

**УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

МЕХАНІКО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ

Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання курсової роботи

з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Харків - 2023

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки 28 березня 2023 р., протокол № 7.

Методичні вказівки призначено для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітньої програми «Електропостачання та ресурсозберігаючі технології») денної та заочної форм навчання.

Укладачі:

професори О. М. Ананьєва,

М. М. Бабаєв,

доц. Н. П. Карпенко

Рецензент

доц. В. П. Нерубацький

ЗМІСТ

Вступ	4
1 Розрахунок основних електричних величин трансформатора	10
2 Визначення основних розмірів трансформатора	13
3 Розрахунок обмоток ВН і НН	19
3.1 Розрахунок обмоток НН	22
3.2 Розрахунок обмоток ВН	23
4 Розрахунок параметрів КЗ	26
4.1 Визначення втрат КЗ	26
4.2 Розрахунок напруги короткого замикання	30
4.3 Визначення струму короткого замикання і механічних сил в обмотках трансформатора	31
5 Розрахунок магнітної системи трансформатора	33
5.1 Розрахунок втрат ХХ	35
5.2 Розрахунок струму ХХ	37
6 Тепловий розрахунок трансформатора	38
6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом	38
6.2 Вибір і розрахунок системи охолодження	41
6.3 Розрахунок поверхні охолодження	45
6.3.1 Розрахунок поверхні охолодження баку з гładкими стінами	45
6.3.2 Розрахунок поверхні охолодження бака з трубами	45
6.3.3 Розрахунок поверхні охолодження бака з навісними радіаторами	47
6.4 Визначення фактичних перегрівів	49
Питання до захисту курсової роботи	51
Список літератури	52
Додаток А Варіанти завдання на курсову роботу	53
Додаток Б Довідникові дані до виконання курсової роботи	54

ВСТУП

Курсова робота є частиною дисципліни «Електричні машини» і дає змогу отримати знання та вміння щодо принципів проєктування та побудови силових трифазних масляних трансформаторів.

Силові трифазні трансформатори (ТР) є одними з ключових компонентів багатьох електричних приладів і механізмів. Вони широко застосовуються у системах енергопостачання, а також у різних випрямних та підсилювальних пристроях (рисунок 1).



Силовий автотрансформатор



Силовий трансформатор

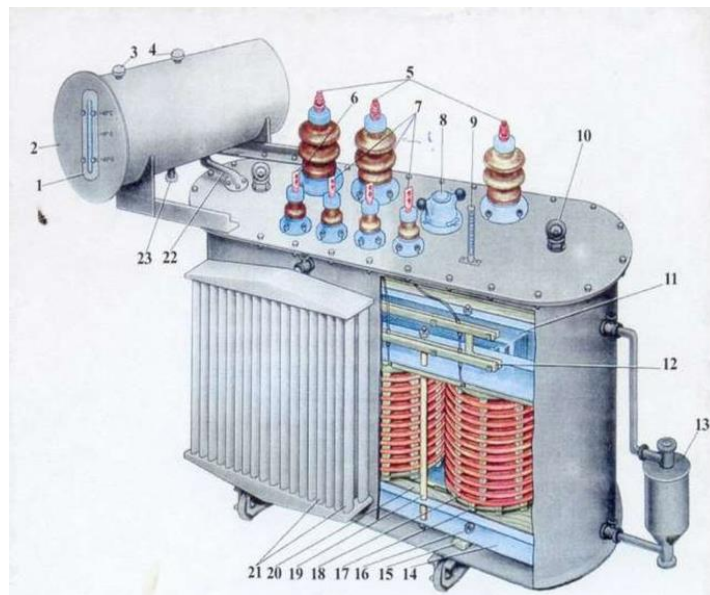
Рисунок 1 – Силові трифазні масляні трансформатори

Призначення силових ТР полягає у перетворенні електроенергії в електричних мережах та установках, але вони також можуть виконувати функцію перетворювачів частоти, змінювати фазу й кількість фаз питомої напруги (рисунок 2).

Метою курсової роботи є розрахунок силового масляного трансформатора (рисунок 3).



Рисунок 2 – Фазоповоротні (фазозрушуючі) трансформатори



1 – мастиловказівник; 2 – розширювач; 3 – дихальна пробка; 4 – мастилозаливна пробка; 5 – введення ВН; 6 – нульове введення НН; 7 – введення НН; 8 – перемикач ступеню регулювання напруги; 9 – ртутний термометр; 10 – кільце для піднімання кришки; 11 – магнітопровід; 12 – букові планки; 13 – термосифонний фільтр; 14 – ярмова балка; 15 – дерев'яна підкладка; 16 – горизонтальна пресувальна шпилька; 17 – ярмова ізоляція; 18 – обмотка ВН; 19 – вертикальна стяжна шпилька; 20 – зрівняльна ізоляція; 21 – циркуляційна труба радіатора; 22 – патрубок, що з'єднує розширювач з баком; 23 – брудовідстійник

Рисунок 3 – Конструкція силового ТР

З'єднання обмоток ТР

Початки фаз обмоток ВН позначені прописними латинськими літерами *A, B, C*; кінці фаз цих обмоток – *X, Y* і *Z*. Якщо обмотка ВН має виведену нульову точку, то цей затискач позначають *0*.

Початки фаз обмоток НН позначаються рядковими латинськими буквами *a, b, c*, кінці фаз – *x, y, z*, виведення нульової точки – *0*. Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані в зірку, коли кінці всіх трьох фаз з'єднані між собою, утворюючи загальну нейтральну (нульову) точку, а вільні початки трьох фаз підключені до трьох проводів мережі джерела або приймача електричної енергії змінного струму (рисунок 4, а).

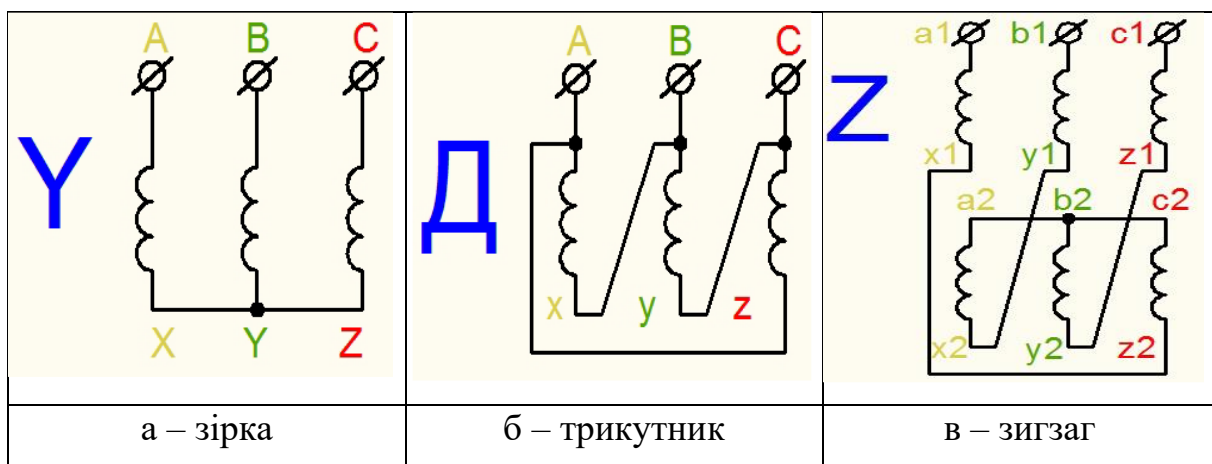


Рисунок 4 – Позначення обмоток ТР

При з'єднанні обмоток у трикутник початок першої фази з'єднується з кінцем другої, початок другої фази – кінцем третьої, початок третьої фази – кінцем першої. Точки з'єднання початку однієї фази з кінцем іншої підключені до проводів трифазної мережі змінного струму (рисунок 4, б).

З'єднання в зигзаг використовується у випадку, якщо на вторинних навантаженнях нерівномірне навантаження. Після з'єднання в зигзаг навантаження розподіляється більш рівномірно по фазах і магнітний потік

трансформатора зберігає рівновагу, незважаючи на нерівномірне навантаження. При з'єднанні в зигзаг-зірку буде потрібна більша кількість витків, ніж при простій зірці (рисунок 4, в).

Маркування ТР

Кожний трансформатор забезпечений щитком з матеріалу, що не піддається атмосферним впливам. Щиток прикріплений до боку трансформатора на видному місці й містить його номінальні дані, які нанесені травленням, гравіруванням, вибиванням або іншим способом, що забезпечують довговічність знаків.

