11} - L_{\sigma 12}) \cdot \frac{di_{min}}{dt} + L_{22} \cdot \frac{di_{BH}}{dt} + L_{22} \cdot \frac{di_{PO}}{dt} \\ U_{PO} &= R_{PO} \cdot i_{PO} + (L_{33} - L_{\sigma 13}) \cdot \frac{di_{HH}}{dt} + (L_{33} - L_{\sigma 13}) \cdot \frac{di_{BH}}{dt} + L_{33} \cdot \frac{di_{PO}}{dt} \end{aligned} \right\} \cdot (6.1)$$

Враховуючи, що обмотки ВН й РО мають електричний зв'язок, тобто номінальні витки обмотки ВН з'єднані з витками регулювальної обмотки за схемою «реверс», систему (6.1) можна перетворити до системи двох рівнянь

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= R_1 \cdot i_1 + L_{11} \cdot \frac{di_1}{dt} + L_{11} \cdot \frac{di_2}{dt} \\ U_2 &= R_2 \cdot i_2 + \frac{1}{w_2} \left[w_{BH} \cdot (L_{22} - L_{\sigma 12}) + w_{PO} \cdot (L_{33} - L_{\sigma 13}) \right] \cdot \frac{di_1}{dt} + \\ &+ \frac{1}{w_2} \left[w_{BH} \cdot L_{22} - w_{PO} \cdot L_{33} - \frac{w_1 - w_{PO}}{w_2} \cdot L_{\sigma 23} \cdot \frac{di_2}{dt} \right] \end{aligned} \right\}, \quad (6.2)$$

де 1 та 2 – індекси обмоток НН та ВН відповідно;

R_1, R_2 – активні опори обмоток НН та ВН, Ом;

w_1, w_2 – число витків обмоток НН та ВН;

$$R_2 = R_{BH} + R_{PO}, \quad w_2 = w_{BH} + w_{PO}.$$

У режимі короткого замикання (КЗ) струмом намагнічування можна знехтувати, тобто

$$i_1 = -i_2. \quad (6.3)$$

Прийmemo, що короткозамкненою обмоткою є обмотка ВН

$$U_2 = 0. \quad (6.4)$$

Віднявши із першого рівняння системи (6.2) друге з урахуванням умов (6.3) й (6.4) одержимо

$$U_1 = (R_1 + R_2) \cdot i_1 + \frac{1}{w_2} \cdot \left(w_{BH} \cdot L_{\sigma 12} + w_{PO} \cdot L_{\sigma 13} - \frac{w_1 - w_{PO}}{w_2} \cdot L_{\sigma 23} \right) \cdot \frac{di_1}{dt}. \quad (6.5)$$

Прийнявши за базисні величини номінальні струм I_{H1} й напругу U_{H1} первинної обмотки перейдемо до системи відносних одиниць (*)

$$U_1^* = \left(R_1^* + R_2^* \right) \cdot i_1 + \frac{1}{w_2} \cdot \left(w_{BH} \cdot x_{\sigma 12}^* + w_{PO} \cdot x_{\sigma 13}^* - \frac{w_1 - w_{PO}}{w_2} \cdot x_{\sigma 23}^* \right) \cdot \frac{di_1}{dt}, \quad (6.6)$$

де

$$U_1^* = \frac{U_m \cdot \sin(\omega t + \phi)}{U_{\phi}} = \sin(\omega t + \phi),$$

ϕ - кут, що характеризує максимальне значення напруги в момент короткого замикання;

R_1^*, R_2^* - активні опори обмоток НН та ВН, в.о.;

