

Міністерство освіти і науки України
Національний гірничий університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
ДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОГО ПРОЕКТУ
«РОЗРАХУНОК ТА ПРОЕКТУВАННЯ СИЛОВОГО
ТРАНСФОРМАТОРА» З ДИСЦИПЛІНИ
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»
для студентів напрямків підготовки

Затверджено
на засіданні кафедри
електричних машин
Протокол №__ від _____

Дніпропетровськ
2009

Методичні вказівки до виконання курсового проекту «Розрахунок та проектування силового трансформатора» з дисципліни «Електричні машини» для студентів напрямків підготовки /Упорядник Остапчук О.В.

-Д.:НГУ. – 2009. – 52 с.

Автор:

Остапчук Олександр Володимирович, канд. тех. наук

Затверджено методичною комісією з напряму () за поданням кафедри електричних машин()

Методичні вказівки написані на основі багатолітнього досвіду, отриманого на кафедрі електричних машин під час викладання дисципліни «Електричні машини» для студентів напрямків підготовки

Відповідальний за випуск завідувач кафедри електричних машин д-р техн. наук, проф.
Ф.П. Шкрабець

1. Мета та завдання курсового проекту

Курсовий проект має мету закріпити і розширити знання студентів в області електричних машин, ознайомити з сучасною практикою та основними проблемами проектування трансформаторів, навчити застосовувати отримані знання для виконання реального інженерного завдання, виховувати у них навички самостійного прийняття рішень.

Проект силового трансформатора розроблюється студентами за методом самостійної роботи на основі матеріалу, отриманого при вивченні відповідного розділу курсу теорії електричних машин. Кожний студент отримує індивідуальне завдання на проект трансформатора та виконує його, використовуючи рекомендовану літературу, методичні вказівки та інші матеріали. Виконуючи курсовий проект, студент повинен проявити самостійність в розв'язанні виникаючих питань, вміння знаходити відповіді в технічній літературі. Студент повинен на власному досвіді, зрозуміти взаємозв'язок розмірів трансформатора, властивостей активних матеріалів та його технічних і економічних параметрів, враховуючи область застосування трансформатора та технології виробництва. Після засвоєння цих основ, можливий перехід до комплексного розв'язку задач проектування з повноцінним використанням сучасних програм обчислювальної техніки.

Розробка проекту повинна виконуватись на базі останніх досягнень передових трансформаторних заводів і відображати ті задачі, що стоять сьогодні перед трансформаторобудуванням. При виконанні проекту необхідно ініціативне рішення цих задач шляхом застосування нових матеріалів і відповідного поліпшення конструкції окремих вузлів.

2. Основні вимоги до проекту

Курсовий проект складається з розрахунково-пояснювальної записки та графічної частини.

Виконуючи розрахунки необхідно слідкувати за одиницями виміру всіх величин, що входять в ту, чи іншу формулу, та перевіряти в яких одиницях виміру повинен бути отриманий результат. В тексті допускаються тільки загальноприйняті скорочення. Розрахунково-пояснювальна записка повинна містити вихідні данні, план-графік виконання курсового проекту, вступ, розрахункову частину, в якій приводяться графічні матеріали (ескізи), виконані в процесі проектування.

Графічна частина проекту містить креслення, виконані згідно діючим стандартам «Єдиної системи конструкторської документації». Кожне креслення має підпис, в якому повинно бути вказано: тип трансформатора, назва креслення, факультет, група, прізвище та ініціали виконавця і керівника проекту.

3. Оформлення проекту

Графічна частина

Конструктивна розробка проекту виконується на двох аркушах кресленнях формату А1 (розміри креслення 594 x 841 мм). Креслення можуть бути виконані як за допомогою олівця і лінійки, так і з використанням графічних пакетів на комп'ютері, які студенти вивчали в попередніх курсах.

Аркуш 1 (чотири креслення формату А3 297 x 420 мм) містить конструктивну розробку головних вузлів трансформатора (обмотки ВН і НН, магнітопровід, бак), характеристики трансформатора (ККД та зовнішня характеристики від значення коефіцієнта навантаження).

На кресленні обмоток ВН і НН повинна бути представлена їхня осьова та радіальна будова. Креслення повинно бути доповнене даними про марку проводів та їх розміри, загальне число витків, число шарів в осьовому напрямі обмоток ВН і НН, кількість основних та регулювальних витків обмотки ВН.

Креслення магнітопровода повинно містити вигляд магнітної системи в зібраному виді разом з усіма вузлами та деталями (пресуючі балки ярем, стяжні та підіймальні шпильки, дерев'яні бруски і тощо), необхідними для з'єднання окремих частин в єдину конструкцію. Також зображується поперечний переріз ярма з нанесеними розмірами усіх пакетів.

На кресленні бака масляного трансформатора зображується бак з кришкою. При наявності охолоджувачів у вигляді навісних радіаторів – вказати розміри фланців. На кришці бака відображаються отвори під вводи, перемикач, вихлопна труба, розширювальний бак і тощо, та вказуються всі необхідні розміри.

Аркуш 2 містить розташування активної частини трансформатора в баці в трьох проекціях. На двох верхніх проекціях (фасад і профіль) бак трансформатора зображується в розрізі з видаленням передньої стінки. Активна частина трансформатора і кришка бака повинні бути показані повністю і не розрізаються. На кришці бака зображаються вводи ВН і НН, а також вся арматура. На всіх трьох проекціях бак зображається з візком та розширювачем, а також з усією арматурою (крани, пробки, термометри і тощо), підбраною згідно діючому ДСТУ, з нанесенням головних розмірів бака та габаритів трансформатора.

Розрахунково-пояснювальна записка

Розрахунково-пояснювальна записка повинна бути чітко і акуратно написана чорнилами, зброшурована і мати титульний аркуш за зразком додат. 2.

У вступі приводяться шляхи розвитку вітчизняного трансформаторобудування та характеристика основних вузлів трансформатора, який проектується.

Пояснювальна записка повинна мати ескізи в ході розрахунку [1]:

- основні розміри трансформатора (рис. 3.5);
- переріз котушок обмотки НН і ВН (рис. 6.13, 6.15);
- схема регулювання напруги (рис. 6.14);
- визначення додаткових втрат в обмотках (рис. 7.2);
- розрахунок осьових сил (рис. 7.12);
- визначення механічних навантажень в обмотках (рис. 7.11);
- визначення маси елементів магнітопровода (рис. 8.4);
- переріз стрижнів і ярма (рис. 8.14);
- габаритні розміри бака з навісними радіаторами (рис. 10.8).

Нумерацію рисунків в розрахунково-пояснювальній записці потрібно виконувати згідно того пункту, до якого він належить.

4. Вихідні дані проекту

Проект силового трансформатора виконується в відповідності з завданням (додат. 1). Завдання містить основні данні трансформатора, який проектується, його параметри, додаткові вимоги, які можуть бути дані у вигляді посилання на ДСТУ, а також план-графік виконання проекту по тижням семестру з вказівкою оцінки кожного етапу в процентах від загального обсягу роботи.