Умовна позначка ТР складається з буквеної й цифрової частин. Букви означають: Т – трифазний, ПРО – однофазний, М – природне масляне охолодження, Д – масляне охолодження з дуттям (штучне повітряне й із природньою циркуляцією масла), Ц – масляне охолодження із примусовою циркуляцією масла через водяний охолоджувач, ДЦ – масляне з дуттям і примусовою циркуляцією масла, Г – грозоупорний трансформатор, Н – наприкінці позначення – трансформатор з регулюванням напруги під навантаженням, Н – на другому місці – заповнений негорючим рідким діелектриком, Т на третьому місці – триобмотковий трансформатор.

Перше число, що знаходиться після літерного позначення трансформатора, показує номінальну потужність (кВА), друге число – номінальна напруга обмотки ВН (кВА). Так, тип ТМ 6300/35 означає трифазний двообмотковий трансформатор з природним масляним охолодженням потужністю 6300 кВА та напругою обмотки ВН 35 кВА; тип ТЦТНГ-6300/220 означає трифазний триобмотковий трансформатор з примусовою циркуляцією масла при масло-водяному охолодженні, з регулюванням напруги під навантаженням, грозоупорний, потужністю 63000 кВА та напругою обмотки ВН 220 кВ.

Буква А в позначенні типу трансформатора означає автотрансформатор. У позначенні триобмоткових автотрансформаторів букву А ставлять або першою, або останньою. Якщо автотрансформаторна схема є основною (обмотки ВН і СН утворюють автотрансформатор, а обмотка НН додаткова), букву А ставлять першою, якщо трансформаторна схема є додатковою, букву А ставлять останньою.

У конструкції трансформатора має бути передбачена панель, до якої припаюються виводи обмоток. Корпус трансформатора (накладки, обойми, скоби) електрично з'єднується з магнітопроводом і заземлюється. Цей захід необхідний з міркувань техніки безпеки на випадок пробою однієї з обмоток.

Теоретичні матеріали з розділів електричних машин, які рекомендовано використовувати при виконанні розрахунків, наведено в роботах [3–5].

Вимоги до виконання курсової роботи

Здобувачам пропонується провести розрахунок ТР, характеристики якого мають задовольняти вимоги ДСТУ 2105-92 (ГОСТ 11920-93) [6].

Як об'єкти для розрахунків можуть бути рекомендовані силові трифазні масляні трансформатори з плоскою магнітною системою стержньового типу та вертикально розташованими стержнями, що мають поперечний переріз у вигляді ступінчатої фігури, вписаної в коло, і з обмотками у вигляді кругових циліндрів. Вихідні дані, необхідні для розрахунку, здобувач відповідно до свого варіанту обирає з додатку А цих методичних вказівок. Усі трансформатори розраховуються на промислову частоту $f=50$ Гц та тривалий режим роботи.

У результаті розрахунку необхідно:

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

Наведений перелік розділів є загальним і має бути уточненим для кожної окремої теми. Обсяг пояснювальної записки має становити 20-30 аркушів. Розрахункова частина має складати не менше 30 % загального обсягу. Після останнього розділу пояснювальної записки, яким зазвичай є розділ «Перелік використаних джерел», наводяться додатки.

Курсова робота має складатися з пояснювальної записки та графіків до неї, оформлених з урахуванням вимог ЄСКД. Виконувати роботу належить на стандартних аркушах паперу формату А4(210X297 мм), які потім зшиваються. На титульному аркуші треба вказати кафедру, дисципліну, назву роботи, шифр (три останні цифри номера залікової книжки, далі крапка і номер за списком групи), а також прізвище здобувача та викладача. Розділи та підрозділи мають бути пронумеровані. Записка пишеться з одного боку кожного аркуша. З правого боку аркуша залишаються поля завширшки 10–15 мм, з лівого – 20 мм.

На початку записки вказують назву курсової роботи, номер варіанта і записують усі вихідні дані. У «Вступі» треба вказати завдання, об'єкт та предмет дослідження, мету роботи та її актуальність. Розрахунки курсової роботи супроводжуються поясненнями. Розрахункові формули наводяться в загальному вигляді з використанням літерних позначень, після чого у формулі вказується чисельне значення величин, що в ній містяться, і потім – результат.

За результатами виконаної курсової роботи передбачається її захист.

Усі розрахунки в курсовій роботі виконуються згідно з відомою методикою проектування силових трифазних масляних трансформаторів, що наведена у навчальних посібниках [1, 2, 7].

1 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТРАНСФОРМАТОРА

Для знаходження основних електричних величин трансформатора необхідно визначити: потужність на одну фазу і стержень, номінальні струми на стороні ВН і НН, фазні струми і напруги, складові напруги короткого замикання та випробувальну напругу обмоток [1, 6].

Потужність однієї фази

$$S_{\phi} = \frac{S_H}{m}, \text{ кВА}. \quad (1.1)$$

Потужність на один стержень

$$S' = \frac{S_H}{n_c}, \text{ кВА}, \quad (1.2)$$

де n_c – кількість активних стержнів трансформатора.

$$m = n_c = 3. \quad (1.3)$$

Фазна напруга ВН:

з'єднання у зірку

$$U_{1\phi} = \frac{U_1}{\sqrt{3}}, B; \quad (1.4)$$

з'єднання у трикутник

$$U_{1\phi} = U_1, B. \quad (1.5)$$

Фазна напруга НН:

з'єднання у зірку

$$U_{2\phi} = \frac{U_2}{\sqrt{3}}, B; \quad (1.6)$$

з'єднання у трикутник

$$U_{2\phi} = U_2, B. \quad (1.7)$$

Номінальний струм обмоток ВН:

$$I_1 = \frac{S_H * 10^3}{\sqrt{3} * U_1}, A. \quad (1.8)$$

Номінальний струм обмоток НН:

$$I_2 = \frac{S_H * 10^3}{\sqrt{3} * U_2}, A. \quad (1.9)$$

Номінальний фазний струм обмоток ВН:
з'єднання у зірку

$$I_{1\phi} = I_1, A; \quad (1.10)$$

з'єднання у трикутник

$$I_{1\phi} = \frac{I_1}{\sqrt{3}}, A. \quad (1.11)$$

Номінальний фазний струм обмоток НН:
з'єднання у зірку

$$I_{2\phi} = I_2, A, \quad (1.12)$$

з'єднання у трикутник

$$I_{2\phi} = \frac{I_2}{\sqrt{3}}, A. \quad (1.13)$$

Випробувальна напруга обмоток:

для обмотки ВН – $U_{1\text{випр}}$, кВ;

для обмотки НН – $U_{2\text{випр}}$, кВ;

Випробувальна напруга вибирається за таблицею Б.1 додатку Б.

Активна і реактивна складові напруги КЗ, %:

$$U_A = \frac{r_K * I_H}{U_H} * 100 = \frac{P_K}{10 * S_H} \% ; \quad (1.14)$$

$$U_P = \sqrt{U_K^2 - U_A^2} \% , \quad (1.15)$$

де P_K – втрати короткого замикання, кВт,

S_H – номінальна потужність трансформатора, кВА.

U_K – напруга короткого замикання, %.

2 ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ ТРАНСФОРМАТОРА

Основні розміри трансформатора включають діаметр стержня магнітної системи (позначений як d), висоту обмотки (позначена як l) і діаметр осьового каналу між обмотками. Діаметр осьового каналу зазвичай приблизно дорівнює середньому діаметру витка двох обмоток (рисунк 5).

Діаметр стержня, м,

$$d = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{cm} \cdot \beta \cdot a_p \cdot k_p}{f \cdot U_p \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}} , \quad (2.1)$$

де S_{cm} – потужність одного стержня, кВА;

f – частота мережі;

U_p – реактивна складова напруги КЗ;

a_p – приведена ширина каналу розсіювання;

k_p – коефіцієнт Роговського, $k_p \approx 0,95$);

B_c – індукція в стержні;

k_c – коефіцієнт заповнення сталлю $k_c = k k_p \cdot k_z$;

β – визначає відношення між діаметром та висотою обмотки.

