

МЕХАНІЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра автоматизованих систем електричного транспорту

**РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО
МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА**

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до виконання курсової роботи з дисципліни
*«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»***

Харків - 2015

Методичні вказівки розглянуто і рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматизованих систем електричного транспорту 17 листопада 2014 р., протокол № 4.

Рекомендуються для бакалаврів напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

доц. Н.П. Карпенко,
асист. В.П. Нерубацький

Рецензент

доц. А.Ф. Агулов

РОЗРАХУНОК ТРИФАЗНОГО СИЛОВОГО
МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи
з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Відповідальний за випуск Нерубацький В.П.

Редактор Буранова Н.В.

Підписано до друку 16. 12. 14 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,5. Тираж 100. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Визначення основних електричних параметрів.....	5
2 Визначення основних розмірів трансформатора.....	6
3 Розрахунок обмоток ВН і НН.....	13
3.1 Розрахунок обмоток НН.....	16
3.2 Розрахунок обмоток ВН.....	17
4 Розрахунок параметрів короткого замикання.....	20
4.1 Визначення втрат короткого замикання.....	20
4.2 Розрахунок напруги короткого замикання.....	23
4.3 Визначення струму короткого замикання і механічних сил в обмотках трансформатора.....	24
5 Розрахунок магнітної системи трансформатора.....	26
5.1 Розрахунок втрат холостого ходу.....	28
5.2 Розрахунок струму холостого ходу.....	30
6 Тепловий розрахунок трансформатора.....	31
Питання до захисту курсової роботи.....	32
Список літератури.....	33
Додаток А Варіанти завдання на курсову роботу.....	34
Додаток Б Довідкові дані до виконання курсової роботи....	35

ВСТУП

Студенти спеціальності напряму підготовки 6.050702 «Електромеханіка» виконують курсову роботу на тему «Розрахунок трифазного силового масляного трансформатора» з дисципліни «Електричні машини».

Вихідні дані, необхідні для розрахунку, студент відповідно до свого варіанта обирає згідно з Додатком А даних методичних вказівок. У результаті розрахунку необхідно:

- визначити основні розміри трансформатора;
- вибрати конструкцію та провести розрахунок обмоток вищої та нижчої напруги;
- визначити параметри короткого замикання;
- провести розрахунок плоскої магнітної системи, визначити параметри холостого ходу;
- провести тепловий розрахунок та розрахунок системи охолодження.

Отримані у результаті розрахунку значення величин мають відрізнятися від заданих не більше ніж:

- $\pm 5\%$ – напруга короткого замикання;
- $\pm 5\%$ – втрати короткого замикання;
- $\pm 7,5\%$ – втрати холостого ходу;
- $\pm 15\%$ – струм холостого ходу.

Робота оформляється у вигляді пояснювальної записки і креслень на форматі А1.

У пояснювальній записці коротко наводиться хід розрахунку з обґрунтуванням вибору конструкції вузлів, а також цих чи інших величин та коефіцієнтів з посиланням на відповідні посібники. Аркуші, рисунки і таблиці пояснювальної записки нумеруються.

Графічна частина проекту повинна мати один чи два аркуші креслень, на яких потрібно показати установку частини трансформатора, яка виймається, у баку в трьох проекціях. На двох проекціях (фронтальна та профільна) вказуються основні розміри трансформатора. Крім цього, показується вигляд трансформатора зверху, без розрізу, а також розріз 1/2 або 1/4 частини стержня з обмотками та деталями кріплення і вказуються розміри. До креслення додається специфікація основних вузлів трансформатора.

1 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ПАРАМЕТРІВ

У даному розділі необхідно визначити лінійні і фазні значення струму та напруги обмоток вищої напруги (ВН) і нижчої напруги (НН), випробувальної напруги обмоток, а також активної та реактивної складових напруги короткого замикання.

Номінальний (лінійний) струм обмоток, A , визначається як

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (1.1)$$

де S – номінальна потужність трансформатора, $kV \cdot A$;

U – номінальна напруга обмотки ВН або НН, V .

Фазний струм обмотки:

- для з'єднання у зірку

$$I_{\phi} = I; \quad (1.2)$$

- для з'єднання в трикутник

$$I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}. \quad (1.3)$$

Фазна напруга:

- для з'єднання у зірку

$$U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}; \quad (1.4)$$

- для з'єднання в трикутник

$$U_{\phi} = U. \quad (1.5)$$

Випробувальна напруга вибирається за таблицею Б.1. Активна і реактивна складові напруги короткого замикання, %:

$$U_{k.a.} = \frac{100 \cdot P_k}{S}; \quad (1.6)$$

$$U_{k.p.} = \sqrt{U_k^2 - U_{k.a.}^2}, \quad (1.7)$$

де P_k – втрати короткого замикання, кВт;
 S – номінальна потужність трансформатора, кВ·А;
 U_k – напруга короткого замикання, %.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ТРАНСФОРМАТОРА

У даному розділі вибирається марка і товщина листів сталі і вид ізоляції пластин магнітної системи, величина індукції у магнітній системі, а також конструкція та розміри основних ізоляційних проміжків головної ізоляції обмоток; визначається діаметр стержня та висота обмотки, а також активний переріз стержня.

Для розрахунку пропонується трансформатор з плоскою магнітною системою стержньового типу, з вертикально розташованими стержнями, які мають поперечний переріз у вигляді ступінчатої фігури, вписаної в коло, і з обмотками у вигляді кругових циліндрів. Силкові трансформатори такого типу найбільше використовуються на тягових підстанціях залізниць.

Число ступенів у перерізі стержня і коефіцієнт доповнення площі кола $\pi \cdot d^2/4$ площею $\Pi_{ф.с.}$ ступінчатої фігури

$$k_{кр} = \frac{\Pi_{ф.с.} \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad (2.1)$$

можуть бути обрані за таблицею Б.2.

Охолоджуючі канали в перерізі стержня трансформатора – повздовжні по відношенню до розташування пластин шириною 6 мм; при діаметрі стержня 0,36÷0,48 м – один канал; 0,50÷0,60 – два; 0,63÷0,75 м – три; 0,80÷0,95 м – чотири; 1,00÷1,09 м – п'ять - шість; 1,12÷1,18 м – сім; 1,22÷1,29 м – вісім; 1,32÷1,50 м – дев'ять; при діаметрах 0,80÷1,50 м додатково один поперечний канал шириною 10 мм.

Поперечний переріз ярма – багатоступінчатий з числом ступенів на 1÷2 менше числа ступенів стержня. Коефіцієнт

збільшення площини перерізу ярма по відношенню до перерізу стержня – 1,01÷1,03.

Вибір марки сталі та індукції у стержні може бути зроблено за таблицею Б.3.

Коефіцієнт заповнення $k_s = \Pi_c / \Pi_\phi$, тобто відношення активного перерізу сталі Π_c до площини ступінчатої фігури стержня або ярма Π_ϕ для різних видів ізоляції пластин наведені у таблиці Б.4.

Коефіцієнт заповнення сталлю, тобто відношення активного перерізу стержня до площі кола з діаметром, що дорівнює діаметру стержня трансформатора, дорівнює добутку коефіцієнтів $k_c = k_{kp} \cdot k_s$.

Основними розмірами трансформатора прийнято називати діаметр стержня магнітної системи d ; висоту обмотки l ; діаметр осьового каналу між обмотками d_{12} , який приблизно дорівнює середньому діаметру витка двох обмоток (рисунок 2.1).

Діаметр стержня, м, попередньо визначається за формулою:

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{cm} \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p}{f \cdot U_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}}, \quad (2.2)$$

де S_{cm} – потужність одного стержня, кВ·А;

f – частота мережі;

U_p – реактивна складова напруги короткого замикання;

a_p – приведена ширина каналу розсіювання;

k_p – коефіцієнт Роговського (коефіцієнт приведення ідеального поля розсіювання до реального, $k_p \approx 0,95$);

B_c – індукція у стержні;

k_c – коефіцієнт заповнення сталлю, $k_c = k_{kp} \cdot k_s$;

β – коефіцієнт, який визначає відношення між діаметром та висотою обмотки.

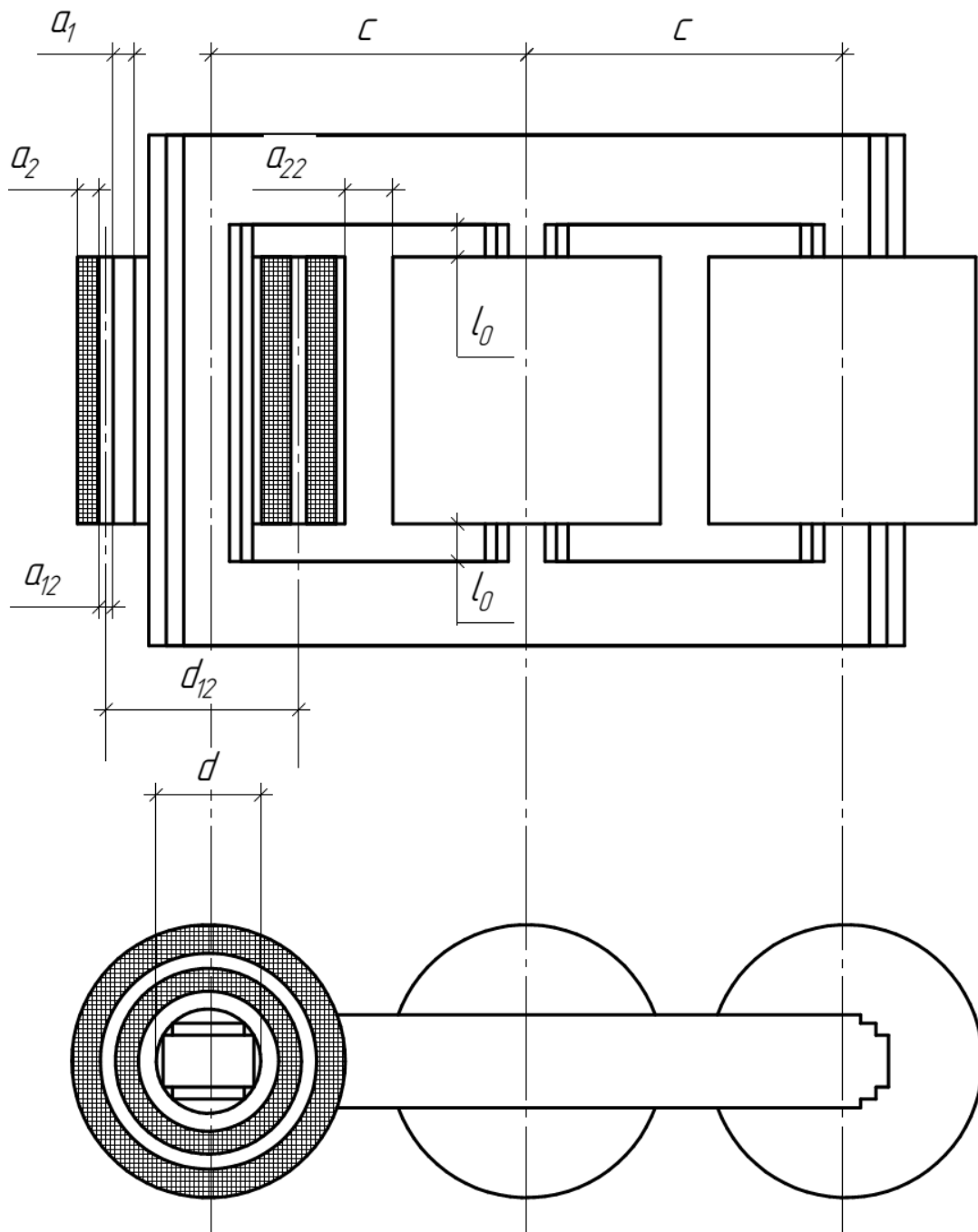


Рисунок 2.1 – Основні розміри трансформатора

Меншим значенням відповідають трансформатори вузькі та високі, більшим – широкі та низькі. Крім того, що вибір β значно впливає на співвідношення основних розмірів трансформатора, він впливає також і на співвідношення мас активних та інших матеріалів.