4.1 Схема розрахунку трансформатора

1. Визначення основних електричних величин:

1.1 Визначення лінійних і фазних значень струму та напруги обмоток ВН и НН;

- 1.2 Визначення випробувальних напруг обмоток.
2. Визначення основних розмірів трансформаторів:
 - 2.1 Вибір конструкції осердя;
 - 2.2 Вибір марки сталі, товщини листів сталі і типу міжшарової ізоляції. Вибір значення індукції;
 - 2.3 Визначення вихідних даних розрахунку та попередній розрахунок магнітної системи.
3. Розрахунок обмоток НН і ВН:
 - 3.1 Вибір типу обмоток НН і ВН;
 - 3.2 Розрахунок обмотки НН;
 - 3.3 Розрахунок обмотки ВН;
 - 3.4 Визначення маси заліза і проводу обмоток.
4. Визначення характеристик короткого замикання;
 - 4.1 Визначення втрат короткого замикання;
 - 4.2 Визначення напруги короткого замикання;
 - 4.3 Визначення механічних сил в обмотках.
5. Остаточний розрахунок магнітної системи:
 - 5.1 Визначення розмірів пакетів і активних перерізів стрижня і ярма;
 - 5.2 Визначення маси сталі осердя;
 - 5.3 Визначення втрат холостого ходу;
 - 5.4 Визначення струму холостого ходу.
6. Тепловий розрахунок трансформатора:
 - 6.1 Тепловий розрахунок обмоток;
 - 6.2 Розрахунок охолоджувальної системи;
 - 6.3 Розрахунок перевищення температури обмоток і масла над повітрям;
 - 6.4 Визначення маси масла і основних розмірів розширювача.
7. Характеристики трансформатора:
 - 7.1 Розрахунок зовнішньої характеристики трансформатора;
 - 7.2 Розрахунок характеристики ККД трансформатора.
8. Перелік літератури, що використовувалася.

Відхилення розрахункових величин характеристик трансформатора від нормованих (заданих) не повинні перевищувати значення, вказані в таблиці 4.1

Таблиця 4.1 Допуски розрахункових величин трансформатора

Вимірювана величина	Допуск, %	Застосування допуску
Коефіцієнт трансформації	±1,0	Для трансформаторів з коефіцієнтом трансформації фазних напруг 3 і нижче або у тих випадках, коли цей допуск особливо зазначений в стандартах чи технічних умовах на конкретні типи і групи трансформаторів
	±0,5	Для інших трансформаторів
Напруга КЗ на основному відгалуженні	±10	Для всіх трансформаторів
Втрати КЗ на основному відгалуженні	±10	Для всіх двохобмоткових і триобмоткових трансформаторів; для основної пари сторін триобмоткових автотрансформаторів; для неосновних пар сторін триобмоткових автотрансформаторів
Втрати ХХ	±15	Для всіх трансформаторів
Сумарні втрати	±10	Теж
Струм ХХ	±30	Теж

Примітка. При проектуванні відхилення повинні бути не більше половини допуску, вказаного в таблиці.

5. Рекомендації з виконання розрахунку трансформатора

Розрахунок силового трансформатора виконується в відповідності з завданням. Нижче наведена послідовність розрахунку за пунктами і дані рекомендації з виконання окремих пунктів з вказівкою глав, параграфів, таблиць.

Глава 1. Визначення основних електричних величин [1, § 3.2; 2, § 6.3]

1.1 Визначення лінійних і фазних значень струму та напруги обмоток ВН та НН;

Потужність однієї фази та одного стрижня, кВА:

$$S_{\phi} = \frac{S}{m}; \quad S' = \frac{S}{c}, \quad (1.1)$$

де m – число фаз; c – число активних стрижнів.

Номінальний (лінійний) струм обмотки нижчої (НН) та вищої (ВН) напруги, А:

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U}, \quad (1.2)$$

де U – номінальна лінійна наруга відповідної обмотки, В.

Фазові струми обмоток НН і ВН в відповідності з схемою з'єднання обмоток, А:

а) при з'єднанні обмоток в зірку - $I_{\phi} = I$;

б) при з'єднанні обмоток в трикутник - $I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}$;

де I – номінальний (лінійний) струм відповідної обмотки.

Фазні напруги обмотки вищої та нижчої напруги, В:

а) при з'єднанні обмоток в зірку - $U_{\phi} = \frac{U}{\sqrt{3}}$;

б) при з'єднанні обмоток в трикутник - $U_{\phi} = U$.

1.2 Визначення випробувальних напруг обмоток.

Випробувальні напруги обмоток визначаються за табл. 4.1 для масляних силових трансформаторів і табл. 4.2 для сухих силових трансформаторів [1].

Параметри холостого ходу P_0 , i_0 і короткого замикання P_K , u_K визначаються відповідно за табл. 1.9, 1.10, 1.11 [1]. Для трансформаторів нестандартних потужностей параметри холостого ходу і короткого замикання розраховуються за формулою методом математичної інтерполяції, використовуючи данні перерахованих вище таблиць (якщо вони не вказані в завданні).

Визначення активної і реактивної складової напруги короткого замикання, %:

$$u_a = P_K / (10 \cdot S_H); \quad u_p = \sqrt{u_K^2 - u_a^2}, \quad (1.3)$$

де P_k - втрати короткого замикання, Вт; S_n - номінальна потужність трансформатора, кВА.

Глава 2. Розрахунок основних розмірів трансформатора [1, § 3.7; 2, § 6.5].

В основу попереднього розрахунку трансформатора покладена узагальнена методика проектування окремого трансформатора запропонована проф. МЕІ, доктором техн. наук Тіхоміровим П.М., яка викладена в § 3.7 [1].

2.1 Вибір схеми і конструкції магнітної системи [1, §2.1].

Магнітопровід (осердя) є магнітним колом трансформатора, тому при його конструюванні необхідно досягти якомога менших основних і додаткових втрат в сталі, мінімального струму холостого ходу і розходу трансформаторної сталі, найбільшого коефіцієнта заповнення сталю простору всередині обмоток, високої механічної міцності і стійкості. Найбільш поширені плоскі стрижневі магнітопроводи. Стрижні цих магнітопроводів (від одного до трьох в залежності від конструкції трансформатора) розташовуються вертикально, більшість трансформаторів має стрижні і ярма з плоскою шихтовкою, тобто зібрані із пластин, поверхні яких в магнітопроводі тільки паралельні. Матеріали по загальним конструктивним схемам силових трансформаторів приведені в параграфі 2.1 [1].

Кількість ступенів в поперечному перерізі стрижня прийняти відповідно за табл. 2.5 або табл. 2.6 [1].

Найбільш доцільною формою перерізу ярма є багатоступенева форма з числом ступенів, рівним числу ступенів в перерізі стрижня. Необхідно врахувати, що в конструкціях сучасних трансформаторів стяжка наскрізними шпильками стрижнів і ярма не застосовується. Розміри і число каналів в сучасних трансформаторах наведені в табл. 2.7 [1].

План шихтовки магнітної системи у випадку застосування холоднокатаної сталі необхідно прийняти за рис. 2.17, а, або рис. 2.17,б [1].