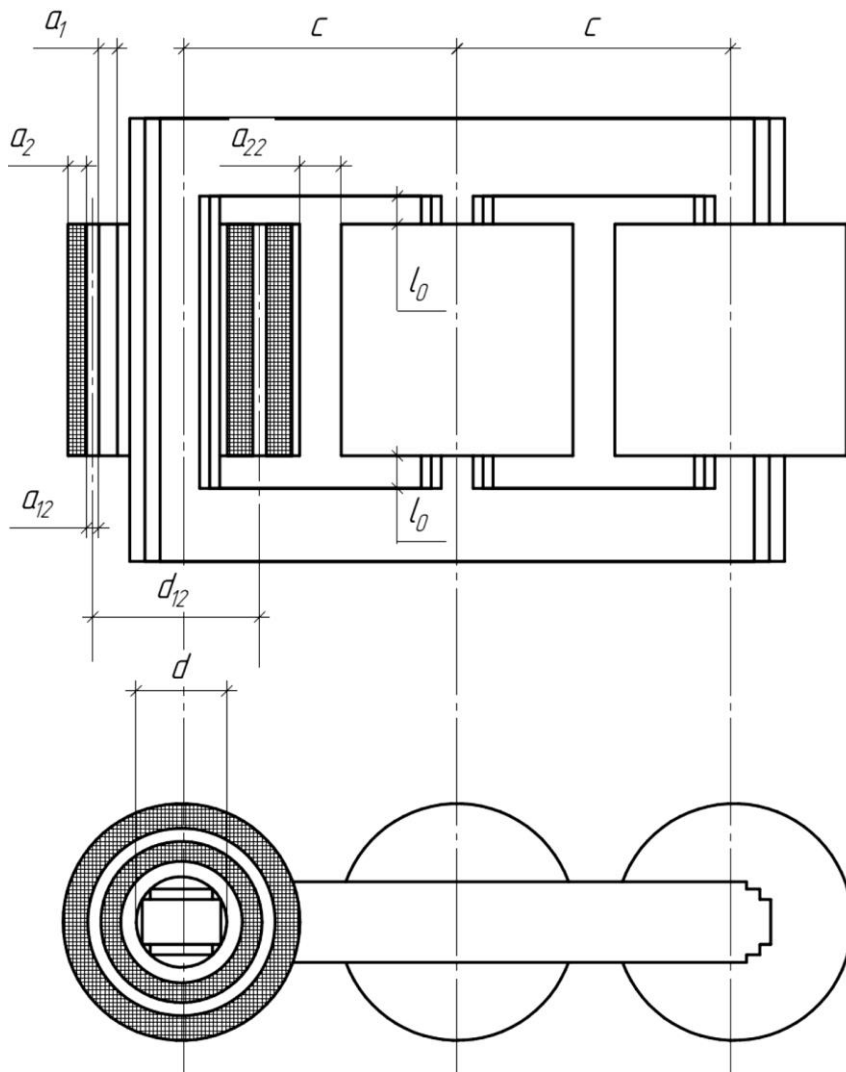


Рисунок 5 – Основні розміри трансформатора

Кількість ступенів у перерізі стержня і коефіцієнт доповнення площі кола площею ступінчатої фігури обираються за таблицею Б.2 додатку Б.

$$k_{кр} = \frac{\Pi_{ф.с.} \cdot 4}{\pi \cdot d^2} \quad (2.2)$$

Охолоджуючі канали в перерізі стержня трансформатора – повздовжні відносно 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 – багатоступінчастий з числом ступенів на 1÷2 менше числа ступенів стержня. Коефіцієнт збільшення площини перерізу ярма відносно перерізу стержня – 1,01÷1,03.

Вибір марки сталі та значення індукції – у таблиці Б.3 додатку Б.

Коефіцієнт заповнення, тобто відношення активного перерізу сталі до площини ступінчатої фігури стержня або ярма для різних видів ізоляції пластин наведені в таблиці Б.4 додатку Б.

Коефіцієнт заповнення сталлю ϵ відношення активного перерізу стержня до площі кола з діаметром, що дорівнює діаметру стержня трансформатора.

Меншим значенням β 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 β (таблиця Б.5 додатку Б) 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 β призводить до зростання маси сталі, витрат 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.

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} – у таблиці Б.6 додатку Б.

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

де k – у таблиці Б.7 додатку Б.

За діаметром стержня, знайденим за формулою (2.1), 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_n уточнюємо значення β :

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

Активний переріз стержня, м²,

$$P_c = k_{kp} \cdot k_3 \cdot \frac{\pi \cdot d_n^2}{4}. \quad (2.7)$$

Електрорушійна сила одного витка приблизно дорівнює напрузі, В:

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

Середній діаметр основного каналу, м:

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

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

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

де k – для трансформаторів потужністю 25÷630 кВА;

k – для трансформаторів 1000÷6300 кВА з напругою на обмотці ВН 35 кВ; для всіх трансформаторів з напругою на обмотці ВН 110 кВ, $k = 1.05 - 1.1$.

Висота обмотки, м,

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

Ізоляція обмоток трансформатора поділяється на дві частини: головну, яка ізолює кожну обмотку від остова і від інших обмоток, і повздовжню, яка забезпечує ізоляцію між різними точками в межах однієї обмотки. Для масляних трансформаторів з напругою до 35 кВ включно вибір ізоляційних відстаней та конструкції головної ізоляції здійснюється згідно з таблицями Б.6 та Б.8 додатку Б відповідно до рисунка 6.

На рисунку 7 представлена структура і основні розміри головної ізоляції обмоток ТР.

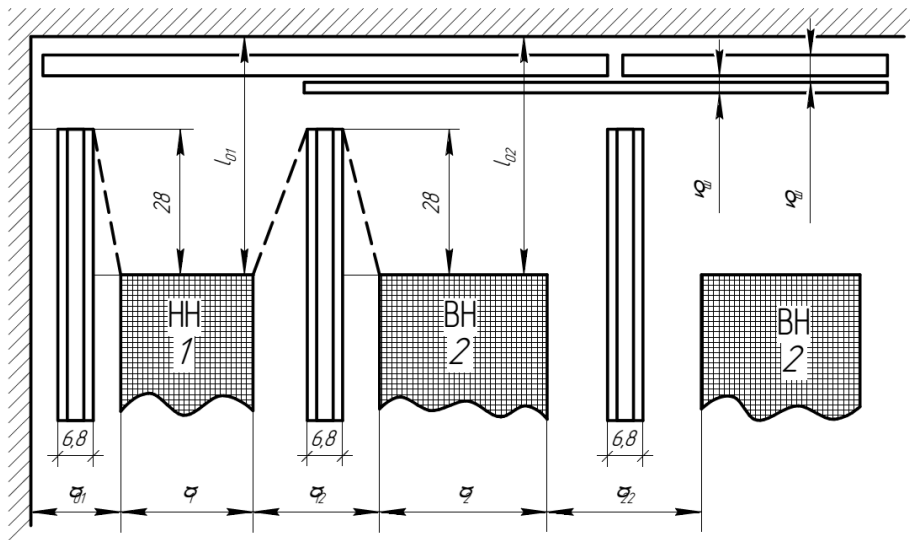


Рисунок 6 – Головна ізоляція обмоток ТР

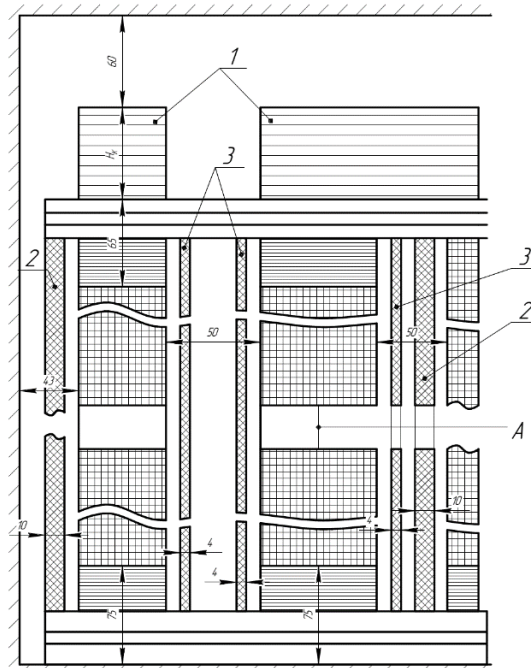


Рисунок 7 – Головна ізоляція обмотки ВН

Вибір ізоляції (таблиці Б.9 додатку Б, та Б.10 додатку Б).

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

Розміри горизонтальних каналів – у таблиці Б.11 додатку Б.

3 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК ВН І НН

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 в стержні, Тл.