При виборі (таблиця Б.5) необхідно враховувати, що зменшення β при збереженні параметрів короткого замикання призводить до зменшення маси сталі магнітної системи витрат і

струму холостого ходу, а також до зростання маси металу обмоток.

Збільшення призводить до зростання маси сталі, втрат і струму холостого ходу, але маса металу обмоток зменшується.

Сумісно зі збільшенням β зростає вартість системи охолодження, маса і вартість конструктивних деталей остова, металу бака, трансформаторного масла, загальна маса трансформатора.

Таким чином, при інших різних умовах пропонується вибирати менше з рекомендованих значень β .

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}; \quad (2.3)$$

$$a_{12} = a'_{12} \cdot 10^{-3}, \quad (2.4)$$

де a'_{12} вибирається за таблицю Б.6.

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 10^{-2} \cdot k \cdot \sqrt[4]{S_{cm}}, \quad (2.5)$$

де k вибирається за таблицю Б.7.

За діаметром стержня вибирається близьке значення з нормалізованого ряду діаметрів стержня, м: 0,08; 0,085; 0,09; 0,095; 0,10; 0,105; 0,11; 0,115; 0,120; 0,125; 0,13; 0,14; 0,15; 0,16; 0,17; 0,18; 0,19; 0,20; 0,21; 0,22; 0,225; 0,23; 0,24; 0,245; 0,25; 0,26; 0,27; 0,28; 0,29; 0,30; 0,31; 0,32; 0,33; 0,34; 0,35; 0,37; 0,38; 0,39; 0,40; 0,42; 0,45; 0,48; 0,50; 0,53; 0,56; 0,60; 0,63; 0,67; 0,71; 0,75.

Після вибору нормалізованого d_i уточнюємо значення :

$$\beta_i = \beta \cdot \left(\frac{d_i}{d}\right)^4. \quad (2.6)$$

Активний переріз стержня, м²:

$$P_c = k_{kp} \cdot k_s \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}. \quad (2.7)$$

Електрорушійна сила одного витка приблизно дорівнює напрузі, В:

$$U_e = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c. \quad (2.8)$$

Середній діаметр основного каналу, м:

$$d_{12} = d_i + 2 \cdot a_{01} + 2 \cdot a_1 + a_{12}, \quad (2.9)$$

де $a_{01} = a'_{01} \cdot 10^{-3}$ (a'_{01} обирається за таблицею Б.8).

$$a'_1 = k \cdot \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (2.10)$$

де $k = 1,1$ – для трансформаторів потужністю 25÷630 кВ·А;

$k = 1,4$ – для трансформаторів 1000÷6300 кВ·А з напругою на обмотці ВН 35 кВ; для всіх трансформаторів з напругою на обмотці ВН 110 кВ $k = 1,05 \div 1,1$.

Висота обмотки, м:

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta_i}. \quad (2.11)$$

Ізоляція обмоток ділиться на головну (ізоляція кожної з обмоток від частини остова та від інших обмоток) і повздовжню (ізоляція між різними точками даної обмотки).

Ізоляційні відстані і конструкція головної ізоляції обмоток масляних трансформаторів класів напруги до 35 кВ включно вибираються за таблицями Б.6 та Б.8 згідно з рисунком 2.2.

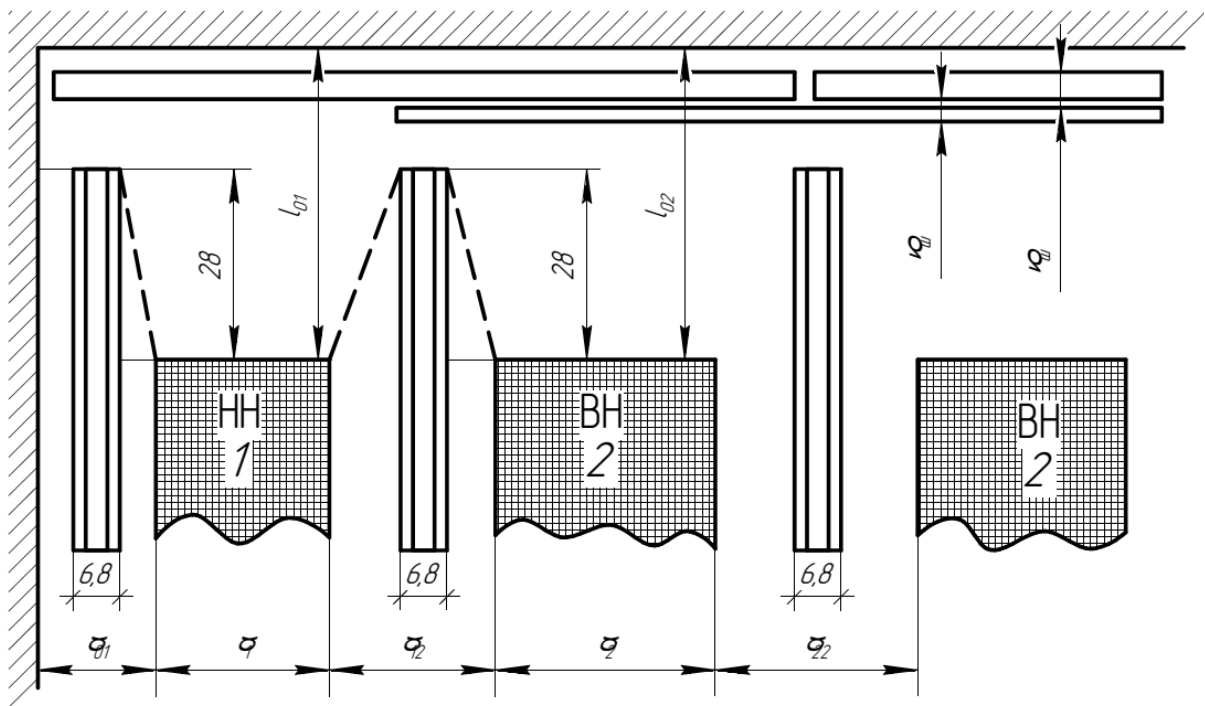


Рисунок 2.2 – Головна ізоляція обмоток класу напруги до 35 кВ включно

Структура та основні розміри головної ізоляції обмоток ВН класу напруги 110 кВ і з виводом лінійного кінця у середину висоти обмотки наведені на рисунку 2.3. Розміри пресувальних кілець за рисунком 2.3, суміжних з деревностружкового матеріалу $l_e = 60$ і 80 мм при потужності до 25000 і $40000 \div 80000$ кВ·А відповідно.

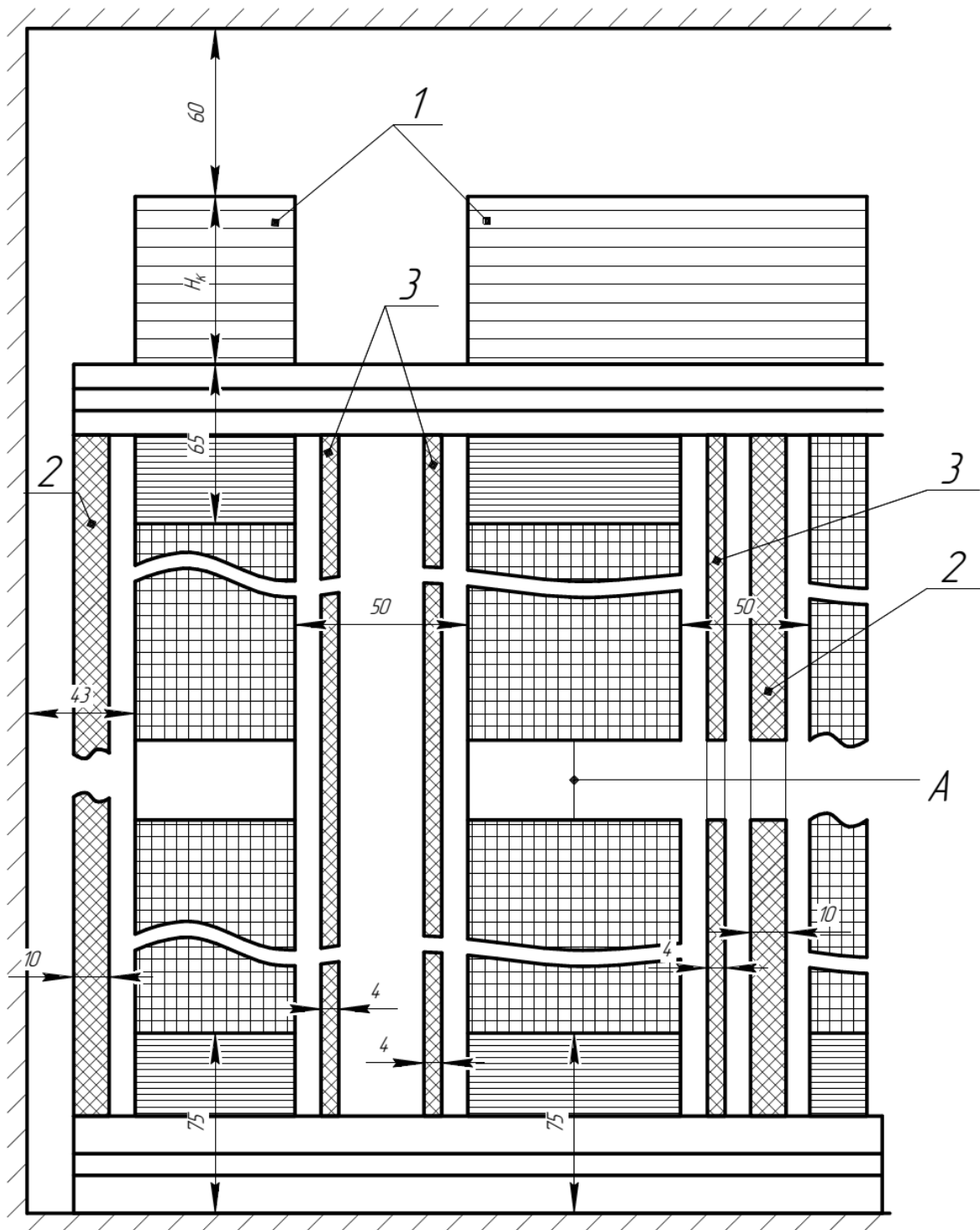


Рисунок 2.3 – Головна ізоляція обмотки ВН класу напруги 110 кВ з виводом лінійного кінця в середину висоти обмотки

Розміри сталевих кілець $l_e = 35$ і 55 мм при тих же потужностях. Для сталевих кілець відстань від торця обмотки до кільця становить 90 мм.