2.2 Вибір марки та товщини листів сталі, типу ізоляції пластин.

Вибір індукції в магнітній системі [1, § 2.2].

Матеріалом для магнітної системи силових трансформаторів служить головним чином холоднокатана тонколистова електротехнічна сталь марок 3404, 3405, 3406, 3407 з товщиною листів 0,35; 0,3; 0,27 [1, § 2.2].

В якості ізоляції пластин раніше переважно використовувалось лакове покриття. В останні роки більш широко застосовується двохстороннє жаростійке покриття сталі у вигляді керамічних і оксидних плівок, що наносять після прокатки.

Електротехнічні сталі 3404, 3405, 3406, 3407, 3408 мають низькі питомі втрати і підвищену магнітну проникність, яка дозволяє допустити індукцію в магнітній системі до $B=1,6 - 1,65$ Тл (в деяких випадках до $B=1,7$ Тл). Рекомендовані величини індукції в стрижнях трансформатора дані табл. 2.4 [1].

Індукція в зазорі на прямому стику $B_3'' = B_c$, Тл; на косому стику $B_3' = B_c/2$, Тл. Індукція в ярмі $B_y = B_c/K_y$, де K_y – коефіцієнт посилення ярма (табл.. 2.8, [1]).

2.3 Визначення початкових даних розрахунку і попередній розрахунок магнітної системи [1, § 2.1, 3.7].

Трансформатор будь-якого типу характеризується головними розмірами, що включають розміри осердя, розміри обмоток, величину зазорів між обмотками і елементами осердя. Діаметр окружності d , в яку вписано ступінчатий переріз стрижня,

являється одним з його основних розмірів. Другим з основних розмірів трансформатора є осьовий розмір l (висота) його обмоток. Звичайно обмотки мають однакову висоту. Третім основним розміром трансформатора є середній діаметр витка двох обмоток або діаметр осьового каналу між обмотками d_{12} , який зв'язує діаметр стрижня з радіальними розмірами обмоток a_1 і a_2 та осьового каналу між ними. Основні розміри трифазного трансформатора стрижневого типу показані на рис. 3.5 [1].

Розрахунок основних величин починається з визначення діаметра стрижня:

$$d = 0.507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot a_p \cdot K_p \cdot \beta}{f \cdot u_p \cdot B_c^2 \cdot K_c^2}}, \quad (2.1)$$

де S' – потужність обмоток на одному стрижні трансформатора, кВА; a_p – ширина приведенного каналу розсіювання, м; K_p – коефіцієнт приведення ідеального поля розсіювання до реального (коефіцієнт Роговського) може бути прийнятий постійним і дорівнює 0,95; f – промислова частота мережі живлення; u_p – реактивна складова напруги короткого замикання; B_c – індукція в стрижні, Тл; K_c – коефіцієнт заповнення сталлю.

Невідомі параметри, які входять у вираз, приведені вище, рекомендується визначати в наступній послідовності:

Потужність обмоток одного стрижня трансформатора, кВА:

$$S' = \frac{S}{c}, \quad (2.2)$$

де c – число активних стрижнів.

Ширина приведенного каналу розсіювання визначається наближено по виразу $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2)/3$. Розмір a'_{12} каналу між обмотками ВН і НН в мм, можна прийняти з таблиці визначення ізоляційних проміжків за випробувальною напругою обмотки ВН (табл. 4.5 [1]). Цей проміжок, виражений в метрах, буде рівним $a_{12} = a'_{12} \cdot 10^{-3}$.

Сумарний орієнтовний радіальний розмір обмоток ВН і НН, м:

$$(a_1 + a_2)/3 = K \cdot \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2}, \quad (2.3)$$

де S' – потужність на один стрижень, кВА; K - коефіцієнт, що залежить від потужності трансформатора, метала обмоток, напруги обмотки ВН і втрат короткого замикання (табл.3.3, [1]).

У всіх наступних випадках необхідно використовувати реальні радіальні розміри обмоток трансформатора, що розраховуються.

Значення β наближено дорівнює відношенню середньої довжини витка двох обмоток ℓ_B трансформатора до їх висоти ℓ і визначаються як відношення між шириною і висотою трансформатора (табл. 3.12, [1]).

Індукція в стрижні B_c вибирається з (табл. 2.4, [1]) у відповідності з вказівками, зробленими в § 2.2 і 11.1 [1], наближено можна прийняти рівною 1,60-1,65 Тл.

Коефіцієнт заповнення круга сталлю, залежить від числа ступенів в перерізі стрижня, способу пресування стрижня, розмірів охолоджуючих каналів і тощо. В загальному випадку коефіцієнт заповнення круга сталлю визначається по виразу:

$$K_c = K_{KP} \cdot K_3, \quad (2.4)$$

де $K_{кр}$ – коефіцієнт заповнення круга (табл. 2.5, 2.6 і 8.1 – 8.5, [1]); K_3 – коефіцієнт заповнення (табл. 2.2, [1]).

Отриманий діаметр d округлюється до найближчого стандартного значення (табл. 2.5, 2.6, [1]).

Активний переріз стрижня, $см^2$:

$$P_C = P_{фс} K_C = K_{кр} K_3 \cdot \frac{\pi \cdot d^2}{4}, \quad (2.5)$$

де $P_{фс}$ – площа фактичного поперечного перерізу стрижня; K_C – коефіцієнт заповнення круга сталлю.

Електрорушійна сила одного витка, В:

$$u_B = 4.44 \cdot f \cdot P_C \cdot B_C \cdot 10^{-4}, \quad (2.6)$$

Другий основний розмір трансформатора – висота обмотки визначається за формулою, м:

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta}, \quad (2.7)$$

де d_{12} – середній діаметр між обмотками, може бути прийняти приблизно з рис. 2.1 і визначений по формулі, м:

$$d_{12} \approx a_{сеп} \cdot d, \quad (2.8)$$

де $a_{сеп} = 1,3 - 1,35$, для мідних обмоток і $a_{сеп} = 1,4 - 1,45$ для алюмінієвих.

В якості додаткових вимог у завданні на курсовий проект вказаний матеріал обмоток.

Глава 3. Розрахунок обмоток НН і ВН [1, гл. 5 і 6].

Перед тим як обрати конструкцію обмоток ВН і НН, необхідно вивчити главу 5 [1]:

- загальні вимоги, які пред'являють до обмоток, § 5.1;
- конструктивні деталі обмоток і їх ізоляція, § 5.2;
- конструктивне виконання обмоток, § 5.3 - 5.6.

3.1 Вибір типу обмоток НН і ВН

Рекомендації для вибору типів обмоток НН і ВН зведені в табл. 5.8 [1, с.258]. В тих випадках, коли можливе використання двох різних типів обмоток, необхідно вибрати тип більш простого і дешевого у виготовленні.

3.2 Розрахунок обмоток НН

Розрахунок обмоток трансформатора, як правило, починають з обмотки НН, що розташовується у більшості трансформаторів між стрижнем і обмоткою вищої напруги.

Число витків на одну фазу обмотки НН:

$$W1 = U_{\phi 1} / u_B, \quad (3.1)$$

Отримане значення W_1 округляється до найближчого цілого числа і може бути як парним, так і непарним.