Значення кількості витків округляється до цілого числа. Напруга одного витка, В,

$$U_{\epsilon} = \frac{U_{\phi}}{\omega}. \quad (3.2)$$

Середня густина струму:

- для мідного проводу

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

- для алюмінієвого

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

де k – у таблиці Б.13 додатку Б;

- переріз витка, мм²,

$$P'_e = \frac{I}{10^{-6} \cdot J}. \quad (3.5)$$

Підбирається переріз, число та розміри паралельних проводів для обмоток НН і ВН (таблиці Б.14 і Б.15 додатку Б) та визначається справжня густина струму, МА/мм²

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

де $P_e = P'_e \cdot 10^{-6}$.

Підібрані проводи

$$n_e \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'}, P_e,$$

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

a' і b' – з ізоляцією;

n_e – кількість паралельних проводів витка;

P_e – переріз одного проводу.

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

Розміри проводів, відстані між охолоджуючими каналами по проводах без ізоляції і ширину каналів необхідно вибирати так, щоб теплове навантаження (втрати на одиницю поверхні охолодження) не перевищували допустимого значення за умовами нагріву. Для масляних трансформаторів звичайно величина, Вт/м².

Маса металу, кг, кожної обмотки:

- для мідних обмоток

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

- для алюмінієвих обмоток

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

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

ω – кількість витків;

D_{cp} – середній діаметр витка, м;

P_g – 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 $l_{відв,} = 7.5 l_m$ – з'єднання обмоток у зірку;

$l_{відв,} = 14 l_m$, – з'єднання обмоток у трикутник;

$П_{відв} = П_в, м^2$.

3.1 Розрахунок обмоток НН

Циліндрична обмотка з прямокутного проводу застосовується переважно у трансформаторах потужністю не більше 630 кВА, виконується в два шари, з'єднані послідовно. Кількість 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 кВА і вище при струмі не менше 300 А (при алюмінієвих обмотках – від 100 кВА і вище при струмі не менше 150÷200 А). Верхня границя по потужності та струму не обмежується. Мінімальна кількість 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 багатоходової 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 на 4÷6 % менше розрахункової висоти завдяки усадці між котушкових прокладок після сушення.

3.2 Розрахунок обмоток ВН

У масляних трансформаторах потужністю 25÷200000 кВА 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.

Кількість витків в обмотці ВН:

- верхні ступені напруги

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

- середня ступінь напруги

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

- нижні ступені напруги

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

У трансформаторах з РПН необхідно передбачати зміну кількості витків обмотки ВН (таблиця Б.16 додатку Б).

Перемикання відгалужень створюється перемиканням з виведеними з бака рукоятками управління при вимиканні усіх обмоток трансформатора від мережі. Кількість котушок (за винятком багат шарової циліндричної обмотки) вибирається так, щоб:

- кількість котушок була парною;

- 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 кількості витків обмотки ВН в межах, визначених у таблиці Б.16 додатку Б.

Кількість витків на одному ступені регулювання:

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

де $\omega_{2ном}$ – кількість витків обмотки ВН при номінальній напрузі;

$\Delta U_{ст}^*$ – відносне значення напруги на одному ступені регулювання.

Кількість 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} – кількість ступенів регулювання.

Найбільшого розповсюдження набули такі 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 кВА (з міркувань механічної

міцності), при класі ізоляції не вище 35 кВ. Кількість паралельних проводів (однакового перерізу) – не більше двох, транспозиція не застосовується.

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

При напрузі 35 кВ обмотка обладнується екраном.

2 Безперервна котушкова обмотка має високу механічну і електричну міцність, застосовується здебільшого на стороні ВН при потужності трансформатора на один стержень більш ніж 100 кВА 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. Кількість 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 в 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 Багатошарова циліндрична обмотка з прямокутного проводу застосовується як обмотка ВН, інколи НН в трансформаторах потужністю від 1000 до 63000÷80000 кВА для мідних і до 16000÷25000 кВА для алюмінієвих обмоток. Кількість паралельних проводів – до 4÷8, усі проводи мають однаковий переріз, намотка тільки пліском; шари з'єднуються послідовно, охолодження здійснюється 1÷4 – осьовими масляними каналами.

4 РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ КЗ

4.1 Визначення втрат КЗ

Втрати короткого замикання складаються:

- з основних втрат в обмотках ВН і НН;
- додаткових втрат в обмотках, спричинених полем розсіювання;
- основних втрат у відгалуженнях між обмотками і вводами;
- додаткових втрат у відгалуженнях, спричинених полем розсіювання відгалужень;
- втрат у стінках бака та інших металевих конструкціях, спричинених полем розсіювання обмоток і відгалужень.

Не слід допускати відхилення розрахункових втрат короткого замикання від заданих більш ніж + 5%.

За умовами нагріву обмоток НН та ВН отримані значення мають перебувати в межах 1000-1200 Вт/м².

Граничні значення втрат не мають перевищувати 1300-1500 Вт/м², якщо щільність теплового потоку якоїсь обмотки вище цих значень, необхідно знизити її, збільшивши поверхню охолодження.

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

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

$$P_{\partial 2} = k_{\partial 2} - 1 \cdot P_{осн2}. \quad (4.4)$$

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

Для мідних обмоток:

- прямокутний провід

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

- круглий провід

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

Для алюмінієвих обмоток:

- прямокутний провід

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

- 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.

У силових трансформаторах втрати у відводах становлять не більше 5-8 % втрат короткого замикання.

Втрати в бакові і металевих конструкціях, Вт,

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

де k – вибираємо за таблицею Б.17 додатку Б.

S – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Втрати КЗ

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

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

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

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):

$$\Pi_o = \Pi_{від} \cdot k_3, \quad (4.16)$$

де $k_3 = 0,75$.

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

4.2 Розрахунок напруги КЗ

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

Реактивна складова напруги короткого замикання, %,

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

де k_q – коефіцієнт, що 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, кВА.

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

4.3 Визначення струму КЗ і механічних сил в обмотках трансформатора

Усталений струм КЗ для трансформатора потужністю менше $I_k = 1000$ кВА

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

де I_n – номінальний струм фази обмотки, А.

I_k має бути не більше $25 I_n$. Для трансформаторів потужністю від 1000 кВА і більше при визначенні усталеного струму короткого замикання враховується потужність короткого замикання системи постачальної мережі

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

де $U_{k.m} = 100 S/S_{k.m}$;

S – номінальна потужність трансформатора, МВ·А;

$S_{k.m}$ – потужність КЗ мережі, МВ·А (таблиця Б.18 додатку Б).

Найбільш ударний струм короткого замикання, А, визначається за формулою

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

де $k_{y\delta} \sqrt{2}$ у таблиці Б.19 додатку Б.2.

Радіальна механічна сила, що діє на одну обмотку, Н,

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

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. За відсутності цих заходів, середня стискаюча напруга в проводах цієї обмотки

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

де F_p – радіальна механічна сила, Н;

ω – кількість витків обмотки;

P_g – переріз витка, м².

Стискаюча напруга не має бути більше 30 МПа у мідних та 15 МПа в алюмінієвих обмотках.

При рівномірному розподілі по висоті обмотки обтічним струмом витків обох обмоток з'являються 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

Діаметри стержня магнітної системи трансформатора нормалізовані у таблиці Б.20 додатку Б.

Активний переріз стержня, м²,

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\phi.c} \cdot \quad (5.1)$$

Активний переріз ярма, м²,

$$\Pi_{\text{я}} = k_3 \cdot \Pi_{\phi.\text{я}}, \quad (5.2)$$

де k_3 у таблиці Б.4 додатку Б.

Індукція у стержні, Тл,

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

Індукція у ярмі, Тл,

$$B_{\text{я}} = \frac{U_{\text{с}}}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_{\text{я}}} \cdot \quad (5.4)$$

Маса сталі в стержнях і ярмі при багатоступінчастій нормалізованій формі поперечного перерізу стержня і ярма, кг,

$$G_{cm} = G_c + G_{я}. \quad (5.5)$$

Маса сталі в стержнях, кг,

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

де c – кількість 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 (рисунок 8);

$G''_{я}$ – маса сталі двох ярм в їхніх частинах, заштрихованих на рисунку 8.

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

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

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.