Ізоляція витка вибирається за таблицею Б.9. Міжшарова ізоляція застосовується лише у циліндричних обмотках масляних трансформаторів (таблиця Б.10).

У двошаровій циліндричній обмотці з прямокутного проводу при напрузі одного шару не більше 0,5 кВ достатня ізоляція забезпечується в масляному трансформаторі осьовим каналом шириною 4 мм або двома шарами картону по 0,5 мм; при робочій напрузі шару більше ніж 0,5 кВ і до 3 кВ – осьовим каналом 6÷8 мм і двома шарами картону по 1 мм.

Міжкатушкова ізоляція в катушкових обмотках масляних трансформаторів класу напруги до 110 кВ включно здійснюється радіальними масляними каналами з мінімальною висотою каналу, мм:

$$h = 2,2 \cdot \frac{U_k}{1000}, \quad (2.12)$$

де U_k – робоча напруга однієї катушки, В.

Розміри горизонтальних каналів перевіряються за умовами тепловіддачі і за таблицею Б.11. Для підвищення електричної міцності повздовжня ізоляція початкових і кінцевих катушок посилюється.

3 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК ВН І НН

У цьому розділі необхідно вибрати тип обмотки ВН і НН, а також зробити розрахунок обмоток ВН і НН.

Вибір конструкції обмотки провести з урахуванням потужності трансформатора, віднесеної до одного стержня, номінальної напруги обмотки та перерізу витка за таблицею Б.12.

Кількість витків обмотки на фазу (попередньо)

$$\omega = \frac{U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c}, \quad (3.1)$$

де U_ϕ – фазна напруга обмотки ВН чи НН, В;

Π_c – активний переріз стержня трансформатора, м²;

B_c – індукція у стержні, Тл.

Значення числа витків округляється до цілого числа. Потім знаходимо напругу одного витка, В:

$$U_a = \frac{U_\delta}{\omega}. \quad (3.2)$$

Середня густина струму в обмотках ВН і НН (попередньо), МА/мм²:

- для мідного проводу

$$l_m = 0,746 \cdot 10^4 \cdot k \cdot \frac{P_k \cdot U_\delta}{S \cdot d_{12}}; \quad (3.3)$$

- для алюмінієвого

$$l_a = 0,463 \cdot 10^4 \cdot k \cdot \frac{P_k \cdot U_\delta}{S \cdot d_{12}}, \quad (3.4)$$

де k визначається за таблицею Б.13.

Далі визначається переріз витка, мм²:

$$II'_\delta = \frac{I}{10^{-6} \cdot J}. \quad (3.5)$$

За сортаментом обмоткового проводу (таблиці Б.14 і Б.15) підбирається переріз, число та розміри паралельних проводів для обмоток НН і ВН і визначається справжня густина струму, МА/мм²:

$$J = \frac{1}{II_\delta}, \quad (3.6)$$

де $II_\delta = II'_\delta \cdot 10^{-6}$.

Підібрані за сортаментом проводи записуються таким чином:

марка проводу $n_\delta \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'}$, II_δ ,

де b і a – осьовий і радіальний розмір проводу без ізоляції;

a' і b' – з ізоляцією;

n_e – число паралельних проводів витка;

Π_e – переріз одного проводу.

По можливості слід вибирати із сортаменту проводи більших перерізів, що спрощує виготовлення обмотки.

Далі виконується розміщення кожної обмотки: розраховується число їх витків, число та розміщення шарів у циліндричних обмотках, число ходів у гвинтових та котушок у безперервних котушкових обмотках, число та розміри охолоджуючих каналів.

Для отримання заданих параметрів короткого замикання осьові розміри обох обмоток мають дорівнювати раніше отриманому значенню l . Радіальні розміри обмоток a_1 і a_2 визначаються за розмірами перерізу проводу і за числом шарів у міжшаровій ізоляції у циліндричних обмотках, за числом паралельних проводів в одному ході гвинтових обмоток і за числом витків у котушці безперервних котушкових обмоток (усі розміри виражати у метрах).

Потім визначаються поверхні охолодження обмоток Π_o , м², з урахуванням закриття частини поверхні різними ізоляційними деталями. Розміри проводів, відстані між охолоджуючими каналами по проводах без ізоляції і ширину каналів необхідно вибирати так, щоб теплове навантаження $q = P_{en}/\Pi_o$ (втрати на одиницю поверхні охолодження) не перевищувало допустимого значення за умовами нагріву. Для масляних трансформаторів звичайно величина $q \leq 1200$ Вт/м² (в окремих випадках $q = 1400 \div 1500$ Вт/м²).

Маса металу, кг, кожної обмотки визначається:

- для мідних обмоток

$$G_m = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot v = D_{cp} \cdot \omega \cdot \Pi_e; \quad (3.7)$$

- для алюмінієвих обмоток

$$G_a = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp} \cdot \omega \cdot \Pi_e, \quad (3.8)$$

де c – число активних стержнів, $c = 3$;

ω – число витків;

D_{cp} – середній діаметр витка, м;
 P_e – переріз витка, м².

Маса металу відводів, кг:
- для мідного проводу

$$G_{відв.м} = 8,9 \cdot l_{відв} \cdot P_{відв} \cdot 10^3; \quad (3.9)$$

- для алюмінієвого проводу

$$G_{відв.а} = 2,7 \cdot l_{відв} \cdot P_{відв} \cdot 10^3, \quad (3.10)$$

де $l_{відв} = 7,5 \cdot l$, м – для з'єднання обмоток у зірку;
 $l_{відв} = 14 \cdot l$, м – для з'єднання обмоток у трикутник;
 $P_{відв} = P_e$, м².

3.1 Розрахунок обмоток НН

Циліндрична обмотка з прямокутного проводу застосовується переважно у трансформаторах потужністю не більше 630 кВ·А, виконується у два шари, з'єднані послідовно. Число паралельних проводів – до восьми; віддається перевага намотці плазом; усі паралельні проводи повинні мати однакові розміри та площі поперечних перерізів.

Гвинтова обмотка застосовується лише як обмотка НН у трансформаторах з мідними обмотками з потужністю на один стержень від 160 кВ·А і вище при струмі не менше 300 А (при алюмінієвих обмотках – від 100 кВ·А і вище при струмі не менше 150÷200 А). Верхня границя за потужністю і струмом не обмежується. Мінімальне число паралельних проводів – 4, усі паралельні проводи повинні мати однакові розміри та площу поперечного перерізу, намотка може бути одноходовою, двоходовою, в окремих випадках – чотириходовою, обов'язкова транспозиція паралельних проводів – спільна і групова для одноходової або одного ходу багатходової обмотки або рівномірно розподілена згідно зі схемою для двоходової обмотки.

При визначенні висоти обмотки враховують, що кожна спільна і групова транспозиція збільшує висоту обмотки на

висоту витка і каналу, рівномірно розподілена транспозиція висоти обмотки не збільшує; дійсна спільна висота усіх горизонтальних каналів 4÷6 % менше розрахункової висоти завдяки усадці міжкотушкових прокладок після сушення.

3.2 Розрахунок обмоток ВН

У масляних трансформаторах потужністю 25÷200000 кВ·А з перемиканням без збудження (ПБЗ) передбачено виконання в обмотках ВН чотирьох відгалужень на +5; +2,5; -2,5; -5 % номінальної напруги поза основним відгалуженням з номінальною напругою.

Число витків в обмотці ВН:

- верхні ступені напруги

$$\omega_2 + 0,05 \cdot \omega_2 \quad \text{і} \quad \omega_2 + 0,025 \cdot \omega_2; \quad (3.11)$$

- середній ступінь напруги

$$\omega_2 = \omega_1 \cdot \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi 1}}; \quad (3.12)$$

- нижні ступені напруги

$$\omega_2 - 0,025 \cdot \omega_2 \quad \text{і} \quad \omega_2 + 0,05 \cdot \omega_2. \quad (3.13)$$

Перемикання відгалужень створюється перемиканням з виведеними з бака рукоятками управління при вимиканні усіх обмоток трансформатора від мережі.

Число котушок (за винятком багаточислової циліндричної обмотки) вибирається так, щоб:

- число котушок було парним;
- робоча напруга котушки не перевищувала 800÷1000 В;
- при номінальній напрузі 20 кВ і вище усі витки, необхідні для регулювання напруги, і витки з посиленою ізоляцією розташовувались в окремих котушках.

В трансформаторах з перемиканням відгалужень під навантаженням (РПН) необхідно передбачати зміну числа витків обмотки ВН у межах, визначених у таблиці Б.16.

Число витків на одному ступені регулювання:

$$\omega_2 = \omega_{2ном} \cdot \Delta U_{ст}^* , \quad (3.14)$$

де $\omega_{2ном}$ – число витків обмотки ВН при номінальній напрузі;
 $\Delta U_{ст}^*$ – відносне значення напруги на одному ступені регулювання. $\Delta U_{ст}^* = \frac{\Delta U_{ст} \%}{100}$.

Число витків на відгалуження:

- ступінь U_{2max} :

$$\omega_{2max} = \omega_{2ном} + k_{p2} \cdot \omega_{p2} ; \quad (3.15)$$

- ступінь U_{2min} :

$$\omega_{2min} = \omega_{2ном} - k_{p2} \cdot \omega_{p2} , \quad (3.16)$$

де k_{p2} – число ступенів регулювання вниз і вгору від номінального.