$x_{\sigma 12}^*, x_{\sigma 13}^*, x_{\sigma 23}^*$ - взаємодуктивні опори розсіювання між обмотками НН, ВН та РО, в.о.;

$$Z_{\phi} = \frac{U_{H1}}{I_{H1}}, \quad R_1^* = \frac{R_1}{Z_{\phi}}, \quad R_2^* = \frac{R_2}{Z_{\phi}},$$

$$x_{\sigma 12}^* = \frac{\omega \cdot L_{\sigma 12}}{Z_{\phi}}, \quad x_{\sigma 13}^* = \frac{\omega \cdot L_{\sigma 13}}{Z_{\phi}}, \quad x_{\sigma 23}^* = \frac{\omega \cdot L_{\sigma 23}}{Z_{\phi}}.$$

Диференційне рівняння (6.6) – математична модель трансформатора в режимі КЗ. Рішення цього рівняння дозволить визначити характер зміни струму в процесі КЗ, максимальний кидок струму та сталий струм КЗ.

При розв'язанні рівняння (6.6) доцільно задаватися кутом α , що визначає фазу початкового струму КЗ:

- при $\alpha = 0$ – найбільш сприятливий режим КЗ; струм КЗ відразу придбає стале значення, яке буде змінюватись за синусоїдальним законом;

- при $\alpha = \pi/2$ – найбільш несприятливий.

Кути ϕ та α – зв'язані відношенням:

$$\phi = \alpha + \phi_k,$$

де ϕ_k – фазовий кут між напругою й струмом при КЗ;

$$\phi_k = \arctg \frac{x_k}{r_k}.$$

6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати лекції конспекту за темою: «Визначення параметрів трансформатора у режимі раптового короткого замикання та їх залежність від режимів роботи». Ознайомитись з матеріалом п. 6.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

6.3 Контрольні запитання для самоперевірки

6.3.1 Який режим КЗ є найбільш небезпечним: з режиму НХ або з режиму навантаження й чому?

6.3.2 Від чого залежить процес затухання вільної складової струму КЗ?

6.3.3 Чи залежить коефіцієнт ударного струму від потужності трансформатора? Якщо залежить, то як?

6.3.4 Як впливає відношення геометричних розмірів обмотки на струм КЗ?

6.3.5 При наявності регулювання напруги, на якому ступені регулювання буде найбільший струм КЗ й чому?

6.4 Програма роботи

6.4.1 Проаналізувати математичну модель трансформатора в режимі короткого замикання.

6.4.2 Дослідити режим короткого замикання трансформатора при найбільш несприятливому моменті короткого замикання й різних ступенях регулювання напруги.

6.4.3 Визначити залежність кратності максимального й сталого струмів від відношення активного й індуктивного опорів обмоток трансформатора.

6.4.4 Дослідити вплив відношення геометричних розмірів обмоток трансформатора на струми й напруги.

6.5 Порядок виконання лабораторної роботи

У роботі досліджується режим короткого замикання (КЗ) трансформатора ТД-10000/110/6.6 при різному типовиконанні обмоток – відношенні висот та радіальних розмірів.

Схему обмоток показано на рис. 6.1 та рис. 6.2.

Індивідуальні початкові дані наведено в таблиці 6.1.

Початкові дані, які вводяться в ЕОМ, наведено в таблиці 6.2.

Таблиця 6.1 – Індивідуальні початкові дані

Місце цифри за варіантом	1	2	3	4	5	6
Параметр	h_1	h_2	h_3	a_1	a_2	a_3
Цифра 1	1.46	1.56	1.224	0.067	0.123	0.044
Цифра 2	1.61	1.65	1.320	0.065	0.170	0.040

Обмотку ВН розбито на два концентри:

- основний;
- регулюючий.

При складанні алгоритму розрахунку було розглянуто три режими короткого замикання:

– КЗ при роботі трансформатора на номінальній напрузі (обмотка РО відключена). В початкових даних задається положення перемикача – «0» й $w_{PO} = 0$;

– КЗ при роботі трансформатора на максимальній напрузі (обмотка РО послідовно з'єднується з обмоткою ВН). В початкових даних задається положення перемикача «+1» й $w_{PO} = 279$;

– КЗ при роботі трансформатора на мінімальній напрузі (обмотка РО зустрічно з'єднується з обмоткою ВН). В початкових даних задається положення перемикача «-1» й $w_{PO} = -279$.