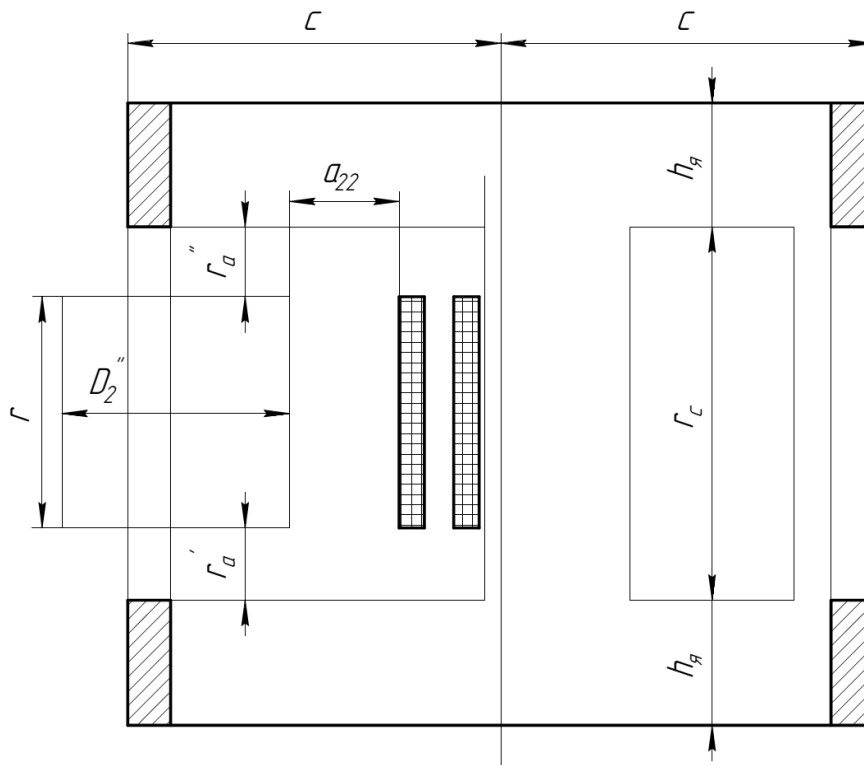


Рисунок 8 – Розміри плоскої магнітної системи

5.1 Розрахунок втрат ХХ

$$P_x = k_{нд} \cdot p_c \cdot G_c + p_{я} \cdot G'_я - 4 \cdot G_k + 3 \cdot k_{н.у} \cdot p_c + p_{я} \cdot G_k, \quad (5.11)$$

де $k_{н.у}$ – обираємо за таблицю Б.21 додатку Б;

p_c і $p_{я}$ – питомі витрати (таблиця Б.22 додатку Б);

$k_{нд}$ – 1,15 при потужності трансформатора до 6300 кВА і 1,20 при більших потужностях.

Намагнічувальна потужність при холостому ході

$$Q_x = k'_{м.д} \cdot q_c \cdot G_c + q_{я} \cdot G'_я - 4 \cdot G_k + 3 \cdot k_{м.у} \cdot k_{м.пл} q_c + q_{я} \cdot G_k + k''_{м.д} \cdot Q_3, \quad (5.12)$$

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

$k'_{m.y}$ – обирається за таблицею Б.23 додатку Б;

$k'_{m.nl} = 1,35$ і $1,20$ відповідно при потужностях до 6300 кВА і більших;

$k''_{m.\delta} = 1,07$ і $1,15$ відповідно при потужностях до 6300 кВА і більших;

Q_3 – намагнічувальна потужність для немагнітних шихтованих зазорів, що визначається як

$$Q_3 = \sum n_3 \cdot q_3 \cdot P_3, \quad (5.13)$$

де n_3 – кількість зазорів кожного розміру;

q_3 – питома намагнічувальна потужність на 1 м^2 зазору;

P_3 – площа кожного зазору, м^2 .

Для косоного стику $P_3 = \sqrt{2} \cdot P_c$; для прямого – $P_3 = P_c$.

Індукція B_3 на косому стику $B_{31} = \frac{B_c}{\sqrt{2}}$; на прямому – $B_{32} = B_c$.

Значення питомої намагнічувальної потужності для зазорів q_{31} і q_{32} знаходять для індукцій B_{31} і B_{32} за таблицею Б.24 додатку Б.

Для трифазної магнітної системи:

- якщо шість косих стиків

$$Q_3 = 8,45 \cdot q_{31} \cdot P_3; \quad (5.14)$$

- якщо чотири косих і три прямих стики

$$Q_3 = 5,65 \cdot q_{31} + 3 \cdot q_{32} \cdot P_3; \quad (5.15)$$

- якщо сім прямих стиків

$$Q_3 = 7,05 \cdot q_{32} \cdot \Pi_3. \quad (5.16)$$

5.2 Розрахунок струму ХХ

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 до номінального струму трансформатора i_0 , i_{0a} , i_{0p} , визначаючи його у відсотках номінального струму.

Відносне значення струму ХХ, % номінального струму,

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

де Q_x – намагнічувальна потужність, Вт;

S – номінальна потужність, кВА.

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 відрізнятись від заданих не більше ніж на 15 %.

6 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом

У номінальному режимі навантаження температура обмоток і масла не мають перевищувати допустимих значень. Найбільш нагріті точки в трансформаторі – провідники обмоток. У процесі передачі теплоти від провідників до масла температура (перепад) між обмоткою і маслом θ_{o-m} знижується. Потім теплота від масла передається стінкам бака, внаслідок чого виникає перепад температур між маслом і баком θ_{m-b} , а від бака теплота передається в навколишнє середовище, що визначає перепад температур між баком і повітрям θ_{b-n} .

Для ізоляції трансформаторів максимально допустимий перепад температури обмоток над навколишнім середовищем $\theta_{(o-n)дон} = 65$ °С, а масла в верхніх шарах над повітрям $\theta_{(m-n)дон} = 60$ °С. За відомих втрат в обмотці, її розмірів і виду ізоляції проводу, можна розрахувати перепад температур θ_{o-m} ; перепад θ_{m-b} змінюється в дуже вузьких межах для різних трансформаторів і його значення становить 5...6 °С. Допустиме перевищення температури бака над повітрям дає змогу визначити потрібну площу поверхні охолодження трансформатора, тобто вирішити задачу теплового розрахунку [1].

Цей перепад складається з перепаду всередині самої обмотки, тобто між точками, розташованими в центрі її перерізу і зовнішньою поверхнею θ_o , та між зовнішньою поверхнею обмотки і маслом $\theta_{ном}$.

$$\theta_{б-п} = \theta_{(о-п)дон} - \theta_{о-м} - \theta_{м-б}. \quad (6.1)$$

Для обмоток із прямокутного проводу, °С,

$$Q_0 = \frac{q\delta}{\lambda_{із}} 10^{-4}, \quad (6.2)$$

де q – дійсна густина теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м²;

δ – одностороння товщина ізоляції проводу, $\delta = 0,25$ мм;

$\lambda_{із}$ – теплопровідність ізоляції проводу; для проводу марок ПБ і АПБ $\lambda_{із} = 0,0017$ Вт/(см·°С).

Для обмотки з круглого проводу (багат шарова циліндрична обмотка) розрахунок проводиться в кілька етапів.

Відносна товщина ізоляції проводу

$$\alpha = \frac{d'_{np} - d_{np}}{d_{np}}. \quad (6.3)$$

Відносна теплопровідність ізоляції

$$\lambda = \frac{\lambda_{із}}{0,7 \cdot \sqrt{\alpha}}. \quad (6.4)$$

Середня теплопровідність обмотки, Вт/(см·°С),

$$\lambda_{cp} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{iz} \cdot (d'_{np} + \delta_{ми})}{(\lambda \cdot \delta_{ми} + \lambda_{iz} \cdot d'_{np})}. \quad (6.5)$$

Питомі об'ємні втрати потужності в обмотці, Вт/см³,

$$p = C_p \cdot \frac{\Delta^2 \cdot d_{np}^2}{(d'_{np} + \delta_{ми}) \cdot d'_{np}} \cdot 10^{-2}, \quad (6.6)$$

де C_p – питома теплоємність металу обмотки, кг·Дж/°С ($C_p = 1,68$ для міді і $C_p = 2,71$ для алюмінію).