Найбільшого розповсюдження набули обмотки:

1 Багатошарова циліндрична обмотка з круглого проводу – основне застосування на стороні ВН, в окремих випадках НН, трансформаторів з потужністю на один стержень не більше 250 кВ·А (з міркувань механічної міцності), при класі ізоляції не вище 35 кВ. Число паралельних проводів (однакового перерізу) – не більше двох, транспозиція не застосовується.

Міжшарова ізоляція – кабельний папір (за таблицею Б.10). При потужності більш ніж 35 кВ·А обмотка роз'єднується на дві котушки на стороні ВН – від 3/5 до 2/3 загального числа шарів, на стороні НН – 1/2.

При напрузі 35кВ обмотка обладнується екраном.

2 Безперервна котушкова обмотка має високу механічну і електричну міцність, застосовується в основному на стороні ВН при потужності трансформатора на один стержень більше ніж 100 кВ·А при напрузі від 3 до 110÷220 кВ і вище, при струмі від

15÷18 А і вище для мідних обмоток та 10÷13 А і вище для алюмінієвих обмоток. Верхня межа застосування за потужністю не встановлюється. Число паралельних проводів (однакового перерізу) – до 3÷5, транспозиція проводів робиться при переході між котушками і допоміжного місця не потребує. Міжкотушкова ізоляція – масляні канали.

При густині струму менше 3 МА/м² у мідних обмотках і менше 2 МА/м² в алюмінієвих обмотках горизонтальні канали достатньо зробити картонними через дві котушки, замінюючи масляний канал двома електронними шайбами 2×0,5.

Радіальні розміри котушок різного призначення (основні, регульовальні, з підсиленою ізоляцією) мають бути приблизно рівними. При визначенні висоти обмотки необхідно враховувати усадку міжкотушкових прокладок і шайб після сушення на 4÷6 %.

3 Багат шарова циліндрична обмотка з прямокутного проводу застосовується як обмотка ВН, інколи НН у трансформаторах потужністю від 1000 до 63000÷80000 кВ·А для мідних і до 16000÷25000 кВ·А для алюмінієвих обмоток. Число паралельних проводів – до 4÷8, усі проводи мають однаковий переріз, намотка тільки плинком; шари з'єднуються послідовно, охолодження здійснюється 1÷4 – осьовими масляними каналами.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

У цьому розділі визначаються втрати короткого замикання (основні і додаткові в обмотках, додаткові в елементах конструкції), напруга короткого замикання, механічні сили в обмотках.

4.1 Визначення втрат короткого замикання

Втрати короткого замикання P_k складаються:

- з основних витрат в обмотках ВН і НН $P_{осн1}$, $P_{осн2}$;
- додаткових витрат в обмотках, спричинених полем розсіювання, $P_{\partial1}$, $P_{\partial2}$;
- основних витрат у відгалуженнях між обмотками і вводами $P_{відз1}$, $P_{відз2}$;

- додаткових витрат у відгалуженнях, спричинених полем розсіювання відгалужень $P_{відг.д1}$, $P_{відг.д2}$;

- втрат у стінках бака та інших металевих конструкціях, спричинених полем розсіювання обмоток і відгалужень P_{σ} .

Основні втрати при температурі 75 °С, Вт:

- для обмоток з міді

$$P_{осн.м} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_m; \quad (4.1)$$

- для обмоток з алюмінію

$$P_{осн.а} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J^2 \cdot G_a, \quad (4.2)$$

де J – густина струму в обмотці;

G_m , G_a – маса металу обмотки, кг.

Додаткові витрати в обмотках:

$$P_{д1} = (k_{д1} - 1) \cdot P_{осн1}; \quad (4.3)$$

$$P_{д2} = (k_{д2} - 1) \cdot P_{осн2}. \quad (4.4)$$

При розрахунках додаткових втрат в обмотках усі лінійні розміри проводів a , b , d та висоту l обмотки виразити в метрах, у зв'язку з цим необхідно розміри проводу, які у довідкових таблицях даються в міліметрах, помножити на 10^{-3} .

Для мідних обмоток:

- прямокутний провід

$$k_{д.м} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (4.5)$$

- круглий провід

$$k_{д.м} = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2. \quad (4.6)$$

Для алюмінієвих обмоток:

- прямокутний провід

$$k_{д.а} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (4.7)$$

- круглий провід

$$k_{\partial.a} = 1 + 0,017 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot d^4 \cdot n^2, \quad (4.8)$$

де

$$\beta = \frac{b \cdot m \cdot k_p}{l}; \quad (4.9)$$

$$\beta_1 = \frac{d \cdot m \cdot k_p}{l}, \quad (4.10)$$

де $k_p = 0,95$.

Втрати в проводах, Вт:

- мідний провід

$$P_{\text{відв.м}} = 2,4 \cdot 10^{-12} \cdot J_{\text{відв}}^2 \cdot G_{\text{відв}}; \quad (4.11)$$

- алюмінієвий провід

$$P_{\text{відв.а}} = 12,75 \cdot 10^{-12} \cdot J_{\text{відв}}^2 \cdot G_{\text{відв}}, \quad (4.12)$$

де $J_{\text{відв}}$ – густина струму в проводах, МА/мм²;

$G_{\text{відв}}$ – маса металу відводів, кг.

Втрати в баку і металевих конструкціях, Вт:

$$P_{\sigma} \approx 10 \cdot k \cdot S, \quad (4.13)$$

де k вибирається за таблицею Б.17;

S – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Втрати короткого замикання:

$$P_{\kappa} = P_{\text{осн1}} \cdot k_{\partial1} + P_{\text{осн2}} \cdot k_{\partial2} + P_{\text{відв.1}} + P_{\text{відв.2}} + P_{\sigma}. \quad (4.14)$$

Густина теплового потоку на охолоджуючій поверхні обмоток (Π_o , м²) для кожної обмотки, Вт/м²:

$$q = \frac{P_{осн} \cdot k_d}{\Pi_o}. \quad (4.15)$$

Охолоджуюча поверхня кожної обмотки (Π_o) визначається як зовнішня, обтічна маслом сумарна відкрита поверхня ($\Pi_{від}$) усіх частин цієї обмотки – витків, котушок, шарів – з урахуванням закривання частин цієї поверхні ізоляційними деталями (прокладками, рейками, шайбами):

$$\Pi_o = \Pi_{від} \cdot k_s, \quad (4.16)$$

де $k_s = 0,75$.

Одержані значення з природною циркуляцією масла мають бути не більше 1400 Вт/м².

4.2 Розрахунок напруги короткого замикання

Напруга короткого замикання розраховується за формулою:

$$U_k = \sqrt{U_p^2 + U_a^2}. \quad (4.17)$$

Реактивна складова напруги короткого замикання, %:

$$U_p = \frac{7,9 \cdot f \cdot S_{см} \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p \cdot k_q}{U_6^2} \cdot 10^{-1}; \quad (4.18)$$

де k_q – коефіцієнт, який залежить від взаємного розташування обмоток (для нашого випадку $k_q = 1$);

a_p – зведена ширина каналу розсіювання, м:

$$a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (4.19)$$

де a_{12} – радіальний розмір каналу обмоток ВН і НН, м;
 a_1 і a_2 – радіальні розміри обмоток, м.

$$k_p = 1 - \tau; \quad (4.20)$$

$$\tau = \frac{a_{12} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}, \quad (4.21)$$

де l – осьовий розмір обмоток, м.
Активна складова, %:

$$U_a = \frac{P_k}{10 \cdot S}, \quad (4.22)$$

де P_k – втрати короткого замикання, Вт.
 S – номінальна потужність трансформатора, кВ·А.

Допущене відхилення напруги короткого замикання у готового трансформатора 10 %, у розрахунку рекомендується не більше 5 %.

4.3 Визначення струму короткого замикання і механічних сил в обмотках трансформатора

Усталений струм короткого замикання I_k для трансформатора потужністю менше 1000 кВ·А

$$I_k = 100 \cdot \frac{I_n}{U_k}, \quad (4.23)$$

де I_n – номінальний струм фази обмотки, А.

Значення I_k має бути не більше $25 \cdot I_i$.

Для трансформаторів потужністю від 1000 кВ·А і більше при визначенні усталеного струму короткого замикання вираховується потужність короткого замикання системи постачальної мережі:

$$I_k = 100 \cdot \frac{I_n}{U_k + U_{k..m}}, \quad (4.24)$$

де $U_{k..m} = 100 \cdot S / S_{k..m}$;

S – номінальна потужність трансформатора, МВ·А;

$S_{k..m}$ – потужність короткого замикання мережі, МВ·А, вибирається за таблицею Б.18.

Найбільш ударний струм короткого замикання, А, визначається за формулою:

$$I_{k..y\partial} = k_{y\partial} \cdot \sqrt{2} \cdot I_k, \quad (4.25)$$

де $k_{y\partial} \cdot \sqrt{2}$ визначається за таблицею Б.19.

Радіальна механічна сила, діюча на одну обмотку, Н:

$$F_p = 0,628 \cdot (I_{k..y\partial} \cdot \omega)^2 \cdot \beta \cdot k_p \cdot 10^{-6}. \quad (4.26)$$

Для підвищення механічної стійкості обмотки (НН) під впливом радіальних сил її пропонується намотувати на жорсткий паперово-бакелітовий циліндр при достатньому числі рейок між обмоткою і циліндром або збільшувати переріз проводу, зменшуючи густину струму. При відсутності цих заходів середня стискальна напруга в проводах цієї обмотки

$$\tau_{cm} = \frac{F_p}{\pi \cdot \omega \cdot \Pi_e}, \quad (4.27)$$

де F_p – радіальна механічна сила, Н;

ω – число витків обмотки;

Π_e – переріз витка, м².

Стискальна напруга τ_{cm} не повинна бути більше 30 МПа у мідних і 15 МПа в алюмінієвих обмотках.

При рівномірному розподілі по висоті обмотки обтічним струмом витків обох обмоток виникають осьові сили, Н;

$$F_{oc} = F_p \cdot \frac{a_p}{2 \cdot l}, \quad (4.28)$$

де a_p – зведена ширина каналу розсіювання, м;

l – висота обмоток, м;

5 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ ТРАНСФОРМАТОРА

Для нормалізованого ряду діаметрів стержня магнітної системи трансформатора нормалізовані також: число ступенів у перерізі стержня і ярма, розміри пакетів пластин; число, розміри і розміщення охолоджуючих каналів, а також площини поперечних перерізів стержня (Π_c) і ярма (Π_y) (таблиця Б.20).

Активний переріз стержня, м²:

$$\Pi_c = k_z \cdot \Pi_{\phi.c} \quad (5.1)$$

Активний переріз ярма, м²:

$$\Pi_y = k_z \cdot \Pi_{\phi.y} \quad (5.2)$$

де k_z обирається за таблицею Б.4.