Після округлення числа витків необхідно знайти напругу одного витка, U_B :

$$u_B = U_{\phi 1} / W_1, \quad (3.2)$$

та індукцію в стрижні, Тл:

$$B_C = u_B / (4.44 \cdot f \cdot \Pi_C), \quad (3.3)$$

Середня густина струму в обмотках, МА/м²,
для мідних обмоток:

$$J_{СЕР.1} = 0.746 \cdot K_{\phi} \cdot \frac{P_K \cdot u_B}{S_H \cdot d_{12}} \cdot 10^4, \quad (3.4)$$

для алюмінієвих обмоток:

$$J_{СЕР.1} = 0.463 \cdot K_{\phi} \cdot \frac{P_K \cdot u_B}{S_H \cdot d_{12}} \cdot 10^4, \quad (3.5)$$

де S_H – номінальна потужність трансформатора, кВА; P_K – втрати короткого замикання, Вт; d_{12} – середній діаметр між обмотками, м; K_{ϕ} – коефіцієнт додаткових втрат в обмотках, в відводах, стінках баку і тощо, обирається за (табл. 3.6, [1]).

Отримане значення $J_{сер}$ звірити з даними табл. 5.7 [1]. Перевірка розрахованого значення $J_{сер}$ з табличним має за мету уникнути грубих помилок у розрахунку. Якщо розраховане значення $J_{сер}$ відрізняється більш ніж на 0,1 від даних табл. 5.7, тоді прийняти $J_{сер}$ за верхньою границею значень, наведених в таблиці.

Розрахувати орієнтовний переріз витка згідно прийнятого значення $J_{сер}$:

$$\Pi_1' = I_{\phi 1} / J_{СЕР}, \quad (3.6)$$

З урахуванням рекомендацій (гл.5 і табл. 5.8, ст. 258, [1]) обирається тип обмотки НН.

3.2.1. Розрахунок обмотки нижчої напруги

1. Приймаємо орієнтовне число шарів обмотки $n_{сл} = 2..4$, яке повинно бути цілим числом.

2. Визначаємо орієнтовне число витків у шарі:

$$W_{ШАР} = W_1 / n_{ШАР}, \quad (3.7)$$

3. Орієнтовна висота витка з ізоляцією, м:

$$h_B = \frac{l}{W_{ШАР} + 1}, \quad (3.8)$$

де l - висота обмотки НН за (2.7), м.

4. Якщо попередній переріз проводу обмотки за (3.6) перевищує 75 мм^2 , тоді він набирається з декількох паралельних проводів перерізом $(55-75) \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$, якщо ні, тоді $n_{ел}=1$.

5. Орієнтовне число елементарних проводів:

$$n_{ел} = \Pi'_1 / (55 - 75) \cdot 10^{-6}, \quad (3.9)$$

приймається рівним цілому числу.

6. Орієнтовний переріз елементарного проводу, м^2 :

$$\Pi_{ел} = \Pi'_1 / n_{ел}, \quad (3.10)$$

7. Орієнтовна висота елементарного провідника, з якого набирається виток обмотки з ізоляцією, м:

$$h'_{ПП} = h_B / n_{ел}, \quad (3.11)$$

8. Орієнтовна висота елементарного провідника без ізоляції, м:

$$h_{ПП} = h'_{ПП} - \delta_{із} \quad (3.12)$$

де $\delta_{із}$ – двохстороння товщина ізоляції (табл. 5.1 і 5.2, [1]).

9. На основі $h_{ПП}$ і необхідного $\Pi_{ел}$ з табл. 5.1. і 5.2. [1] обираємо марку проводу і його розміри. При виконанні циліндричних обмоток для прямокутного проводу елементарні провідники розташовуються по висоті обмотки: намотування плазом (більшою стороною), або на ребро (меншою стороною). Намотка плазом бажаніша, тому що намотка на ребро збільшує додаткові втрати і більш складна в технології виробництва. У випадку використання намотки на ребро необхідно обрати провід з співвідношенням сторін:

$$1.3 < \frac{\text{більша сторона}}{\text{менша сторона}} > 3, \quad (3.13)$$

Характеристика витка записується у вигляді:

$$\text{Марка проводу} \times n_{ел} \times \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'}, \quad (3.14)$$

де a і b – розміри елементарного провідника без ізоляції, мм;

a' і b' – розміри елементарного провідника з урахуванням ізоляції.

10. Уточнюється висота витка, м:

$$h_B = n_{ел} \cdot b', \quad (3.15)$$

вона повинна бути менше чи дорівнювати значенню h_B отриманому з (3.8).

11. Уточнюється число витків у шарі:

$$W_{ШАР} = l / h_B, \quad (3.16)$$

12. Кількість шарів:

$$n'_{шар} = W_1 / W_{ШАР}, \quad (3.17)$$

вона повинна дорівнювати прийнятому при початку розрахунку.

Якщо в обраній кількості шарів обмотувальний провід підібрати неможна, необхідно повернутися до п.1. даного параграфу, змінити $n_{сл}$ і провести повторний розрахунок обмотки НН, підібрати розміри проводу такими, щоб $n'_{сл}$ було рівним $n_{сл}$.

13. Фактичний переріз витка, м²:

$$\Pi_1 = n_{ел} \cdot \Pi_{ел} \cdot 10^{-6}, \quad (3.18)$$

14. Дійсна густина струму, МА/м²:

$$J_1 = I_{\phi 1} / \Pi_1, \quad (3.19)$$

яка повинна знаходитися в межах, вказаних в табл. 5.7 [1].

15. Осьовий розмір витка, м:

$$h_{e1} = n_{ел} \cdot b' \cdot 10^{-3}, \quad (3.20)$$

де b' – висота елементарного провідника, мм.

16. Кінцевий осьовий розмір обмотки, м:

$$l_1 = h_{B1} \cdot (W_{ШАР} + 1) + (0.005 \div 0.015), \quad (3.21)$$

17. Радіальний розмір обмотки за (рис. 6.2 і 6.3, [1]), м:

$$a_1 = (n'_{шар} \cdot a' + a_{11}) \cdot 10^{-3}, \quad (3.22)$$

де a' - радіальний розмір проводу з ізоляцією, мм; $n'_{сл}$ - кількість шарів; a_{11} - радіальний розмір каналу за (табл. 9.2а, [1]), мм.

18. Внутрішній діаметр обмотки, м:

$$D'_1 = d_H + 2a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (3.23)$$

де d_H – нормалізований діаметр стрижня, мм; a_{01} - радіальний розмір каналу між стрижнем і обмоткою, за (табл. 4.4, [1]), мм.

19. Зовнішній діаметр обмотки, м:

$$D''_1 = D'_1 + 2a_1, \quad (3.24)$$

20. Поверхня охолодження обмотки НН при відсутності охолоджувального каналу між шарами, м²:

$$\Pi_{01} = c \cdot K_3 \cdot \pi (D'_1 + D''_1) \cdot l_1, \quad (3.25)$$

При наявності охолоджувального каналу між шарами:

$$\Pi_{01} = 2c \cdot K_3 \cdot \pi(D_1' + D_1'') \cdot l_1, \quad (3.26)$$

де c - число активних (несучих обмотки) стрижнів; $K_3 \approx 0,75$ – коефіцієнт, враховуючий закриті частини обмотки рейками та іншими ізоляційними матеріалами.