Для введення початкових даних в ЕОМ (рис. 6.2) розрахувати середні діаметри обмоток НН (1), ВН (2) та РО (3) за формулами:

$$D_1 = d + a_1, \quad (6.7)$$

де d – сума діаметру стрижня трансформатора та подвоєної ізоляційної відстані від стрижня до обмотки НН, $d = 0.32$ м;

$$D_2 = D_1 + a_1 + 2 \cdot a_{12} + a_2, \quad (6.8)$$

$$D_3 = D_2 + a_2 + 2 \cdot a_{23} + a_3, \quad (6.9)$$

$$a_{13} = a_{12} + a_2 + a_{23}. \quad (6.10)$$

Таблиця 6.2 – Початкові дані

Назва		Позначення	Одиниці вимірювання	Величина
1 Фазна напруга		U_{ϕ}	В	6590
2 Фазний струм		I_{ϕ}	А	874.7
3 Число витків обмотки	НН	w_{HH}	--	177
	ВН	w_{BH}	--	1770
	РО	w_{PO}	--	279
4 Висота обмоток	НН	h_1	м	табл. 6.1
	ВН	h_2	м	табл. 6.1
	РО	h_3	м	табл. 6.1
5 Середній діаметр обмотки	НН	D_1	м	формула (6.7)
	ВН	D_2	м	формула (6.8)
	РО	D_3	м	формула (6.9)
6 Відстань між обмотками	НН-ВН	a_{12}	м	0.045
	НН-РО	a_{13}	м	формула (6.10)
	ВН-РО	a_{23}	м	0.05
7 Радіальний розмір обмотки	НН	a_1	м	табл. 6.1
	ВН	a_2	м	табл. 6.1
	РО	a_3	м	табл. 6.1
8 Активний опір обмотки	НН	R_{HH}	Ом	0.0263
	ВН	R_{BH}	Ом	3.61
	РО	R_{PO}	Ом	1.21
9 Кут, що визначає значення фазного струму в момент КЗ		α	рад	0 або 1.57
10 Початкове значення струму		I_0	в.о.	0 або 1
11 Положення перемикача		--	--	0, -1, +1
12 Крок інтегрування		Δt	с	0.001

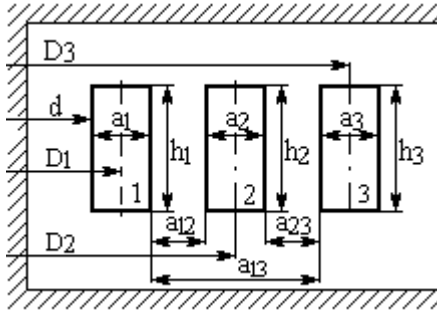


Рисунок 6.2 – Позначення розмірів обмоток

В результаті розв'язання математичної моделі, ЕОМ видає наступні результати:

- постійну часу затухання;
- кут, що характеризує миттєве значення напруги в момент КЗ;
- повну напругу КЗ й його складових;
- зміну струму у часі у вигляді таблиці 6.3.

Таблиця 6.3 - Результати розрахунку

Час, t , с	Струм КЗ I , в.о.	Сталий струм I_c , в.о.	Затухаючий початковий струм I_0 , в.о.	Вільна складова струму I_e , в.о.

6.5.1 Провести дослід при найбільш сприятливому моменті виникнення КЗ, тобто при $\alpha = 0$, тривалістю – один цикл зміни сталого струму для режиму $HH - BH_{ном}$.

Побудувати осцилограму струму.

6.5.2 Провести дослід при найбільш несприятливому моменті виникнення КЗ, тобто при $\alpha = \pi/2$.