Перепад температури за масою обмотки з круглого проводу

$$\theta_o = p \cdot \frac{a_{2H}^2}{8 \cdot \lambda_{cp}}, \quad (6.7)$$

де a_{2H} – радіальний розмір зовнішньої котушки обмотки ВН (для обмотки НН підставляти a_{1H});

середній перепад всередині всієї обмотки

$$\theta_{ocp} = \frac{2}{3} \cdot \theta_o. \quad (6.8)$$

Перепад температури між поверхнею обмотки і маслом, °С:

– для двошарової і багатшарової циліндричних обмоток

$$\theta_{no-m} = 0,285 \cdot q^{0,6}; \quad (6.9)$$

– для гвинтової і неперервної обмоток

$$\theta_{\text{но-м}} = 0,35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q^{0,6}, \quad (6.10)$$

де $k_1 = 1,0$ – для природного масляного охолодження, $k_1 = 0,9$ – для масляного охолодження з дуттям (в трансформаторах $S_n \geq 10000$ кВА);

$k_2 = 1,0$ – для зовнішніх обмоток і $k_2 = 1,1$ – для внутрішніх обмоток;

k_3 – коефіцієнт, що враховує відношення висоти каналу між котушками до радіального розміру обмотки (таблиця 1).

Таблиця 1 – Значення коефіцієнту k_3

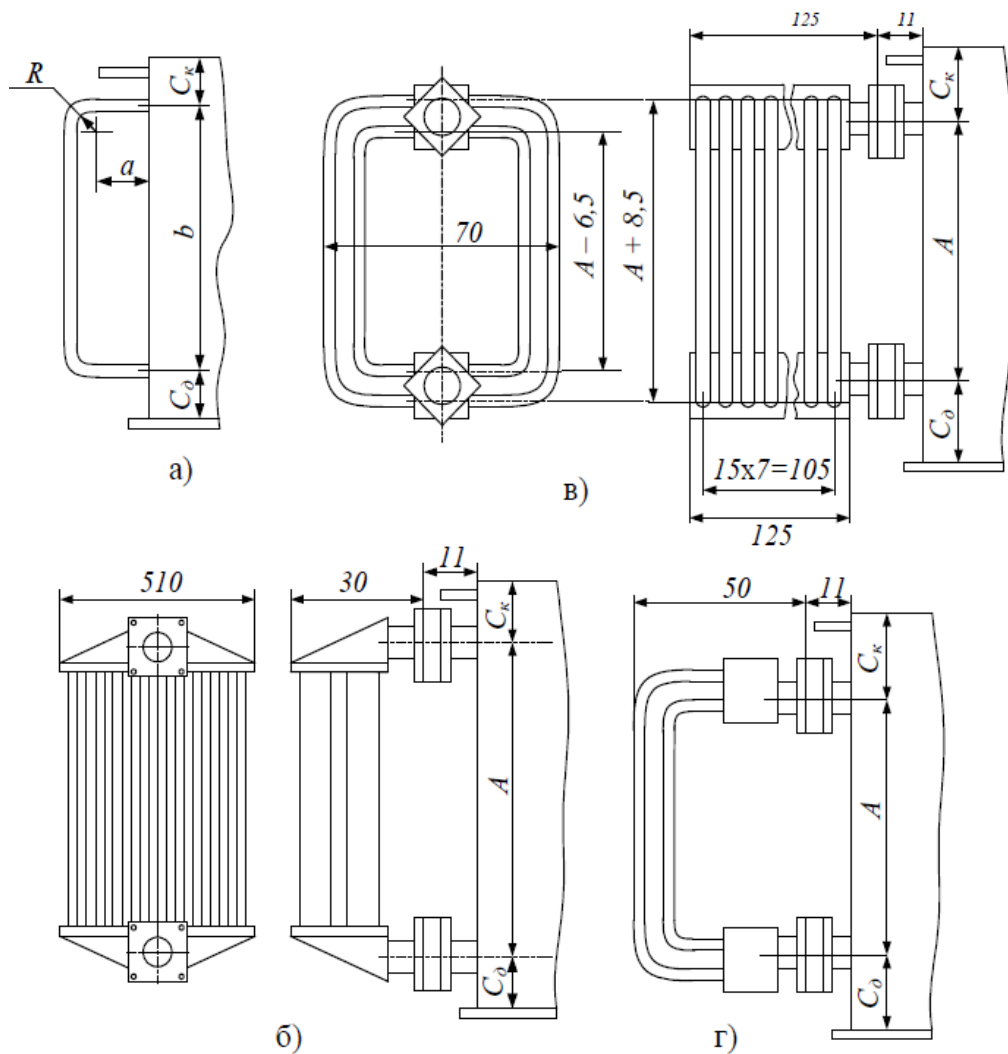
h_k/a	0,07...0,08	0,08...0,09	0,1	0,11...0,12	0,13...0,14	0,15...0,19	$\geq 0,2$
k_3	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8

Середнє перевищення температури обмотки над маслом, °С, розраховується як для обмотки НН, так і для обмотки ВН

$$\theta_{(\text{о-м})\text{ср}} = \theta_{\text{ср}} + \theta_{\text{но-м}}. \quad (6.11)$$

6.2 Вибір і розрахунок системи охолодження

Для відведення теплоти в навколишній простір необхідно, щоб трансформатор мав певну поверхню дотику з повітрям. У трансформаторах малої потужності (до 40 кВА) – це поверхня самого бака, а зі збільшенням потужності має створюватись додаткова поверхня охолодження за рахунок труб, що вварюються у стінки бака, або знімних трубних радіаторів, що додатково обдуваються вентиляторами (рисунок 9).



а – в трансформаторах потужністю 63...100 кВА потрібно застосовувати трубчастий бак;

б – в трансформаторах 160...1600 кВА потрібно застосовувати одинарні радіатори з овальними (рисунок 9, б) або круглими (рисунок 9, в) трубами;

в – в трансформаторах 2500...6300 кВА зазвичай застосовують подвійні радіатори (рисунок 9, в), одинарний радіатор (рисунок 9, г) – половина подвійного;

г – в трансформаторах 10000 кВА і вище використовуються подвійні радіатори з додатковим обдувом

Рисунок 9 – Розміщення труб і радіаторів на стінці бака

Мінімальні розміри бака, см:

– довжина

$$L_{\sigma} = 2 \cdot L + D''_2 + 2 \cdot (S_3 + S_4 + d_2); \quad (6.12)$$

– ширина

$$B = D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2; \quad (6.13)$$

– висота

$$H = l_c + 2 \cdot H_{я} + H_{я\delta} + H_{як}, \quad (6.14)$$

де $H_{я}$ – ширина першого пакета ярма (стержня), см, $H_{я} = g_{1c}$;

$H_{я\delta}$ – товщина опорного бруса під нижнім ярмом, см, $H_{я\delta} = 3 \dots 5$ см;

$H_{як}$ – відстань від верхнього ярма до кришки бака, см; $H_{як} = 16$ см, за $U_{вн} = 3 \dots 10$ кВ, $H_{як} = 30$ см за $U_{вн} = 20$ кВ, $H_{як} = 40$ см за $U_{вн} = 35$ кВ.

Бак віддає теплоту в навколишнє середовище за допомогою випромінювання і конвекції.

Площа поверхні випромінювання бака (овальної форми), м²,

$$F_{\text{вип}} = [2 \cdot (L_{\sigma} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot k_{\text{вип}} \cdot 10^{-4}, \quad (6.15)$$

де $k_{\text{вип}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні випромінювання бака з трубами і з радіаторами порівняно з гладеньким баком, гладенький бак – $k_{\text{вип}} = 1,0$; бак з трубами – $k_{\text{вип}} = 1,1$; бак з одинарними радіаторами – $k_{\text{вип}} = 1,4 \dots 1,6$; бак з подвійними радіаторами – $k_{\text{вип}} = 1,7 \dots 2,0$.

Необхідний перепад температури між баком та повітрям

$$\theta_{(\bar{\theta}-n)_H} = \theta_{(o-n)\text{доп}} - \theta_{(o-л)\text{ср}} - \theta_{\text{м-б}}, \quad (6.16)$$

де $\theta_{(o-л)\text{ср}}$ – більше з двох значень, розрахованих для обмоток ВН і НН;

$\theta_{\text{м-б}}$ – перепад температури на поверхнях «масло-бак», °С; $\theta_{\text{м-б}} = 5 \dots 6$ °С;

$\theta_{(o-n)\text{доп}}$ – максимально допустимий перепад температури обмоток над навколишнім середовищем, °С; $\theta_{(o-n)\text{доп}} = 65$ °С.

Знайдене значення $\theta_{(\bar{\theta}-n)_H}$ має задовольняти умові

$$1,2 \cdot \theta_{(\bar{\theta}-n)_H} + \theta_{\text{м-б}} = 60^\circ\text{С}. \quad (6.17)$$

Якщо вказана умова не виконується, то потрібно взяти (6.17) і знайти нове значення перепаду температури «бак-повітря», що відповідатиме умові:

$$\theta_{(\bar{\theta}-n)_H} = 50 - \theta_{\text{м-б}}.$$

Необхідна площа поверхні конвекції, м²,

$$P_{KH} = \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_K)}{2,5 \cdot \theta_{(\bar{\theta}-n)_H}^{1,25}} - 1,12 \cdot P_{\text{сшт}},$$

де P_0 і P_K – фактичні втрати холостого ходу і короткого замикання, Вт.