21.Орієнтовна густина теплового потоку обмотки НН, Вт/м²:

$$q_1 = \frac{0.45 \cdot P_K \cdot 10^3}{\Pi_{01}}, \quad (3.27)$$

Для уникнення перегріву обмотки і збільшення втрат потужності значення q_1 повинно бути в межах 800-1400 Вт/м².

При великих q_1 потрібно передбачити осьовий канал і перерахувати D_1'' і поверхню охолодження. Густина теплового потоку можна визначити орієнтовно за (7.17) або (7.17a)[1].

3.2.2 Розрахунок гвинтової обмотки низької напруги

Розрахунок гвинтової обмотки виконується в відповідності з рекомендаціями, викладеними в джерелі (§ 5.5 і 6.1, [1])

1. Орієнтовний осьовий розмір витка, м:

$$h_{B1} = l / (W_1 + 4) - h_k, \quad (3.28)$$

де h_k – розмір радіального каналу (за табл. 9.2, [1]) попередньо $h_k = 5\text{мм} = 0,005\text{м}$.

Якщо $h_{B1} < b$, обраного за значенням q і J (рис. 5.34, а і б, [1]), тоді необхідно використовувати одноходову обмотку.

Якщо h_{B1} більше вказаних величин, тоді використовується двоходова гвинтова обмотка з каналом чи без каналу між двома групами проводів.

Коли густина струму в мідному проводі обмотки не перевищує $2,2 \cdot 10^6 - 2,5 \cdot 10^6$ А/м², а у алюмінієвому $1,4 \cdot 10^6 - 1,8 \cdot 10^6$ А/м², можливо застосування гвинтової обмотки без радіальних каналів з щільним приляганням витків.

Намагаючись отримати оптимальне значення теплового потоку $q = 900-1400$ Вт/м², необхідно перевірити кілька варіантів виконання гвинтової обмотки.

Розрахунок необхідно вести згідно з (рис. 6.5, ст. 272, [1]).

1. Необхідний осьовий розмір проводу з ізоляцією, мм:

а) для одноходової обмотки [1, рис. 6.5,а] з трьома транспозиціями:

$$b' = \frac{l_1 \cdot 10^3 - K \cdot h_k (W_1 + 3)}{(W_1 + 4)}, \quad (3.29)$$

тут і далі l_1 - в м, h_k – мм;

б) для одноходової обмотки з каналами через два витки (рис. 6.5 б, [1]) і з трьома транспозиціями:

$$b' = \frac{l_1 \cdot 10^3 - K \cdot [h_k (W_1 / 2 + 2) + \sigma \cdot W_1 / 2]}{(W_1 + 4)}, \quad (3.30)$$

де σ – товщина прокладки між здвоєними витками, звичайно дорівнює 1-1,5 мм;

в) для двоходової обмотки з рівномірно розподіленою транспозицією за рис. 6.5 в, [1]

$$b' = \frac{l_1 \cdot 10^3 - K \cdot h_k (W_1 + 1)}{2(W_1 + 1)}, \quad (3.31)$$

г) для двоходової обмотки без каналів між двома групами проводів за рис. 6.5 г; [1]

$$b' = \frac{l_1 \cdot 10^3 - K \cdot [h_k W_1 + \sigma (W_1 + 1)]}{2(W_1 + 1)}, \quad (3.32)$$

Коефіцієнт K враховує усадку міжкотушечних прокладок після сушки та пресування обмотки і може бути прийнятий 0,94 – 0,96.

2. Осьовий розмір проводу без ізоляції, мм:

$$b = b' - \sigma, \quad (3.33)$$

де σ – двостороння товщина ізоляції $\approx 0,5$ мм чи більше (табл. 5.2, примітка, [1]).

3. Попередній переріз витка, м²:

$$\Pi_1' = I_{\phi 1} / J_{CEP}, \quad (3.34)$$

4. Орієнтовна кількість елементарних провідників:

$$n_{el} = \Pi_1' / [(55 - 75) \cdot 10^{-6}], \quad (3.35)$$

Для одноходової обмотки n_{el} повинно бути не менше 4, а для двоходової обмотки не менше 8 і обов'язково парним.

5. Необхідний переріз елементарного провідника, м²:

$$\Pi_{el1} = \Pi_1' / n_{el}, \quad (3.36)$$

За розміром b (мм) і Π_{el1} (мм²), (табл. 5.2, 5.3, [1]) обирається провід з наведеного сортименту.

Характеристика витка записується у вигляді – див. 3.3.1.п.9.

6. Повний фактичний переріз витка, м², з врахуванням обраного за таблицею (табл. 5.2, 5.3, [1]) перерізу реального проводу Π_p , мм²:

$$\Pi_1 = n_{el} \cdot \Pi_p \cdot 10^{-6}, \quad (3.37)$$

7. Дійсна густина струму, МА/м²:

$$J_1 = I_{\phi 1} / \Pi_1, \quad (3.38)$$

і повинна бути в межах, вказаних у табл. 5.7 [1].

8. Після вибору розмірів проводу визначити осьовий розмір гвинтової обмотки, м:

а) для однофазової обмотки, рис. 6.5 а, [1] з трьома транспозиціями

$$l_1 = b' \cdot 10^{-3} \cdot (W_1 + 4) + K \cdot h_K \cdot (W_1 + 3) \cdot 10^{-3}, \quad (3.39)$$

б) для однофазової обмотки з каналами через два витка, рис. 6.5 б, [1] і трьома транспозиціями рис. 6.5 в, [1]

$$l_1 = b' \cdot 10^{-3} \cdot (W_1 + 4) + K \cdot [h_K \cdot (W_1 / 2 + 2) + \sigma \cdot W_1 / 2] \cdot 10^{-3}, \quad (3.40)$$

в) для двофазової обмотки з рівномірно розподіленою транспозицією рис. 6.5 в, [1]

$$l_1 = 2 \cdot b' \cdot 10^{-3} \cdot (W_1 + 1) + K \cdot h_K \cdot (2 \cdot W_1 + 1) \cdot 10^{-3}, \quad (3.41)$$

г) для двофазової обмотки без каналу між двома групами проводів за рис. 6.5 г, [1]

$$l_1 = 2 \cdot b' \cdot 10^{-3} \cdot (W_1 + 1) + K \cdot [h_K \cdot W_1 + \sigma \cdot (W_1 + 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (3.42)$$

10. Радіальний розмір гвинтової обмотки, мм:

а) однофазової $a_1' = n_{el} \cdot a_1'$

б) двофазової $a_1' = 0.5 \cdot n_{el} \cdot a_1'$

11. Внутрішній діаметр обмотки, м:

$$D_1' = d_H + 2a_{01} \cdot 10^{-3}, \quad (3.43)$$

де a_{01} , мм, за табл. 4.4 [1].