Для кожного режиму – $HH - BH_{ном}$, $HH - BH_{max}$, $HH - BH_{min}$ – провести по два досліді:

- КЗ виникло з режиму неробочого ходу, тобто $I_0 = 0$;

- КЗ виникло з режиму роботи трансформатора у номінальному режимі, тобто $I_0 = 1$.

Тривалість досліду – два циклу зміни сталого струму.

Побудувати осцилограми струмів для трьох режимів.

6.5.3 Провести п'ять дослідів для режиму $HH - BH_{ном}$ при $\alpha = \pi/2$ й $I_0 = 0$, змінюючи активний опір обмотки ВН:

$$R_{BH} = 2, 6, 10, 14, 18 \text{ Ом.}$$

Досліди проводити до встановлення максимального струму. В результаті експерименту визначити напругу КЗ та її складові; максимальний струм й амплітудне значення сталого струму, враховуючи, що

$$k_{\mu} = \frac{I_{\max}}{I_m}, \quad \frac{R}{x} = \frac{u_{Ka}}{u_{Kp}}.$$

Дані та результати розрахунків звести до табл. 6.4.

Таблиця 6.4 – Залежність характеристик КЗ трансформатора від відношення опорів

№	R_{BH} , Ом	Дані ЕОМ					Розрахункові дані	
		u_{Ka} , %	u_{Kp} , %	u_K , %	$I_{\max}$, В.О.	I_m , В.О.	k_{μ} , В.О.	R/x , В.О.
1	2							
2	6							
3	10							
4	14							
5	18							

За даними таблиці 6.4 побудувати графіки залежностей:
 $k_{\mu} = f(R/x)$; $I_m = f(u_K)$.

6.5.4 Провести по п'ять дослідів для режиму $HH - BH_{ном}$ при $\alpha = \pi/2$ й $\alpha = 0$, змінюючи відношення геометричних розмірів обмоток трансформатора, що визначається коефіцієнтом β .

Коефіцієнт β представляє собою відношення ширини середнього каналу між обмотками НН та ВН до висоти вікна трансформатора, в.о.

$$\beta = \frac{\pi \cdot D_{12}}{h}, \quad \text{де } D_{12} = \frac{D_1 + D_2}{2}.$$

Для цього належить змінити відстань між обмотками НН й ВН, прийнявши значення $a_{12} = 0.04, 0.06, 0.08, 0.10, 0.12$.

У відповідності зі змінами a_{12} перерахувати діаметри обмоток за формулами (6.7) - (6.10).

Початкові дані та результати розрахунків на ЕОМ занести в таблицю 6.5.

Таблиця 6.5 - Залежність характеристик КЗ трансформатора від коефіцієнту β

№	Початкові дані				β	Дані ЕОМ		
	a_{12} , м	D_2 , м	D_3 , м	a_{13} , м		u_K , %	$I_{\max}$, в.о.	I_m , в.о.
1	0.04							
2	0.06							
3	0.08							
4	0.10							
5	0.12							

За даними табл. 6.5 побудувати графіки залежностей:
 $I_m = f(\beta)$; $I_{\max} = f(\beta)$; $u_K = f(\beta)$.

6.6 Зміст звіту

6.6.1 Початкові дані трансформатора.

6.6.2 Аналіз математичної моделі трансформатора.

6.6.3 Осцилограми зміни всіх струмів, що визначаються у пп. 6.5.2 у часі.

6.6.4 Графіки залежностей що визначаються у пп. 6.5.3.

6.6.5 Графіки залежностей що визначаються у пп. 6.5.4.