Індукція у стержні, Тл:

$$B_c = \frac{U_a}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_c} \quad (5.3)$$

Індукція в ярмі, Тл:

$$B_y = \frac{U_a}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_y} \quad (5.4)$$

Маса сталі у стержнях (G_c) і (G_y) при багатоступінчатій нормалізованій формі поперечного перерізу стержня і ярма, кг:

$$G_{ст} = G_c + G_y \quad (5.5)$$

Маса сталі у стержнях:

$$G_c = 1,03 \cdot c \cdot l_c \cdot \Pi_c \cdot \gamma_{ст} \quad (5.6)$$

де c – число стержнів магнітної системи, $c = 3$;

l_c – висота стержня, м;

Π_c – переріз стержня, м²;

γ_{cm} – густина сталі (для холодної сталі $\gamma_{cm} = 7650$ кг/м³).

Маса сталі ярма, кг:

$$G_{я} = G'_{я} + G''_{я}, \quad (5.7)$$

де $G'_{я}$ – маса сталі двох ярм в їх частинах, розміщених між осями крайніх стержнів за рисунком 5.1;

$G''_{я}$ – маса сталі двох ярм в їх частинах, заштрихованих на рисунку 5.1.

$$G'_{я} = 2 \cdot (c - 1) \cdot C \cdot \Pi_{я} \cdot \gamma_{cm}. \quad (5.8)$$

$$G''_{я} = 4 \cdot \frac{G_k}{2} = 2 \cdot G_k. \quad (5.9)$$

Маса сталі кутка магнітної системи (G_k), кг:

$$G_k = 0,822 \cdot \Pi_{я} \cdot d \cdot \gamma_{cm}, \quad (5.10)$$

де d – діаметр стержня.

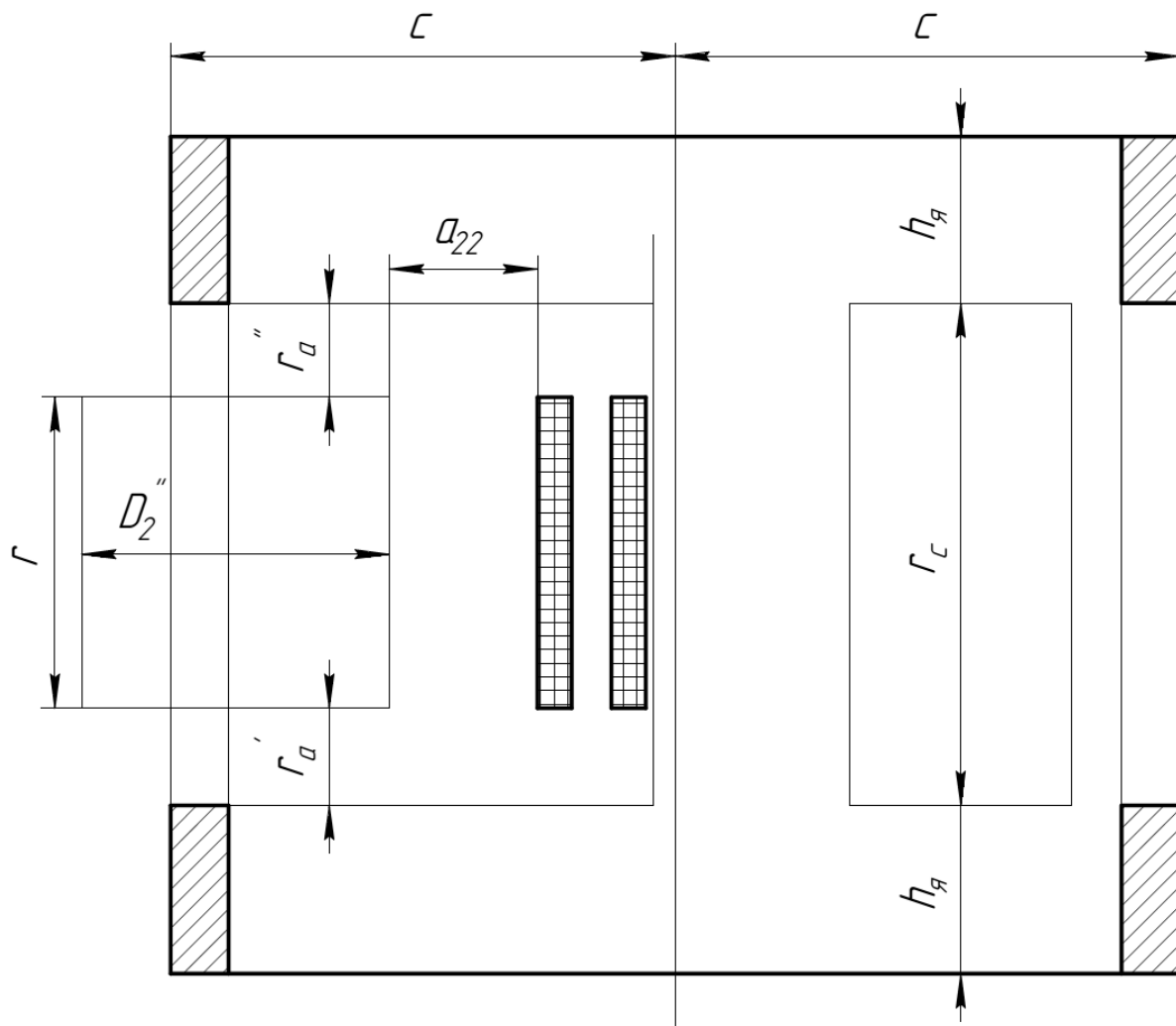


Рисунок 5.1 – Розміри плоскої магнітної системи

5.1 Розрахунок втрат холостого ходу

Втрати холостого ходу, Вт, можна розрахувати за формулою:

$$P_x = k_{n.o} \cdot [p_c \cdot G_c + p_{я} \cdot (G'_я - 4 \cdot G_k) + 3 \cdot k_{n.y} \cdot (p_c + p_{я}) \cdot G_k], \quad (5.11)$$

де $k_{n.y}$ вибирається за таблицею Б.21;

p_c і $p_{я}$ – питомі витрати при розрахунковій індукції і частоті, Вт/кг, обираються за таблицею Б.22;

$k_{n.o} = 1,15$ при потужності трансформатора до 6300 кВ·А і 1,20 при більших потужностях.

Намагнічувальна потужність при холостому ході може бути визначена за формулою

$$Q_x = k'_{m.o} \cdot [q_c \cdot G_c + q_y \cdot (G'_y - 4 \cdot G_k) + 3 \cdot k_{m.y} \cdot k_{m.nl} (q_c + q_y) \cdot G_k] + k''_{m.o} \cdot Q_z, \quad (5.12)$$

де $k'_{m.o} = 1,30$ і $1,40$ для трансформаторів потужністю до 6300 кВ·А і більших (коефіцієнти для сталі марок 3404 і 3405);

$k_{m.y}$ обирається за таблицею Б.23;

$k_{m.nl} = 1,35$ і $1,20$ відповідно при потужностях до 6300 кВ·А і більших;

$k''_{m.o} = 1,07$ і $1,15$ відповідно при потужностях до 6300 кВ·А і більших;

Q_z – намагнічувальна потужність для немагнітних шихтованих зазорів, яка визначається як

$$Q_z = \sum n_z \cdot q_z \cdot \Pi_z, \quad (5.13)$$

де n_z – число зазорів кожного розміру;

q_z – питома намагнічувальна потужність на 1 м² зазору;

Π_z – площа кожного зазору, м².

Для косоного стику $\Pi_z = \sqrt{2} \cdot \Pi_c$; для прямого – $\Pi_z = \Pi_c$.

Індукція B_z на косому стику $B_{z1} = \frac{B_c}{\sqrt{2}}$; на прямому – $B_{z2} = B_c$.

Значення питомої намагнічувальної потужності для зазорів q_{z1} і q_{z2} знаходять для індукцій B_{z1} і B_{z2} за таблицею Б.24.

Для трифазної магнітної системи:

- якщо шість косих стиків,

$$Q_z = 8,45 \cdot q_{z1} \cdot \Pi_z; \quad (5.14)$$

- якщо чотири косих і три прямих стиків,

$$Q_z = (5,65 \cdot q_{z1} + 3 \cdot q_{z2}) \cdot \Pi_z; \quad (5.15)$$

- якщо сім прямих стиків,

$$Q_3 = 7,05 \cdot q_{32} \cdot P_3. \quad (5.16)$$

5.2 Розрахунок струму холостого ходу

При розрахунку струму холостого ходу окремо визначають його активну і реактивну складові.

Повний струм холостого ходу, %:

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}. \quad (5.17)$$

Зазвичай визначають не абсолютне значення струму холостого ходу і його складових, а їх відносне значення по відношенню до номінального струму трансформатора i_0 , i_{0a} , i_{0p} , визначаючи його у відсотках номінального струму.

Відносне значення струму холостого ходу у відсотках номінального струму

$$i_{0p} = \frac{Q_x}{10 \cdot S}, \quad (5.18)$$

де Q_x – намагнічувальна потужність, Вт;

S – номінальна потужність, кВ·А.

Активна складова холостого ходу викликається наявністю втрат холостого ходу.

Активна складова струму, %:

$$i_{0a} = \frac{P_x}{10 \cdot S}, \quad (5.19)$$

де P_x – втрати холостого ходу, Вт.

Отримані значення струму холостого ходу мають відрізнятися від заданих не більше ніж на 15 %.

6 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

Задача теплового розрахунку трансформатора полягає:

- у визначенні перепадів температури між обмотками і магнітною системою, з одного боку, і маслом – з іншого;
- підборі конструкції і розмірів бака і системи охолодження, які забезпечують нормальну тепловіддачу усіх втрат при температурах обмоток, магнітної системи і масла, що не перевищують допустимі температури;
- перевірному розрахунку перевищення температури обмоток, магнітної системи і масла над навколишнім повітрям.

Тепловий розрахунок здійснюється згідно з [1, 9,5 – 9,7]. Якщо нагрів перевищує межі, необхідно зменшити I або β , і потім ще раз перерахувати трансформатор.

ПИТАННЯ ДО ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

1 Яке призначення і який принцип дії трифазного трансформатора?

2 Які обмотки називають первинними і вторинними? Як маркуються виводи обмоток?

3 Які є основні схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів? Яке співвідношення пов'язує лінійні і фазні величини?

4 Що називають групою трансформатора, чим вона визначається?

5 Що являє собою активна частина трансформатора?