12. Зовнішній діаметр обмотки, м:

$$D_1'' = D_1' + 2a_1' \cdot 10^{-3}, \quad (3.44)$$

13. Поверхня охолодження гвинтової обмотки, м²:

а) однофазова з повним числом каналів рис. 6.5 а, [1]

$$\Pi_{01} = 1.125 \cdot W_1 \cdot \pi \cdot [(D_1''^2 + D_1'^2) + 2 \cdot (D_1'' + D_1') \cdot b'], \quad (3.45)$$

де b' – висота проводу з ізоляцією, м;

б) однофазова з повним числом каналів рис. 6.5 б, [1]

$$\Pi_{01} = 0.564 \cdot W_1 \cdot \pi \cdot [(D_1''^2 + D_1'^2) + 4 \cdot (D_1'' + D_1') \cdot b'], \quad (3.46)$$

в) двофазова з повним числом каналів рис. 6.5 в, [1]

$$\Pi_{01} = 2.25 \cdot W_1 \cdot \pi \cdot [(D_1''^2 - D_1'^2) + 2 \cdot (D_1'' + D_1') \cdot b'], \quad (3.47)$$

г) двофазова без каналів між двома групами проводів рис. 6.5 г, [1]

$$\Pi_{01} = 1.125 \cdot W_1 \cdot \pi \cdot [(D_1''^2 - D_1'^2) + 4 \cdot (D_1'' + D_1') \cdot b'], \quad (3.48)$$

14. Орієнтовна густина теплового потоку, Вт/м²:

$$q_1 = \frac{0.45 \cdot P_K \cdot 10^3}{\Pi_{01}}, \quad (3.49)$$

В гвинтових обмотках з каналами між всіма витками густина теплового потоку може бути визначена за (7.19, 7.19а, [1]).

Значення q_1 повинно бути в межах 800-1200 Вт/м². Якщо тепловий потік отриманий в заданих межах, обмотка вибрана правильно. В іншому випадку конструкцію обмотки необхідно змінити.

3.3. Розрахунок обмоток високої напруги

Обираючи обмотки ВН необхідно враховувати необхідність виконання відгалужень для регулювання напруги. В масляних трансформаторах потужністю від 25 до 200000 кВА з ПБЗ (перемиканням без збудження) передбачаються чотири відгалуження на +5%; +2,5%; -2,5%; -5% номінальної напруги крім основного затискача з номінальною напругою.

Часто використовувані схеми розміщення регулювальних відгалужень в трансформаторах з ПБЗ показані на рис. 6.6 [1, с.275; 2, с.69].

Обираємо схему регулювання з врахуванням вказівок [1, § 6.2], в залежності від потужності, напруги обмотки ВН і схеми з'єднання. При схемі з'єднання «зірка» - робоча напруга $10/\sqrt{3}\% U_2, В$; випробувальна $2 \cdot 10/\sqrt{3}\% U_2, В$; з'єднання «трикутником» - робоча $100\% U_2, В$; випробувальна $2 \cdot 100\% U_2, В$.

Число витків в обмотці ВН при номінальній напрузі:

$$W_{H2} = U_{\phi 2} / u_B, \quad (3.50)$$

Число витків на одній ступені регулювання:

$$W_P = 2.5 \cdot W_{H2} / 100, \quad (3.51)$$

Число витків на відгалуженнях:

$$+ 5\% W_{H2} = W_{H2} + 2W_P, \quad (3.52)$$

$$+ 2,5\% W_{H2} = W_{H2} + W_P, \quad (3.53)$$

Номінальна напруга W_{H2} :

$$- 2,5\% W_{H2} = W_{H2} - W_P, \quad (3.54)$$

$$- 5\% W_{H2} = W_{H2} - 2W_P, \quad (3.55)$$

Орієнтовна густина струму, МА/м²:

$$J_2 = 2J_{CEP1} - J_1, \quad (3.56)$$

Орієнтовний переріз витка обмотки, м²:

$$\Pi_2' = I_{\phi_2} / J_2, \quad (3.57)$$

При перерізі проводу 0,000021 м² (21мм²) для міді і 0,000050 (50 мм²) для алюмінію обирається за [1, табл. 5.1]. один круглий або прямокутний провідник.

При значному перерізі фазний провідник набирається з декількох елементарних провідників.

3.3.1 Розрахунок циліндричної обмотки вищої напруги з круглого проводу [1,с.282].

1. За орієнтовним перерізом витка обмотки і сортиментом обмоткового проводу для трансформаторів [1, табл. 5.1] підбирається провід необхідного перерізу або в рідких випадках два паралельних однакових провідника з діаметрами без ізоляції d_2 та з ізоляцією d_2' , мм.

Підібрані розміри проводу записуються так:

$$\text{Марка проводу} \times n_{\phi 2} \times \frac{d_2}{d_2'}, \text{мм}$$

де $n_{\phi 2}$ – число паралельних проводів.

2. Повний переріз витка, м²:

$$\Pi_2 = n_{\phi 2} \cdot \Pi_2'' \cdot 10^{-6}, \quad (3.58)$$

де Π_2'' – переріз одного проводу, мм².

3. Отримана густина струму, МА/м²:

$$J_2 = I_{\phi 2} / \Pi_2, \quad (3.59)$$

повинна знаходитися в допустимих межах [1, табл. 5.7].

4. Число витків в шарі:

$$W_{\text{ШАР}2} = l_2 \cdot 10^3 / (n_{\phi 2} \cdot d_2') - 1, \quad (3.60)$$

де $l_2 = l_1$ – висота обмотки ВН, м

5. Число шарів в обмотці з урахуванням витків для регулювання напруги:

$$n_{\text{шар}2} = 1.05 W_{H2} / W_{\text{ШАР}2}, \quad (3.61)$$

$n_{\text{шар}2}$ округлюється до найближчого більшого числа).

6. Робоча напруга двох шарів, В:

$$U_{M.\text{ШАР}} = 2W_{\text{ШАР}2} u_B, \quad (3.62)$$

За робочою напругою двох шарів виходячи з вказівок [1, табл. 4.7] обирається число шарів і загальна товщина $\sigma_{M.\text{шар}}$ кабельного паперу в ізоляції між двома шарами обмотки.

За умовами охолодження обмотки кожного стрижня часто виконується у вигляді двох концентричних котушок з осевим масляним каналом між ними. Число шарів внутрішньої котушки при цьому повинно складати не більше $1/3 - 2/5$ загального числа шарів обмотки. Мінімальна ширина масляного каналу a'_{22} обирається за [1, табл. 9.2].

7. Радіальний розмір обмотки, м:
однієї котушки без екрана

$$a_2 = [d'_2 \cdot n_{ШАР,2} + \sigma(n_{ШАР,2} - 1)] \cdot 10^{-3}, \quad (3.63)$$

двох котушок без екрана

$$a_2 = [d'_2 \cdot n_{ШАР,2} + \sigma(n_{ШАР,2} - 1) + a'_{22}] \cdot 10^{-3}, \quad (3.64)$$

В обмотках класів напруг 20 і 35 кВ під внутрішнім шаром обмотки встановлюється металевий екран – незамкнутий циліндр з алюмінієвого (латунного) листа товщиною 0,5мм. Екран з'єднується електрично з кінцем обмотки (початок внутрішнього шару) і ізолюється від внутрішнього шару обмотки, як правило, міжшаровою ізоляцією. Така ж ізоляція екрану встановлюється зі сторони масляного каналу.