6.6.6 Висновки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ОСНОВНА

1. Васютинский, С.Б. Вопросы теории и расчета трансформаторов. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с. : ил. Библиогр.: с. 278-280. – 15000 экз.
2. Лейтес, Л.В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов. / Л.В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981. – 392 с., ил. Библиогр.: с. 374–387. – 5500 экз. (в пер.)
3. Фильц, Р.В. Математические основы теории электромеханических преобразователей / Р.В. Фильц. – Киев: Наук. думка, – 1979. – 208 с. : ил. ; 39. Библиогр.: с. 199-203. – 1000 экз. – (Редакция физико-математической литературы).
4. Сипайлов, Г.А. Электрические машины (специальный курс). / Г.А. Сипайлов, Е.В. Кононенко, К.Л. Хорьков. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 1987. – 287 с. : ил. Библиогр.: с. 278-280. – Предм. указ.: с. 283-284. – 20000 экз.
5. Копылов, И.П. Математическое моделирование электрических машин [Текст] : Учеб. для вузов. / И.П. Копылов. – 3-е изд., перераб. и доп. – М. : Высш. шк., 2001. – 327 с. : ил. Библиогр.: с. 325–327. – Предм. указ.: с. 320–324. – 8000 экз. – ISBN 5-06-003861-0.

ДОДАТКОВА

6. 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. – 30 с.
7. Трансформаторы силовые масляные общего назначения напряжением до 35 кВ включительно. Технические условия : ГОСТ 11920-93. – М. : изд. стандартов, 1993. – 30 с.
8. Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжений 110 и 150 кВ. Технические условия : ГОСТ 129565-93. – М. : изд. стандартов, 1993. – 40 с.
9. Стандарт підприємства. Пояснювальна записка до курсових і дипломних проєктів. Вимоги і правила оформлення : СТП 15-96. – Запоріжжя : ЗДТУ, 1996. – 36 с.
10. Ярымбаш, Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока

[Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.

11. 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.

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

13. 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.

14. 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.

15. Ярымбаш, Д. С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – №4 (45) Частина 1. – С. 53–55.

16. 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.

17. 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.

18. 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, Vol.86, Issue 2, pp. 86 – 92.

19. 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. 2006. - № 1. - С. 56 - 60.

20. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования / М.И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2013 –№1 – С.31-36.

21. Коцур, М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / М. И. Коцур, // *Электротехніка та електроенергетика*. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

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

23. Коцур, М. И. Повышение эффективности электропривода вентиляторных установок / 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.

24. 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.

25. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика* – 2016. – №2 – С. 43 – 50.

26. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д. С. Ярымбаш, Ю.В. Даус // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2014 - № 1 - С. 74-78.

27. Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliinyk, A. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, 2017, Catalog Number CFP17CDT-USB, pp. 452-457.

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

29. Дивчук, Т. Э. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Э. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 2. - С. 56-66.

30. 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

31. 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
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 // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017, pp. 132-135.
33. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.
34. 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.
35. 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.
36. Ярымбаш, Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. №1. – С. 49 – 54.
37. 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.
38. Малюшевская А.П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / АП Малюшевская, АЯ Дмитришин, СО Топоров // Електротехніка та електроенергетика – 2015. - №1. – С. 21-25.
39. Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. - №2. – С. 40-46.
40. 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.

41. Иванков В. Ф. Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В. Ф. Иванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // *Электротехніка та електроенергетика*. - 2014. - № 2. - С. 41-53
42. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // *Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія*. 2014. – С. 131 – 136.
43. Ярымбаш Д. С. Влияние расположения заготовок электродов на распределение удельной мощности в керне печи Ачесона / Д. С. Ярымбаш // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2014. - № 1. - С. 5-11
44. Ivankov V. F. Calculation of CFD-thermal models of oil-cooled transformer equipment / V. F. Ivankov, A. V. Basova // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 2. - С. 19-32.
45. Ципленков Д. В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д. В. Ципленков, П. Ю. Красовський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 1. - С. 77–82.
46. Костін М. О. Енергетичні спектри випадкових процесів тягових напруг і струмів електротранспорту / М. О. Костін // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 71-80
47. Міщенко Т. М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2014. - № 1. - С. 19-28.
48. Літвінов Д. О. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 71-78
49. Остренко М. В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа / М. В. Остренко, С. М. Тиховод // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 2. - С. 33-42.
50. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 1. - С. 4–10.
51. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 1. - С. 11–16.
52. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовоточных разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 1. - С. 17–20.
53. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников,

А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.

54. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.

55. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 4–10.

56. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11–16.

57. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности сильноточных разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17–20.

58. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников, А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.

59. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.

60. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 46–49.

61. Шкрабець Ф. П. Техніко-економічна оцінка оптимального рівня напруги для електроживлення робочих горизонтів глибоких шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук, А. В. Кожевников, А. В. Акулов // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 50–54.

62. Волков В. А. Совершенствование частотного пуска гидроагрегата гидроаккумулирующей электростанции в насосном режиме / В. А. Волков, Д. В. Довбишук // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 55–61.

63. Літвінов В. В. Удосконалення методу оцінювання надійності схем релейного захисту / В. В. Літвінов, Я. С. Саченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 62–69.

64. Дьяченко В. В. Формирование программы энергосбережения для систем электроснабжения / В. В. Дьяченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 70–76.

65. Тиховод С. М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 5–14.

66. Коваленко М. А. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 15-20.

67. Іванков В. Ф. Верифікація методів електротеплових розрахунків електричних реакторів без сталі / В. Ф. Іванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 26-34

68. Токмаков И. В. Моделирование электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях на основе использования полиномов чебышёва / И. В. Токмаков // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 35-41.

69. Сидорец В. Н. Особенности анализа распределения тока высокой частоты в осесимметричных электродах электрохирургических инструментов / В. Н. Сидорец, А. Г. Дубко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 42-47.

70. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 48-54.

71. Андриенко П.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // Разработка рудных месторождений. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163 – 167.

72. Волков В. О. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В. О. Волков // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 55-64.

73. 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.

74. Міщенко Т. М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 81-86.

75. Скалько Ю. С. Удосконалення групового регулювання гідроагрегатів дніпровської гес за допомогою нечіткої логіки / Ю. С. Скалько // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 95-99.

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

77. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короткочасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 18-24.

78. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором / М. В. Цабенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 35-41.

79. Слободенюк Ю. О. Модель розрахунку миттєвих параметрів режиму системи тягового електропостачання при русі електровозу / Ю. О. Слободенюк, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 42-48.

80. Чередник Н. Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н. Г. Чередник, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 49-56.

81. Власенко Р. В. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії фрізе в умовах несиметрії / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 57-63.

82. Малюшевська А. П. Вплив морфологічних особливостей конденсаторних полімерних плівок на їх деформаційні властивості / А. П. Малюшевська, Г. М. Ющишина // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 13-18.

83. Андрієнко П. Д. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу / П. Д. Андрієнко, С. І. Шило, О. О. Каплієнко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 51-58.

84. Золотаревский А. И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот / А. И. Золотаревский, С. П. Луцин // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 6-11.

85. Малюшевська А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, В. І. Гунько // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 12-17.

86. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 18-23.

87. Василенко О. В. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ЕСАД / О. В. Василенко, Є. Л. Жавжаров // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 31-38.

88. Дзензерский В. А. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, В. В. Лисунова // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 39-47.
89. Алексеевский Д. Г. Определение рабочей области иппн в составе электромеханической системы взу с переменной скоростью вращения / Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, К. О. Турышев, О. О. Панкова // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 79-85.
90. Зиновкин В. В. Влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры в синхронном электроприводе / В. В. Зиновкин, Н. Л. Антонов, Ю.А. Крисан // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 6-17.
91. Zirka S. E. Topological transient models of three-phase five-limb transformer / S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, D. Bonnman // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 18-25.
92. Мацуй А. М. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора / А. М. Мацуй, В. О. Кондратець // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 38-49.
93. Паталах Д. Г. Численный безытерационный метод моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях / Д. Г. Паталах, С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 50-55.
94. 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, М. И. Коцур, Ю. Безверхняя // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 56-66.
95. Лаврич Ю. М. Методологічний підхід до побудови енергоощадної системи аварійного освітлення / Ю. М. Лаврич, Л. М. Погоріла, А. Ю. Подчасов // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 67-73.
96. Шутенко О. В. Анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов арг, в исправных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 74-83.
97. Лобов В. Й. Управління газоповітряною енергетичною установкою промислового підприємства / В. Й. Лобов, К. В. Лобова, А. В. Даць // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 84-95.