- 6 Які різновиди магнітних систем є у трансформаторі? Які їх особливості?
- 7 Які типи обмоток застосовують у трансформаторах?
- 8 Які розміри трансформатора є основними?
- 9 З якою метою проводять дослід холостого ходу трансформатора?
- 10 Від яких величин залежить характеристика ККД трансформатора?
- 11 Що називають напругою короткого замикання трансформатора? В яких одиницях вона вимірюється?
- 12 Що називають номінальною змінною напруги трансформатора?
- 13 Які механічні сили діють на обмотки при короткому замиканні?
- 14 Які існують схеми регулювання вторинної напруги?
- 15 Яким чином визначають необхідну кількість радіаторів для охолодження трансформатора?
- 16 Як відбувається тепловіддача у трансформаторах?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Тихомиров, П.Н. Расчёт трансформаторов [Текст]: учеб. пособие для вузов / П.Н. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
- 2 Гольдберг, О.Д. Проектирование электрических машин [Текст]: / О.Д. Гольдберг, Я.С. Гурин, И.С. Свириденко. – М.: Высшая школа, 1984. – 431 с.
- 3 Копылов, И.П. Электрические машины. [Текст]: учебн. для вузов / И.П. Копылов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
- 4 Вольдек, А.И. Электрические машины. Введение в электромеханику. Машины постоянного тока и трансформаторы

[Текст]: учебн. для вузов / А.И. Вольдек, В.В. Попов. – СПб.: Питер, 2008. – 320 с.

5 Вольдек, А.И. Электрические машины [Текст]: учебн. для студ. высш. техн. учебн. заведений / А.И. Вольдек. – 3-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.

6 Китаев, В.Е. Электрические машины. Ч. I. Машины постоянного тока. Трансформаторы [Текст]: учеб. пособие для техникумов / В.Е. Китаев, Ю.М. Корхов, В.К. Свирин; под ред. В.Е. Китаева. – М.: Высшая школа, 1978. – 184 с.

7 Китаев, В.Е. Электрические машины. Ч. II. Машины переменного тока [Текст]: учеб. пособие для техникумов / В.Е. Китаев, Ю.М. Корхов, В.К. Свирин; под ред. В.Е. Китаева. – М.: Высшая школа, 1978. – 184 с.

ДОДАТОК Б

Довідкові дані до виконання курсової роботи

Таблиця Б.1 – Випробувальна напруга силових трансформаторів, кВ

Клас напруги обмотки	Короткочасна напруга промислової частоти						Номінальна напруга промислової частоти для випробувань внутрішньої ізоляції лінійного
	Однохвильова			При плавному підйомі			
	Внутрішня ізоляція			Зовнішня ізоляція			
	Лінійного виводу відносно землі та	Між лінійними виводами	Між виводами нейтралі	Лінійного виводу відносно	Між лінійними виводами	Між виводами нейтралі	

	інших обмоток	ми різних фаз		землі	ми різних фаз		виводу ВН відносно землі
3	18	-	18	26	-	26	-
6	25	-	25	34	-	34	-
10	35	-	35	45	-	45	-
15	45	-	45	60	-	60	-
20	55	-	55	70	-	70	-
24	65	-	65	80	-	80	-
27	70	-	70	90	-	90	-
35	85	-	85	105	-	105	-
110	200	200	100	280	-	135	-
150	230	275	130	320	415	195	-
220	325	400	200	465	600	280	220

Таблиця Б.3 – Рекомендована індукція у стержнях силових трансформаторів, Тл

Марка сталі	Потужність трансформатора, кВ·А		
	до 16	25÷100	160 і вище
3411, 3412, 3413	1,45÷1,50	1,50÷1,55	1,55÷1,60
3404, 3405, 3406	1,50÷1,55	1,55÷1,60	1,55÷1,65

Таблиця Б.4 – Коефіцієнти заповнення перерізу пакета перерізом сталі

Товщина сталі, мм	Покриття	
	термостійке	термостійке плюс однократне лакування

0,27	0,94-0,95	0,935-0,945
0,30	0,95-0,96	0,945-0,955
0,35	0,96-0,97	0,955-0,965

Таблиця Б.5 – Рекомендовані значення β для масляних трансформаторів

Потужність, кВ·А	Алюміній			Мідь		
	6÷10 кВ	35 кВ	110 кВ	6÷10 кВ	35 кВ	110 кВ
25÷100	1,2÷1,6	-	-	1,8-2,4	-	-
160÷630	1,2÷1,6	1,2÷1,5	-	1,8-2,4	1,8÷2,4	-
1000÷6300	1,3÷1,7	1,2÷1,6	-	2,0-2,6	1,8÷2,4	-
6300÷160000	-	1,1÷1,3	1,1÷1,3	-	1,7÷2,0	1,6÷2,0
250000÷80000	-	-	-	-	1,3÷1,6	1,5÷1,8

Таблиця Б.6 – Мінімальні ізоляційні відстані обмоток ВН

Потужність трансформатора S , кВ·А	$U_{вин}$ для НН, кВ	ВН від ярма, мм		Між ВН і НН, мм		Виступ циліндра $l_{н2}$, мм	Між ВН і НН, мм	
		l_{02}	δ_{02}	a_{12}	δ_{12}		a_{22}	δ_{22}
25÷100	18,25 і 35	20	-	9,0	2,5	10	8,0	-
160÷630	18,25 і 35	30	-	9,0	3,0	15	10	-
1000÷6300	18,25 і 35	50	-	20	4,0	20	18	-
630 і вище	45	50	2,0	20	4,0	20	18	2,0
630 і вище	55	50	2,0	20	5,0	30	20	3,0
100÷630	85(пр.1)	75	2,0	27	5,0	50	20	3,0
1000÷6300	85(пр.2)	75	2,0	27	5,0	50	30	3,0
10000 і вище	85	80	3,0	30	6,0	50	30	3,0

Примітки

1 Для циліндричних багатошарових обмоток мінімальна ізоляційна відстань $a_{12} = 27$ мм. Електростатичний екран з ізоляцією 3,0 мм. При розрахунку діаметра стержня магнітної системи і реактивної складової напруги короткого замикання приймають $a_{12} = 30$ мм.

2 При наявності пресувальних кілець відстань до верхнього ярма l_{02} приймається більшою на 45 мм для трансформаторів потужністю 10000÷63000 кВ·А. Відстань від нижнього ярма в цьому випадку вибирається за таблицею.

Таблиця Б.7 – Значення коефіцієнта k

Потужність трансформатора, кВ·А	Клас напруги, кВ		
	10	35	110
до 250	0,63	0,65÷0,58	-
400÷630	0,53		
1000÷6300	0,51÷0,43	0,52÷0,48	-
10000÷80000	-	0,48÷0,46	0,68÷0,58

Таблиця Б.8 – Мінімальні ізоляційні відстані обмоток НН

Потужність трансформатора S , кВ·А	$U_{вин}$ для НН, кВ	НН від ярма l_{01} , мм	НН від стержня, мм			
			δ_{01}	$a_{н1}$	a_{01}	$l_{н1}$
25÷50	5	15	Картон 2×0,5	-	4,0	-
400÷630*	5	Приймається рівним знайденому по випробувальній напрузі	Картон 2×0,5	-	5,0	-
1000÷2500	5		4,0	6,0	15	18
630÷1600	18,25 та 35		4,0	6,0	15	25
2500÷6300	18,25 та 35		4,0	8,0	17,5	25
630 і вище	45		5,0	10	20	30
630 і вище	55		5,0	13	23	45
Усі потужності	85		6,0	19	30	70

* Для гвинтової обмотки з випробувальною напругою $U_{а\grave{e}т} = 5$ кВ розміри брати з наступного рядка.

Таблиця Б.9 – Вибір виткової ізоляції

Випробувальна напруга обмотки, кВ	Марка проводу	Товщина ізоляції на дві сторони, мм
5÷10	ПЭЛБО	Круглий провід 0,17÷0,21 (0,27÷0,31)
	ПБ і АПБ	0,30 (0,40)
	ПБ і АПБ	Прямокутний провід 0,45 (0,50)
200	ПБ і АПБ	Прямокутний провід 1,20 (1,35)
200	ПБПУ	Прямокутний провід 1,35
		Прямокутний провід 2,96 (для

		регулювальних обмоток)
Примітка – В дужках вказані розрахункові розміри проводу з урахуванням допуску.		

Таблиця Б.10 – Нормальна міжшарова ізоляція в багатошарових циліндричних обмотках

Сумарна робоча напруга двох шарів обмотки, В	Число шарів кабельного паперу на товщину листів, мм	Виступ міжшарової ізоляції на торцях обмотки (на одну сторону), мм
До 1000	2×0,12	10
Від 1001 до 2000	3×0,12	16
Від 2001 до 3000	4×0,12	16
Від 3001 до 3500	5×0,12	16
Від 3501 до 4000	6×0,12	22
Від 4001 до 4500	7×0,12	22
Від 4501 до 5000	8×0,12	22
Від 5001 до 5500	9×0,12	22

Таблиця Б.11 – Мінімальні розміри охолоджуючих каналів в обмотках, мм

Вертикальні канали				Горизонтальні канали	
Довжина каналу, мм	Обмотка-обмотка	Обмотка-циліндр	Обмотка-стержень	Довжина каналу, мм	Обмотка-обмотка
до 300	4,0÷5,0	4,0	4,0÷5,0	до 40	4,0
300÷500	5,0÷6,0	5,0	5,0÷6,0	40÷60	5,0
500÷1000	6,0÷8,0	5,0÷6,0	6,0÷8,0	60÷70	6,0
1000÷1500	8,0÷10,0	6,0÷8,0	8,0÷10	70÷80	7,0

Таблиця Б.13 – Середня густина струму I , МА/м²

Потужність трансформатора, кВ·А	63÷630	1000÷630	10000÷1600	25000÷8000
	0	0	0	0
Мідь	1,8÷2,2	2,3÷3,5	2,2÷3,5	2,0÷3,5
Алюміній	1,1÷1,8	1,2÷2,5	1,2÷2,7	-

Таблиця Б.16 – Регулювання напруги в трансформаторі під навантаженням

S_n , кВ·А	U_2 , кВ	Межа регулювання %
63÷630	6, 10, 20, 35	$\pm 6 \times 1,67 = \pm 10,0$
1000÷6300	6,1	$\pm 8 \times 1,25 = \pm 10,0$
1000÷6300	20, 35	$\pm 6 \times 1,50 = \pm 9,0$
10000÷63000	від 10 до 35	$\pm 8 \times 1,50 = \pm 12,0$
6300÷80000	110	$\pm 9 \times 1,78 = \pm 16,0$

Таблиця Б.17 – Значення коефіцієнта при розрахунку витрат

Потужність S, кВ·А	до 1000	1000÷ 4000	6300÷ 10000	16000÷ 25000	40000÷ 63000
<i>k</i>	0,015÷ 0,02	0,025÷ 0,04	0,04÷ 0,045	0,045÷ 0,053	0,06÷0,07