Радіальний розмір обмотки при наявності екрану, м:

$$a_{2екр} = a_2 + [\sigma_{екр} + 2\sigma_{М.ШАР}] \cdot 10^{-3}, \quad (3.65)$$

де a_2 - радіальний розмір обмотки без екрану; $\sigma_{екр}=0,5$ мм; $\sigma_{М.сл}$ за табл. 4,7 [1].

Для робочої напруги 35 кВ можна прийняти додаткове збільшення радіального розміру обмотки за рахунок екрану і двох шарів між шарової ізоляції на 3мм.

Мінімальний радіальний розмір a'_{12} мм, осевого каналу між обмотками НН і ВН і товщина ізоляційного циліндра обираються за випробувальною напругою обмотки ВН і потужністю трансформатора [1, § 4.5, табл. 4.5].

8. Внутрішній діаметр обмотки (за наявністю екрану – до його внутрішньої ізоляції), м:

$$D_2^i = D_1'' + 2a_{12}, \quad (3.66)$$

9. Зовнішні діаметр обмотки:
без екрану

$$D_2'' = D_2^i + 2a_2, \quad (3.67)$$

з екраном

$$D_2'' = D_2^i + 2a_{2екр}, \quad (3.68)$$

Ізоляційна відстань між зовнішніми обмотками сусідніх стрижнів $a_{22} = a''_{22} \cdot 10^{-3}$, де, a''_{22} мм, знаходяться за [1, табл. 4.5].

10. Основні розміри обмоток трансформатора [1, рис. 6.17].

11. Схема розміщення регульовальних витків приймається за рис. 6.6. [1].

12. Поверхня охолодження обмотки, м²:

$$\Pi_{02} = c \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D_2'' + D_2') \cdot l_2, \quad (3.69)$$

де c – кількість стрижнів магнітної системи;

Для однієї котушки, що намотана безпосередньо на циліндр, за [1, рис. 5.22,а] $n=1,0$; $K=1,0$.

Для однієї котушки за [1, рис. 5.22,б] $n=1,0$; $K=0,88$.

Для двох котушок за [1, рис. 5.22,в] $n=2$; $K=0,75$.

Для двох котушок за [1, рис. 5.22,г] $n=1,5$; $K=0,83$ та за [1, рис. 5.22,д] $n=2$; $K=0,8$.

13.Орієнтована густина теплового потоку, Вт/м^2 :

$$q_2 = \frac{0.55 \cdot P_K \cdot 10^3}{\Pi_{02}}, \quad \text{ё} \quad (3.70)$$

Значення q_2 повинно бути в межах 800-1400 Вт/м^2 , воно визначає вибір конструкції обмоток і кількість каналів.

3.3.2 Розрахунок багат шарової циліндричної обмотки вищої напруги з прямокутного проводу [1, с. 285]

Цей тип обмоток застосовується в якості обмотки ВН (в деяких випадках і нижчої напруги) в масляних трансформаторах класів напруги 10 та 35 кВ потужністю 1000 кВА та більше.

1. Після визначення Π_2, J_2, l_2 необхідно обрати один або два-три паралельних проводи з загальним перерізом Π_2' таким чином, щоб густина теплового потоку на охолоджуючий поверхні обмотки q не перевищила допустиме значення $q = 1200-1400 \text{ Вт/м}^2$ і додаткові втрати не вийшли за прийнятий рівень (від 5 до 20 %).

Для цього визначається:

2. Загальний сумарний радіальний розмір проводів, m , необхідний для отримання повного перерізу всіх витків обмотки, для обмотки ВН:

$$b = W_2' \Pi_2 - (l_2 K_{oc}), \quad (3.71)$$

де $W_2' = 1,05 W_{H2}$ – число витків обмотки ВН з врахуванням межі регулювання напруги; K_{oc} – середній коефіцієнт, що враховує ізоляцію проводів в осевому напрямку обмотки, який може бути прийнятий 0,92 для мідного проводу і 0,93 для алюмінієвого проводу; $\Pi_2 = \Pi_2' \cdot 10^{-6}$; $l_2 = l_1$ – висота обмотки ВН дорівнює висоті обмотки НН.

3. Загальний гранично допустимий сумарний радіальний розмір обмотки за умовами допустимої густини теплового потоку, m :

для мідного проводу

$$b_2 \leq q \cdot K_3 / (1.07 \cdot J^2 \cdot 10^{-8}) \quad (3.72)$$

для алюмінієвого проводу

$$b_2 \leq q \cdot K_3 / (1.72 \cdot J_2 \cdot 10^{-8}), \quad (3.73)$$

де q – густина теплового потоку в межах 1200 – 1400 Вт/м² і не більше 1500 Вт/м²; $K_3=0,8$ – для циліндричної обмотки; J_2 – густина струму, А/м².

Якщо знайдений сумарний розмір b виявиться більше розміру, допустимого за густиною теплового потоку b_2 , тоді обмотку необхідно розділити на дві чи три концентричні котушки так, щоб у кожній з них сумарний розмір був не більше допустимого. Ширина кожного осьового каналу між котушками повинна дорівнювати $0,01l_2$, але не менше 5мм.

Радіальний розмір проводу a і число шарів обмотки $n_{\text{шар.2}}$ повинні бути вибрані за допомогою табл. 5.9 [1] так, щоб додаткові втрати в обмотці не вийшли за прийнятий рівень.

Наприклад: $b = 0,03$ або 30 мм при кількості шарів від одного до шести радіальний розмір проводу $a = b / n_{\text{шар.2}}$ буде змінюватися від $30/1 = 30$ до $30/6=5$. При такій кількості шарів і розмірах проводу згідно табл. 5.9 [1] отримати додаткові втрати в межах до 5% неможливо.

При 7-10 шарах a буде змінюватись від 4,3 до 3, що припустимо.

Зміна числа шарів при розрахунку легко досягається шляхом зміни відношення розмірів перерізу проводу при заданій його площі.

4. Реальний переріз проводів підбирається за 5.2 [1] і записується так:

$$\text{Марка проводу} \times \text{число паралельних проводів} \times \frac{\text{Розмір пр. без ізоляції}}{\text{Розмір пр. з ізоляцією}},$$

$$\text{або Марка проводу} \times n_{e2} \times \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'},$$

5. Повний переріз витка, м²:

$$P_2 = n_B \cdot P_2'' \cdot 10^{-6}, \quad (3.74)$$

де P_2'' – переріз одного паралельного проводу, мм², з табл. 5.2 [1].

6. Дійсна густина струму, А/м²:

$$J_2 = I_{\phi 2} / P_2, \quad (3.75)$$

7. Число витків в шарі:

$$W_{\text{шар.2}} = \frac{l_2}{n_{B2} \cdot b'} \cdot 10^3 - 1, \quad (3.76)$$

де $l_2=l_1$ – висота обмотки ВН, що дорівнює висоті обмотки НН; b' – висота одного з паралельних провідників, мм.