6.3 Розрахунок поверхні охолодження

Розрахунок зводиться до визначення дійсної площі конвекції $\Pi_{\kappa\delta}$, м², яка має бути не меншою за необхідну [1]:

$$\Pi_{\kappa\delta} \geq \Pi_{\kappa\delta}^{\text{н}}. \quad (6.18)$$

6.3.1 Розрахунок поверхні охолодження баку з гладкими стінами

Площа поверхні кришки бака, м²,

$$\Pi_{\text{кр}} = [(L_{\delta} - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (6.19)$$

Повна площа поверхні охолодження гладкого бака дорівнює площі поверхні випромінювання стінками та кришкою бака, м²,

$$\Pi_{\kappa\delta} = \Pi_{\text{стін}} = [2 \cdot (L_{\delta} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot \Pi_{\text{кр}}. \quad (6.20)$$

6.3.2 Розрахунок поверхні охолодження бака з трубами

Найчастіше в системах охолодження застосовуються круглі труби діаметром 5,1 см. Площа поверхні 1 м такої труби становить $\Pi_m = 0,16$ м², а маса масла в ній – 1,58 кг.

Розмір труб (рисунок 9, а): $a = 5$ см; $C_{\kappa} = 7$ см; $C_{\delta} = 8$ см; $R = 15$ см;

Висота між осями, які вварюються в бак труб, см:

$$b = H - C_{\kappa} - C_{\delta}. \quad (6.21)$$

Розгорнута довжина труби, см,

$$l_{mp} = b + 1,14 \cdot R + 2 \cdot a. \quad (6.22)$$

Максимально можлива кількість труб у ряду на прямолінійних ділянках стінок бака, шт.,

$$m_{mp} = 2 \cdot \frac{L_{\delta} - B}{t_{mp}}, \quad (6.23)$$

де t_{mp} – відстань між трубами, $t_{mp} = 7$ см.

Площа поверхні випромінювання бака з трубами, м²,

$$\Pi_{\text{вип}} = 1,1 \cdot [2 \cdot (L_{\delta} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot \Pi_{\text{кр}}, \quad (6.24)$$

де $\Pi_{\text{кр}}$ – площа поверхні кришки бака, м².

Площа поверхні конвекції гładкого бака

$$\Pi_{\text{кгл}} = [2 \cdot (L_{\delta} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot \Pi_{\text{кр}}. \quad (6.25)$$

Площа поверхні конвекції труб

$$\Pi_{\text{ктр}} = \Pi_{\text{м}} \cdot m_{\text{тр}} \cdot l_{\text{тр}} \cdot 10^{-2}. \quad (6.26)$$

Фактична площа поверхні конвекції бака з трубами, м²,

$$\Pi_{\text{кф}} = \Pi_{\text{кгл}} + 1,4 \cdot \Pi_{\text{ктр}}. \quad (6.27)$$

Після розрахунку $P_{к\delta}$ перевірити виконання умови

$$P_{к\delta} \geq P_{кн'}$$

6.3.3 Розрахунок поверхні охолодження бака з навісними радіаторами

Радіатор складається з двох колекторів, у які вварюються труби. У трансформаторах застосовують одинарні і подвійні радіатори (рисунок 9). Основні дані радіаторів наведено в таблиці 2.

Таблиця 2 – Технічні дані трансформаторних радіаторів

Одинарний радіатор за рисунком 9, б			Одинарний радіатор за рисунком 9, г			Подвійний радіатор за рисунком 9, в		
A , см	$P_{к.тр}$, м ²	G_m , кг	A , см	$P_{к.тр}$, м ²	G_m , кг	A , см	$P_{к.тр}$, м ²	G_m , кг
71	2,135	24,0	188	11,45	161	188	22,9	276
90	2,733	30,0	200	12,1	169	200	24,15	291
115	3,533	38,0	228,5	13,55	184	228,5	27,05	321
140	4,333	46,0	248,5	14,55	194	248,5	29,1	341
161,5	4,961	53,0	268,5	15,6	204	268,5	31,15	362
180	5,613	57,0	300	17,2	219	300	34,35	393
200	6,253	64,0	325	18,45	232	325	36,9	418
220	6,893	72,0	375	21,0	258	375	42,0	169
240	7,533	78,0	400	22,3	269	400	44,6	492
$P_{кк} = 0,34 \text{ м}^2$			$P_{кк} = 0,72 \text{ м}^2$			$P_{кк} = 0,66 \text{ м}^2$		
$S_H = 160 \dots 1000 \text{ кВА}$			$S_H = 1600 \dots 2500 \text{ кВА}$			$S_H \geq 2500 \text{ кВА}$		

Примітки: 1 $P_{к.тр}$ – площа поверхні конвекції труб, м².
 2 G_m – маса масла в радіаторі, кг;
 3 $P_{кк}$ – площа поверхні конвекції колекторів радіаторів, м²

Для одинарного радіатора (рисунок 9, б) $C_\delta = 8,5$ см, $C_\kappa = 10$ см. Радіатори підбирають за значенням його міжосьової відстані A , для чого розраховують потрібне значення $A_{тр} = H - 34$ для подвійних радіаторів (рисунок 9, в, г) і $A_{тр} = H - 18,5$ для одинарних радіаторів (рисунок 9, б).

Стандартний радіатор з найближчою меншою відстанню A підбирається за таблицею 2.

Площа конвекції стінок гładкого бака, m^2 ,

$$\Pi_{\text{ст}} = [2 \cdot (L_6 - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4}. \quad (6.28)$$

Площа конвекції кришки гładкого бака, m^2 ,

$$\Pi_{\text{кр}} = [(L_6 - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (6.29)$$

Повна площа поверхні конвекції бака з радіаторами становитиме, m^2 ,

$$\Pi_{\text{зд}} = \Pi_{\text{ст}} \cdot k_{\text{фст}} + \Pi_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}} + n_{\text{рад}} (\Pi_{\text{к.лр}} \cdot k_{\text{флр}} + \Pi_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}), \quad (6.30)$$

де $k_{\text{ф}}$ – коефіцієнти, що враховують збільшення тепловіддачі відповідними елементами охолодження трансформатора в сукупності:

$k_{\text{фст}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,0$; $k_{\text{флр}} = 1,26$ – для одинарних радіаторів (рисунок 9, б);

$k_{\text{фст}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,0$; $k_{\text{флр}} = 1,4$ – для подвійних радіаторів (рисунок 9, в, г) за відсутності обдуву;

$k_{\text{фст}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,6$; $k_{\text{флр}} = 2,24$ – для подвійних радіаторів (рисунок 9, в, г) за наявності обдуву.

Оскільки поверхня $\Pi_{\text{зд}}$ має бути не меншою за $\Pi_{\text{кн}}$ (6.18), прирівнюючи їх з допомогою (6.30) визначається потрібна кількість радіаторів:

$$n_{\text{рад}} = \frac{\Pi_{\text{кн}} - \Pi_{\text{ст}} \cdot k_{\text{фст}} - \Pi_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}}}{\Pi_{\text{к.лр}} \cdot k_{\text{флр}} + \Pi_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}}. \quad (6.31)$$

Якщо $n_{рад}$ – ціле число, то знайдене число радіаторів вважається за дійсне, а якщо дробове, то воно округляється до найближчого більшого цілого числа, за якого розраховується дійсна площа поверхні конвекції за (6.30).

Якщо отримане число одинарних радіаторів (рисунок 9, б) неможливо розмістити по периметру бака (відстань між ними не може бути меншою за 10 см), то можна взяти радіатори з більшим розміром А, збільшивши відповідно висоту бака. Якщо те саме буде спостерігатись у випадку подвійних радіаторів (відстань між ними не має бути меншою за 16 см), то потрібно застосовувати дуття.