Таблиця Б.18 – Потужність короткого замикання ланцюга $S_{k.i}$, МВ·А

Клас напруги обмотки, кВ	Потужність короткого замикання ланцюга, МВ·А	
	для трансформаторів класів напруги нижче 110 кВ	для трансформаторів класів напруги 110 кВ і вище
до 10 включно	500	2000
більше 10 до 35	2500	5000
110	-	15000
150	-	20000
220	-	25000

Таблиця Б.19 – Коефіцієнти для визначення найбільшого ударного струму короткого замикання

U_p/U_a	1	1,5	2	3	4	5	6	8	10	>14
$k_{\sigma\delta} \cdot \sqrt{2}$	1,51	1,63	1,75	1,95	2,09	2,19	2,28	2,38	2,46	2,55

Таблиця Б.20 – Площа ступінчастої фігури перерізу стержня $\dot{I}_{\sigma.n}$ і $\dot{I}_{\sigma.y}$ плоскої шихтованої системи

<i>d</i> , м	Стержень		Ярмо, $P_{ф.я.}$, м ²	<i>d</i> , м	стержень		Ярмо, $P_{ф.я.}$, м ²
	Число ступенів	$P_{ф.с.}$, м ²			Число ступенів	$P_{ф.с.}$, м ²	
0,08	4	0,0043	0,0045	0,28	8	0,0591	0,0591
0,09	5	0,0051	0,0052	0,29	8	0,0612	0,0623
0,09	5	0,0057	0,0058	0,30	8	0,0657	0,0657
0,10	5	0,0063	0,0064	0,31	9	0,0702	0,0716
0,10	6	0,0072	0,0073	0,32	9	0,0746	0,0762
0,11	6	0,0080	0,0080	0,33	9	0,0797	0,0820

0,11	6	0,0086	0,0090	0,34	9	0,0845	0,0861
0,12	6	0,0094	0,0095	0,35	9	0,0904	0,0928
0,12	6	0,0105	0,0107	0,36	9	0,0929	0,0948
0,13	6	0,0112	0,0115	0,37	10	0,0989	0,1004
0,13	6	0,0122	0,0125	0,38	10	0,1036	0,1063
0,14	6	0,0142	0,0144	0,39	10	0,1105	0,1124
0,15	6	0,0163	0,0166	0,40	11	0,1156	0,1168
0,16	6	0,0184	0,0188	0,42	11	0,1286	0,1315
0,17	6	0,0210	0,0216	0,45	14	0,1479	0,1500
0,18	6	0,0233	0,0238	0,48	14	0,1689	0,1719
0,19	7	0,0263	0,0267	0,50	14	0,1816	0,1844
0,20	7	0,0288	0,0296	0,53	15	0,2045	0,2078
0,21	7	0,0319	0,0327	0,56	15	0,2286	0,2317
0,22	8	0,0353	0,0361	0,60	16	0,2639	0,2691
0,23	8	0,0388	0,0394	0,63	16	0,2893	0,2958
0,21	8	0,0419	0,0426	0,67	16	0,3274	0,3398
0,25	8	0,0456	0,0463	0,71	16	0,3688	0,3798
0,26	8	0,0491	0,0507	0,75	16	0,4116	0,4252
0,27	8	0,0533	0,0543				

Примітка – Число ступенів у перерізі ярма менше числа ступенів у стержні на одну ($d = 0,080 \div 0,180$ м); дві ($d = 0,190 \div 0,390$ м); три ($d = 0,400 \div 0,600$ м); і далі на чотири-п'ять.

Таблиця Б.21 – Коефіцієнт $k_{r.о}$ для розрахунку витрат холостого ходу (для $B_c = 1,4 \div 1,7$ Тл)

Число кутів зі стиками		Коефіцієнт для різних марок сталі		
косими	прямим и	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм 3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм
6	-	1,43	1,46	1,48
2	4	1,70	1,74	1,78
-	6	1,95	2,19	2,26

Таблиця Б.22 – Питомі витрати для холоднокатаних сталей марок 3404 і 3405 при різних індукціях і частоті 50 Гц

B , Тл	Марка сталі			
	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм	3405;	3404 і 3405;

	3405; 0,35 мм		0,30 мм		В·А/м
	Вт / кг	Вт / кг	Вт / кг	Вт / кг	
1,00	0,475	0,450	0,425	345	
1,10	0,575	0,545	0,520	430	
1,20	0,675	0,635	0,610	515	
1,30	0,785	0,755	0,715	620	
1,40	0,930	0,875	0,835	730	
1,50	1,100	1,030	0,970	850	
1,52	1,134	1,070	1,004	878	
1,54	1,168	1,110	1,038	906	
1,56	1,207	1,150	1,074	934	
1,58	1,251	1,190	1,112	962	
1,60	1,295	1,230	1,150	990	
1,62	1,353	1,278	1,194	1017	
1,64	1,411	1,326	1,238	1044	
1,66	1,472	1,380	1,288	1071	
1,68	1,536	1,440	1,344	1098	
1,70	1,600	1,500	1,400	1125	
1,75	1,784	1,656	1,554	1200	
1,80	2,000	1,860	1,740	1275	

Таблиця Б.23 – Значення коефіцієнта $k_{\alpha, \beta}$ для різного числа кутів з косими і прямими стиками

Число кутів зі стиками		Індукція B , Тл			
косими	прямими	1,4	1,5	1,6	1,7
6	-	4,35	4,65	4,65	4,35
2	4	6,38	6,95	7,08	6,75
-	6	9,75	10,80	10,95	10,80

Таблиця Б.24 – Питома намагнічувальна потужність

B , Тл	Марка сталі					
	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм	3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм	3404	3405
	q_c , В·А/кг				q_z , В·А/м ²	
1,00	0,548	0,540	0,533	0,525	1000	900

1,10	0,650	0,640	0,630	0,620	2500	2300
1,20	0,752	0,742	0,732	0,722	4000	3700
1,30	0,900	0,870	0,860	0,850	7400	6000
1,40	1,060	1,040	1,020	1,000	11400	9200
1,50	1,330	1,289	1,246	1,205	16600	13800
1,52	1,408	1,360	1,311	1,263	17960	14760
1,54	1,486	1,431	1,376	1,321	19320	15720
1,56	1,575	1,511	1,447	1,383	20700	16800
1,58	1,675	1,600	1,524	1,449	22100	18000
1,60	1,775	1,688	1,602	1,525	23500	19200
1,62	1,656	1,850	1,748	1,645	25100	20480
1,64	2,131	2,012	1,894	1,775	26700	21760
1,66	2,556	2,289	2,123	1,956	28600	23160
1,68	3,028	2,681	2,435	2,188	30800	24680
1,70	3,400	3,073	2,747	2,420	33000	27000
1,75	6,370	5,660	4,950	4,238	39300	31920
1,80	11,500	10,130	8,770	7,400	48000	37000

ДОДАТОК А

Варіанти завдання на курсову роботу

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна потужність трансформатора S , кВ·А	Номинальна напруга обмотки ВН $U_{ин}$, кВ	Номинальна напруга обмотки НН $U_{ин}$, кВ	Напруга к.в., %	Струм холостого ходу, %	Витрати к.в. P_k , кВт	Витрати х.х. P_x , кВт	Матеріал обмоток	Вид перемикачів обмоток	Схема та група з'єднань
1	ТМН	400	10	0,69	4,5	2,1	5,9	0,95	Алюм.	РПН	Д/УН-11
2	ТМН	2500	110	22	10,5	1,5	22	5	Мідь	РПН	УН-Д-11
3	ТМН	1600	10	6,3	5,5	1,3	16,5	2,8	Алюм	РПН	У/Д-11
4	ТМН	6300	115	22	10,5	1	50	10	Мідь	РПН	УН/Д-11
5	ТМН	630	35	0,4	6,5	2	7,6	1,6	Алюм	РПН	У/УН-0
6	ТМН	6300	10	6,3	6,5	0,8	46,5	7,65	Алюм	РПН	У/Д-11
7	ТМН	630	35	6,3	6,5	2	7,6	1,6	Мідь	РПН	У/Д-11
8	ТМН	6300	115	11	10,5	0,8	48	10	Алюм	РПН	УН/Д-11
9	ТМН	2500	110	11	10,5	1,5	22	5,5	Алюм	РПН	УН/Д-11
10	ТМН	400	35	0,4	6,5	2,1	5,5	1,2	Алюм	РПН	У/УН-0
11	ТМН	400	35	0,69	6,5	2,1	5,9	1,2	Мідь	РПН	Д/УН-11
12	ТМН	6300	35	6,3	7,5	0,9	46,5	8	Алюм	РПН	У/Д-11
13	ТМН	630	35	11	6,5	2	7,6	1,6	Мідь	РПН	У/Д-11
14	ТМН	2500	35	0,69	6,5	1,1	25	4,35	Алюм	РПН	У/У-0
15	ТМН	1000	35	11	6,5	1,5	11,6	2,35	Мідь	РПН	У/Д-11
16	ТМН	2500	110	6,6	10,5	1,5	22	5,5	Алюм	РПН	УН/Д-11
17	ТМН	4000	35	6,3	7,5	1	33,5	5,7	Мідь	РПН	У/Д-11
18	ТМН	6300	115	38,5	10,5	1	50	10	Алюм	РПН	УН/Д-11
19	ТМН	630	10	0,4	5,5	2	7,6	1,31	Алюм	РПН	У/УН-0
20	ТМН	6300	115	6,6	10,5	0,8	48	10	Алюм	РПН	УН/Д-11
21	ТМН	6300	35	11	7,5	0,9	46,5	8	Мідь	РПН	У/Д-11
22	ТМН	1000	35	0,69	6,5	1,5	12,2	2,35	Алюм	РПН	У/У-0
23	ТМН	2500	35	11	6,5	1,1	23,5	4,35	Мідь	РПН	У/Д-11
24	ТМН	1600	10	0,69	5,5	1,3	18	2,8	Алюм	РПН	Д/У-11
25	ТМН	630	35	0,69	6,5	2	8,5	1,6	Мідь	РПН	Д/УН-11
26	ТМН	1600	35	0,69	6,5	1,4	18	3,1	Алюм	РПН	У/У-0
27	ТМН	4000	10	6,3	6,5	0,9	33,5	5,45	Алюм	РПН	У/Д-11
28	ТМН	1600	35	11	6,5	1,4	16,5	3,1	Мідь	РПН	У/Д-11
29	ТМН	10000	10	0,69	5,5	1,4	12,2	2,1	Алюм	РПН	Д/У-11
30	ТМН	2500	35	6,3	6,5	1,1	23,5	4,35	Мідь	РПН	У/Д-11