Додаток А

Питання до іспиту з дисципліни СКЕМ

1 Формальний підхід до складання математичних моделей трансформаторів. Особливості складання математичних моделей трансформаторів

2 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів: при обмотках рівної висоти розташованих на стрижні концентрично; при довільно розташованих на стрижні обмотках.

3 Електромагнітні характеристики трансформатора і їхні параметри. Визначення індуктивних опорів.

4 Визначення взаємоіндуктивності або взаємоіндуктивних опорів між контурами.

5 Визначення взаємоіндуктивного опору між двома обмотками рівної висоти та з рівномірним розподілом ампер-витків по висоті.

6 Визначення взаємоіндуктивних опорів між обмотками з нерівномірним розподілом ампер-витків по висоті.

7 Поля розсіювання.

8 Визначення взаємоіндуктивних опорів складних обмоток: послідовна сполука простих обмоток; паралельне з'єднання простих обмоток; змішане з'єднання простих обмоток.

9 Визначення реактивної складової напруги короткого замикання.

10 Трансформатор з декількома ступенями свободи. Визначення еквівалентних індуктивних опорів автотрансформатора.

11 Регулювання загальною обмоткою на вторинній стороні при схемах: «у розтин», «виделка», «регулювання в нейтралі».

12 Визначення взаємоіндуктивного опору між двома обмотками: через потокозчеплення; методом площ; методом енергії магнітного поля. Метод потужностей.

13 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів.

14 Визначення взаємоіндуктивного опору між двома обмотками: через потокозчеплення; методом площ; методом енергії магнітного поля.

15 Епо́ра намагнічуючих сил, (п'ять характерних ділянок).

16 Визначення взаємоіндуктивних опорів між обмотками з нерівномірним розподілом ампер-витків по висоті.

17 Метод середньогометричних відстаней для розрахунку індуктивних опорів або індуктивностей трансформатора.

18 Метод дзеркальних відображень: для спрощеного трансформатора який має дві обмотки рівної висоти; для обмоток, довільно розташованих на стрижні.

19 Визначення взаємоіндуктивних опорів складних обмоток

20 Метод середньогометричних відстаней для розрахунку індуктивних опорів або індуктивностей трансформатора.

21 Метод дзеркальних відображень для спрощеного трансформатора який має дві обмотки рівної висоти.

22 Метод дзеркальних відображень для обмоток, довільно розташованих на стрижні.

23 Визначення взаємоіндуктивних опорів складних обмоток

24 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів.

25 Трансформатор з декількома ступенями свободи.

26 Визначення реактивної складової напруги короткого замикання.

27 Визначення еквівалентних індуктивних опорів автотрансформатора.

28 Регулювання загальною обмоткою на вторинній стороні - схема «у розтин».

29 Регулювання загальною обмоткою на вторинній стороні - схема «вилка».

30 Схема - «регулювання в нейтралі».

31 Особливості складання математичних моделей трансформаторів.

32 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів.

33 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів при обмотках рівної висоти розташованих на стрижні концентрично.

34 Математичні моделі багатообмоткових трансформаторів при довільно розташованих на стрижні обмотках.

35 Електромагнітні характеристики трансформатора і їхні параметри. Визначення індуктивних опорів.

36 Визначення взаємоіндуктивності або взаємоіндуктивних опорів між контурами.

37 Схема «реверс».