6.4 Визначення фактичних перегрівів

Середній перегрів стінки бака над повітрям, °С,

$$\theta_{\delta-n} = \left[\frac{1,05 \cdot (P_{\theta} + P_{\kappa})}{2,8 \cdot \Pi_{\text{стн}} + 2,5 \cdot \Pi_{\text{кд}}} \right]^{0,8} \cdot \quad (6.32)$$

Середній перегрів масла над стінкою бака з трубами, °С,

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (P_{\theta} + P_{\kappa})}{\Pi_{\text{кдл}} + \Pi_{\text{кр}} + \Pi_{\text{ктр}}} \right]^{0,6} \cdot \quad (6.33)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну перепаду температури за наявності/відсутності обдуву; $k_1 = 1,0$ у разі природного охолодження, $k_1 = 0,9$ – за наявності примусового обдуву.

Середній перегрів масла над стінкою бака з радіаторами, °С,

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \left[\frac{1,05 \cdot (P_\theta + P_\kappa)}{\Pi_{\text{кэл}} + \Pi_{\text{кр}} + (\Pi_{\text{к.тр}} + \Pi_{\text{кк}}) \cdot \eta_{\text{рад}}} \right]^{0,6} \quad (6.34)$$

Перегрів верхніх шарів масла над повітрям, °С,

$$\theta_{\text{м-п}} = 1,2 \cdot (\theta_{\text{б-п}} + \theta_{\text{м-б}}), \quad (6.35)$$

що не має перевищувати 60 °С.

Перегрів обмоток над повітрям, °С:

– обмотки НН

$$\theta_{(\text{o-n})1} = \theta_{(\text{o-м})\text{cp1}} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\text{б-п}}; \quad (6.36)$$

– обмотки ВН

$$\theta_{(\text{o-n})2} = \theta_{(\text{o-м})\text{cp2}} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\text{б-п}}. \quad (6.37)$$

які не мають перевищувати 65 °С.

ПИТАННЯ ДО ЗАХИСТУ КУРСОВОЇ РОБОТИ

- 1 Яке призначення та який принцип дії трифазного трансформатора?
- 2 Які обмотки називають первинними та вторинними, як маркуються виводи обмоток?
- 3 Які є основні схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів, та 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 в трансформаторі, які їх особливості?
- 7 Які типи обмоток застосовують в 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 Як визначають необхідну кількість радіаторів для охолодження трансформатора?
- 16 Як проходить тепловіддача в трансформаторах?

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1 Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування / М. П. Розводюк, Д. П. Проценко, В. С. Бомбик, О. А. Жуков. Вінниця : ВНТУ, 2023. 149 с.

2 Карпенко Н. П., Нерубацький В. П. Розрахунок трифазного силового масляного трансформатора: метод. вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини». Харків: УкрДУЗТ, 2014. 50 с.

3 Осташевський М. О. Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. ; за ред. В. І. Мілих. Київ : Каравела, 2018. 452 с.

4 Чуенко Р. М. Електричні машини : навч. посіб. Київ : Компрінт, 2017. 462 с.

5 Яцун М. А. Електричні машини : підручник. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. 464 с.

6 ДСТУ 2105-92 (ГОСТ 11920-93). Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови. [Чинний від 1993-07-01]. Вид. офіц. Київ : Держстандарт України, 1993. 78 с.

7 Левицький С. М., Бальзан І. В., Шевчук Ю. В. Розрахунок і проектування трифазних трансформаторів. Курсове проектування : навч. посіб. Вінниця : ВНТУ, 2018. 127 с.

ДОДАТОК А

Варіанти завдання на курсову роботу

№	Тип	Номинальна потужність трансфо- рматора S, кВ·А	Номинальна напруга обмотки ВН U _{ВН} , кВ	Номинальна напруга обмотки НН U _{НН} , кВ	Напруга к.в., %	Струм холостого ходу, %	Витрати к.в. P _к , кВт	Витрати х.х. P _х , кВт	Матеріал обмоток	Вид перемікання 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	2,2	10,5	1,5	2,2	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	2,2	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	2,2	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	2,5	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	2,2	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

ДОДАТОК Б

Довідникові 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 виводу ВН відносно землі
	Однохвильова			При плавному підйомі			
	Внутрішня ізоляція			Зовнішня ізоляція			
	Лінійного виводу відносно землі та інших обмоток	Між лінійними виводами і різних фаз	Між виводами і нейтралі	Лінійного виводу відносно землі	Між лінійними виводами і різних фаз	Між виводами і нейтралі	
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.2 – Число ступенів у перерізі стержня

Потужність трансформатора, кВ А	До 16						160-630	
	До 0,08						0,16-0,18	
Орієнтувальний діаметр стержня, м	2		3		4		6	
Число ступенів	1	2	3	4	5	6	7	8
Коефіцієнт	0,636	0,786	0,851	0,861	0,890	0,913	0,918	0,928
Потужність трансформатора, кВ А	1000-1600						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
Число ступенів	8	8	9	9	11	14	15	17
Коефіцієнт	0,925	0,928	0,929	0,913	0,922	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		1,25-1,36	
Число ступенів	12		13		15		17	
Коефіцієнт	0,829-0,904		0,899-0,907		0,903-0,909		0,912-0,913	
					0,910		0,913-0,914	

Таблиця Б.3 – Рекомендована індукція в 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÷800000	-	-	-	-	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 пресуючих 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 по таблиці.

Таблиця Б.7 – Значення коефіцієнту 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 $U_{вин} = 5$ 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 регульовочних 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.12 – Межа застосування різних типів обмоток

Тип обмотки	Використання на стороні		Матеріал обмотки	Межа застосування включно					Число паралельних проводів	
	головне	можливе		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 багатопшарова 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 багатопшарова 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	
			Алюміній	від 100 і вище	від 150÷200 і вище	до 35	від 75÷100 і вище			

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

Потужність трансформатора, кВ·А	63÷630	1000÷6300	10000÷16000	25000÷80000
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.1.4 – Номінальні розміри перерізу і ізоляції круглого мідного та алюмінієвого обмоточного 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								
1,18	1,094	6	2,00	3,14	3,0	4,00	12,55	1,5
1,25	1,23	5,5	2,012	3,53	3,0	4,10	13,2	1,5
Марка ПБ – мідь								
Марка АПБ – алюміній								
1,32	1,37	5,0	2,24	3,94	3,0	4,25	14,2	1,5
1,40	1,51	5,0	2,36	4,375	2,5	4,50	15,9	1,5
1,50	1,77	4,5	2,50	4,91	2,5	4,75	17,7	1,5
1,60	2,015	4,0	2,65	5,515	2,5	5,00	19,63	1,5
1,70	2,27	4,0	2,80	6,16	2,5	5,20	21,22	1,5
1,80	2,545	3,5	3,00	7,07	2,5	Марка АПБ – алюміній		
1,90	2,805	3,5	3,15	7,795	2,0	5,30	22,06	1,5
			3,35	8,81	2,0	6,00	28,26	1,5
			3,55	9,895	2,0	8,00	50,24	1,0
			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 по товщині з ізоляцією, вказаною в дужках.

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

Таблиця Б.15 – Номінальні розміри перерізу і ізоляція мідного і алюмінієвого обмоточного проводу марок ПБ і АПБ (розміри a і b – в мм, перерізу в мм²).

$a \setminus b$	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

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

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 по товщині ізоляції, вказаній у дужках.
5. Мідний провід марки ПБУ випускається за розмірами проволочки 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.

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
k	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 $S_{к.м}$, МВ·А

Клас напруги обмотки, кВ	Потужність короткого вмикання 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
$k_{y\partial} \cdot \sqrt{2}$	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 $P_{\phi,c}$
і $P_{\phi,y}$ плоскої шихтованої системи

d , м	Стержень		Ярмо, $P_{\phi,y}$, м ²	d , м	стержень		Ярмо, $P_{\phi,y}$, м ²
	Число ступенів	$P_{\phi,c}$, м ²			Число ступенів	$P_{\phi,c}$, 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); та далі на чотири-п'ять.

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

Число кутів зі стиками		Коефіцієнт для різних марок сталі		
косими	прямими	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

$B, \text{Тл}$	Марка сталі			
	3404; 0,35 мм	3404; 0,30 мм 3405; 0,35 мм	3405; 0,30 мм	3404 і 3405; В·А/м
	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 $k_{m,y}$, 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	4,35	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_s , 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

РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання курсової роботи

з дисципліни
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

Відповідальний за випуск Карпенко Н. П.

Підписано до друку 29.05.2023 р.
Умовн. друк. арк. 4,5. Тираж . Замовлення № .
Видавець та виготовлювач Український державний університет залізничного
транспорту,
61050, Харків-50, майдан Фейєрбаха, 7.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 6100 від 21.03.2018 р.