Таблиця Б.2 – Число ступенів у перерізі стержня

Потужність трансформатора, кВ•А	До 16			16	25	40-100	160-630		
Орієнтувальний діаметр стержня, м	До 0,08			0,08	0,09	0,10-0,14	0,16-0,18	0,20	0,22
Число ступенів	1	2	3	4	5	6	6	7	8
Коефіцієнт	0,636	0,786	0,851	0,861	0,890	0,91-0,92	0,913	0,918	0,928
Потужність трансформатора, кВ•А	1000-1600		2500-6300		10000	16000	25000	32000-80000	
Орієнтувальний діаметр стержня	0,24-0,26	0,28-0,30	0,32-0,30	0,36-0,38	0,40-0,42	0,45-0,50	0,53-0,56	0,60-0,67	0,71-0,75
Число ступенів	8	8	9	9	11	14	15	16	17
Коефіцієнт	0,925	0,928	0,929	0,913	0,922	0,927	0,927	0,929	0,931
Потужність трансформатора, кВ•А	100 000 – 1 000 000								
Орієнтувальний діаметр стержня	0,80-0,95		1,0-1,09	1,12-1,18		1,22	1,25-1,36	1,40-1,50	
Число ступенів	12		13	15		16	17	18	
Коефіцієнт	0,829-0,904		0,899-0,907	0,903-0,909		0,910	0,912-0,913	0,913-0,914	

Таблиця Б.12 – Межа застосування різних типів обмоток

Тип обмотки	Використання на стороні		Матеріал обмотки	Межа застосування включно				Число паралельних проводів	
	головн е	можлив е		потужність трансформатора, кВ·А	струм обмотки стержня, А	по напрузі, кВ	по перерізу мм ²	від	до
Циліндрична одно- і двошарова з проводу прямокутного перерізу	НН	ВН	Мідь	до 630	від 15÷18 до 800	до 6	від 5,04 до 250	1	4÷8
			Алюміній	до 630	від 10÷13 до 600-650	до 6	від 6,39 до 300		
Циліндрична багатошарова з проводу прямокутного перерізу	ВН	НН	Мідь	від 630 до 80000	від 15÷18 до 1000÷1200	10 і 35	від 5,04 до 400	1	4÷8
			Алюміній	від 16000÷25000	від 10÷13 до 1000÷1200	10 і 35	від 6,30 до 500		
Циліндрична багатошарова з проводу круглого перерізу	ВН	НН	Мідь	до 630	від 0,5 до 80÷100	до 35	від 1,094 до 42,44	1	4
			Алюміній	до 630	від 2÷3 до 125-135	до 35	від 1,37 до 59,24		
Безперервна котушкова з проводу прямокутного перерізу	ВН	НН	Мідь	від 160 і вище	від 15÷18 і вище	від 3 до 110÷220	від 5,04 і вище	1	3÷5
			Алюміній	від 100	від 10÷13 і вище	від 3 до 110÷220	від 6,39 і вище		
Гвинтова одно- і двошарова	НН	-	Мідь	від 100 і вище	від 300 і вище	до 35	від 75÷100 і вище	4	без обмеження

Таблиця Б.14 – Номінальні розміри перерізу і ізоляція круглого мідного та алюмінієвого обмоткового проводу марок ПБ і АПБ з товщиною ізоляції на стороні $2\delta = 0,30(0,40)$ мм

Діаметр, мм	Переріз, мм ²	Збільшення маси, %	Діаметр, мм	Переріз, мм ²	Збільшення маси, %	Діаметр, мм	Переріз, мм ²	Збільшення маси, %
Марка ПБ – мідь			2,00	3,14	3,0	4,00	12,55	1,5
1,18	1,094	6	2,012	3,53	3,0	4,10	13,2	1,5
1,25	1,23	5,5	2,24	3,94	3,0	4,25	14,2	1,5
Марка ПБ – мідь			2,36	4,375	2,5	4,50	15,9	1,5
Марка АПБ – алюміній			2,50	4,91	2,5	4,75	17,7	1,5
1,32	1,37	5,0	2,65	5,515	2,5	5,00	19,63	1,5
1,40	1,51	5,0	2,80	6,16	2,5	5,20	21,22	1,5
1,50	1,77	4,5	3,00	7,07	2,5	Марка АПБ – алюміній		
1,60	2,015	4,0	3,15	7,795	2,0	5,30	22,06	1,5
1,70	2,27	4,0	3,35	8,81	2,0	6,00	28,26	1,5
1,80	2,545	3,5	3,55	9,895	2,0	8,00	50,24	1,0
1,90	2,805	3,5	3,75	11,05	1,5			

Примітки

1 Провід марок ПБ і АПБ усіх діаметрів випускається з ізоляцією на дві сторони товщиною $2\delta = 0,30(0,40)$; $0,72(0,82)$; $0,96(1,06)$ і $1,20(1,35)$ мм; провід діаметром 2,24 мм і вище – також з ізоляцією $1,68(1,83)$ і $1,92(2,07)$, а провід діаметром від 3,75 мм і вище – також з ізоляцією $2,88(3,08)$; $4,08(4,33)$ і $5,76(6,11)$ мм.

2 Без дужки вказана номінальна товщина без ізоляції. Розміри котушок рахувати за товщиною з ізоляцією, вказаною в дужках.

3 Збільшення маси проводу за рахунок ізоляції дано для мідного проводу. Для алюмінієвого проводу марки АПБ дані таблиці щодо збільшення маси множити на 3,3.

Таблиця Б.15 – Номінальні розміри перерізу і ізоляція мідного і алюмінієвого обмоткового проводу марок ПБ і АПБ (розміри a і b – у міліметрах, перерізу – у міліметрах квадратних)

b	a	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,90	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	
3,75	5,04	-	5,79	-	6,39	-	7,14	-	8,04	-	8,83	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,25	5,74	-	6,59	-	7,29	-	8,14	-	9,16	-	10,1	-	11,4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
4,50	6,09	6,74	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0	13,6	-	-	-	-	-	-	-	-
4,75	6,44	-	7,39	-	8,19	-	9,14	-	10,3	-	11,3	-	12,8	-	14,4	-	-	-	-	-	-	-	-
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	11,5	15,2	16,2	17,2	-	-	-	-	-	-
5,30	7,21	-	8,27	-	9,18	-	10,2	-	11,5	-	12,7	-	14,3	-	16,2	-	18,3	-	-	-	-	-	-
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	-	-	-	-
6,00	8,19	-	9,39	-	10,4	-	11,6	-	13,1	-	14,5	-	16,3	-	18,4	-	20,8	-	23,1	-	-	-	-
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,3	-	-
6,70	9,17	-	10,5	-	11,7	-	13,0	-	14,7	-	16,2	-	18,2	-	20,6	-	23,2	-	25,9	-	29,3	-	-
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	-	-
7,50	10,3	-	11,8	-	13,1	-	14,6	-	16,4	-	18,2	-	20,5	-	23,1	-	26,1	-	29,1	-	32,9	-	-
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	-	-
8,50	11,7	-	13,4	-	14,9	-	16,6	-	18,7	-	20,7	-	23,3	-	26,2	-	29,6	-	33,1	-	37,4	-	-
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	-	-
9,50	13,1	-	15,0	-	16,7	-	18,6	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,4	-	33,2	-	37,1	-	41,9	-	-
10,00	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	-	-
10,60	14,6	-	16,8	-	18,7	-	20,8	-	23,4	-	26,0	-	29,1	-	32,8	-	37,1	-	41,5	-	46,8	-	-
11,20	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1	30,8	33,1	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	-	-
11,80	-	-	18,7	-	20,9	-	23,2	-	26,1	-	29,0	-	32,5	-	36,6	-	41,3	-	46,3	-	52,2	-	-
12,50	-	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	-	-
13,20	-	-	-	-	23,4	-	26,0	-	29,2	-	32,5	-	36,4	-	41,0	-	46,3	-	51,9	-	58,5	-	-
14,00	-	-	-	-	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	-	-
15,00	-	-	-	-	-	-	29,6	-	33,2	-	37,0	-	41,5	-	46,7	-	52,7	-	59,1	-	66,6	-	-
16,00	-	-	-	-	-	-	31,6	33,3	35,5	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	-	-
17,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	47,2	-	53,2	-	59,4	-	67,1	-	75,6	-
18,00	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	53,1	55,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	-

Продовження таблиці Б.15

<i>b</i>	<i>a</i>	4,75	5,00	5,30	5,60
3,75	3,75	-	-	-	-
4,00	4,00	-	-	-	-
4,25	4,25	-	-	-	-
4,50	4,50	-	-	-	-
4,75	4,75	-	-	-	-
5,00	5,00	-	-	-	-
5,30	5,30	-	-	-	-
5,60	5,60	-	-	-	-
6,00	6,00	-	-	-	-
6,30	6,30	-	-	-	-
6,70	6,70	-	-	-	-
7,10	7,10	32,9	34,6	-	-
7,50	7,50	-	36,6	-	-
8,00	8,00	37,1	39,2	41,5	43,9
8,50	8,50	-	41,6	-	46,7
9,00	9,00	41,9	44,1	46,8	49,5
9,50	9,50	-	46,6	-	52,1
10,00	10,00	46,6	49,1	52,1	55,1
10,60	10,60	-	52,1	-	58,5
11,20	11,20	52,3	55,1	58,5	61,9
11,80	11,80	-	58,1	-	65,2
12,50	12,50	58,5	61,6	65,4	69,1
13,20	13,20	-	65,1	-	73,1
14,00	14,00	65,6	69,1	73,3	77,5
15,00	15,00	-	74,1	-	83,1
16,00	16,00	75,1	79,1	83,9	88,7
17,00	17,00	-	84,1	-	94,3
18,00	18,00	84,6	89,1	94,5	99,9

Примітки

1 Мідний провід марки ПБ – усі розміри таблиці, за винятком проводів з розміром b 17 і 18 мм.

2 Алюмінієвий провід марки АПБ – усі розміри таблиці праворуч та вгору від потовщеної лінії.

3 Провід марок ПБ і АПБ випускається з товщиною ізоляції на дві сторони $2\delta = 0,45(0,50); 0,55(0,62); 0,72(0,82); 0,96(1,06); 1,20(1,35); 1,35(1,50); 1,68(1,83)$ і $1,92(2,07)$ мм.

4 Без дужок вказана номінальна товщина без ізоляції. Розміри катушок урахувати за товщиною ізоляції, вказаною у дужках.

5. Мідний провід марки ПБУ випускається за розмірами дроту по стороні a від 1,8 до 5,6 і по стороні b від 6,7 до 18 мм з ізоляцією товщиною $2\delta = 1,35(1,45), 2,00(2,20), 2,48(2,63), 2,96(3,16), 3,60(3,80), 4,08(4,28)$ і $4,40(4,65)$ мм.