8. Число шарів в обмотці з врахуванням витків для регулювання:

$$n_{\text{шар.2}} = W_2' / W_{\text{шар.2}}, \quad (3.77)$$

(округлюється до найближчого більшого числа).

9. Робоча напруга двох шарів, В:

$$U_{M.ШАР} = 2W_{ШАР.2}u_B, \quad (3.78)$$

За робочою напругою двох шарів за табл. 4.7 [1] у відповідності з вказівками § 4.5 [1] обирається кількість шарів, загальна товщина $\sigma_{M.СЛ}$ кабельного паперу в ізоляції двома шарами обмотки.

В обмотках класів напруг 20 і 35 кВ під внутрішнім шаром обмотки встановлюється металевий екран – незамкнутий циліндр з листа немагнітного металу товщиною 0,5мм. Екран з'єднується електрично з лінійним кінцем обмотки (початок внутрішнього шару) та ізолюється від внутрішнього шару обмотки звичайною між шаровою ізоляцією. Така ж ізоляція встановлюється зі сторони масляного каналу.

10. Радіальний розмір обмотки без екрану, м:

$$a_2 = [a_2 \cdot n_{ШАР} + \sigma_{M.ШАР}(n_{ШАР.2} - 1) + a'_{22} \cdot n_K] \cdot 10^{-3}, \quad (3.79)$$

де a'_{22} - радіальний розмір каналу, мм, за табл. 9.2 [1]; n_K – число осьових каналів.

11. Радіальний розмір обмотки з екрану, м:

$$a_{2екр} = a_2 \cdot 0,003, \quad (3.80)$$

Для класів напруг 20 і 35 кВ прийнято збільшення радіального розміру за рахунок екрану і двох шарів міжшарової ізоляції на 0,003 м (3 мм).

Мінімальний радіальний розмір a'_{12} , мм, осьового каналу між обмотками НН і ВН і товщина ізоляційного циліндру обирається за випробувальною напругою обмотки ВН і потужністю трансформатора [1, § 4.5, табл. 4.5]. Розрахунок внутрішнього і зовнішнього діаметрів обмотки, вибір схеми відгалужень і визначення поверхні охолодження виконується аналогічно методу викладеному у вказівках до розрахунку багат шарової циліндричної обмотки з круглого проводу.

3.3.3. Розрахунок неперервної котушкової обмотки вищої напруги [1, с.288]

1. Виконати п.3.3.1.

2. Гранично прийнятний розмір проводу $b_{пр}$, знайдений за допустимим значенням густини теплового потоку:

для мідного проводу

$$b_{пр} \leq q \cdot K_3 / (1.07 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}); \quad (3.81)$$

для алюмінієвого проводу

$$b_{пр} \leq q \cdot K_3 / (1.72 \cdot J_2^2 \cdot 10^{-8}), \quad (3.82)$$

де $K_3=1$ – для гвинтових і котушечних обмоток; q – густина теплового потоку, в межах 800 – 1400 Вт/м²; J_2 – густина струму в обмотці ВН, А/м².

3. За перерізом витка Π_2 з сортаменту обмоткового проводу [1, табл. 5.2] обирається прямокутний провід необхідного перерізу – один чи два-чотири проводи однакового перерізу. Більший розмір проводу b не повинен при цьому мати більший розмір ніж граничний, знайдений за допустимим значенням густини теплового потоку.

Зазвичай потрібному перерізу витка Π_2 в сортаменті обмоткового проводу відповідає декілька значень перерізу проводу з різним відношенням сторін b/a , що дає можливість широкої зміни при розташуванні витків в котушці. Для отримання більш

компактної конструкції обмотки рекомендується обрати більш крупні перерізи при меншому числі паралельних проводів і перерізи з більшим можливим розміром b . При цьому повинні виконуватися наступні вимоги:

1) загальне число котушок повинно бути парним, число різних видів котушок не більше чотирьох;

2) робоча напруга однієї котушки при класі напруги до 35 кВ не повинна бути більша 800-1000 В;

3) при номінальній напрузі ВН 20, 35 кВ і вище всі витки, що служать для регулювання напруги, і витки з посиленою ізоляцією повинні бути розмішені в окремих котушках; котушки, що мають різну кількість витків або відрізняються розмірами чи ізоляцією, при розрахунку для зручності позначаються різними літерами;

4) число витків в котушці повинно бути цілим чи дрібним; в останньому випадку знаменником дробу повинно бути число рейок по колу обмотки;

5) загальна висота обмотки (осьовий розмір) l_2 після сушки і пресування повинна співпадати з висотою обмотки НН l_1 .

Обрані розміри записуються так:

$$\text{Марка проводу} \times \text{число паралельних проводів} \times \frac{\text{Розмір пр. без ізоляції}}{\text{Розмір пр. з ізоляцією}}, \text{ тобто,}$$

$$\text{Марка проводу} \times n_{\phi 2} \times \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'}, \quad (3.83)$$

4. Повний переріз витка, м^2 :

$$P_2 = n_B \cdot P_2'' \cdot 10^{-6}, \quad (3.84)$$

де P_2'' – прийнятий переріз проводу, мм^2 , за табл. 5.2. [1].

5. Густина струму, А/м^2 :

$$J_2 = I_{\phi 2} / P_2, \quad (3.85)$$

6. Число котушок на одному стрижні:

$$n_{\text{КОТ}2} = l_2 \cdot 10^3 / (b' + h_K), \quad (3.86)$$

де $l_2=l_1$ – висота обмотки ВН, що дорівнює висоті обмотки НН, м; b' – розмір проводу ізоляцією, мм; h_K – осьовий розмір (висота) радіального каналу, мм, [1, табл. 9.2].

Осьовий розмір (висота) радіального каналу в масляних трансформаторах потужністю від 160 до 6300 кВА і робочих напруг не більше 35 кВ міняється від 4 до 6 мм.

В двійних котушках, якщо в них не робиться канал, замість каналу прокладаються шайби – по дві шайби товщиною 0,5 мм кожна на одну подвійну котушку.

7. Число котушок при здвоєних котушках з шайбами в двійних котушках і з каналом між подвійними котушками:

$$n_{\text{КОТ}2} = 2l_2 \cdot 10^3 / (2b' + h''_K + \sigma_{ш}), \quad (3.87)$$

де h''_K – висота каналу між здвоєними котушками, мм [1, табл. 9.2]; $\sigma_{ш}=1\text{мм}$ – товщина двох шайб, кожна по 0,5 мм на одну подвійну котушку.

8. Число витків в котушці орієнтовно:

$$W_{КОТ2} = W_2 / n_{КОТ2}, \quad (3.88)$$

9. Радіальний розмір обмотки, м:

$$a_2 = a' \cdot n_{\sigma 2} \cdot W_{КОТ.2}, \quad (3.89)$$

де a' - радіальний розмір проводу, мм; $W_{КОТ.2}$ - число витків котушки, доповнене до найближчого цілого числа.

10. Загальний розподіл витків по котушкам.

11. Розташування котушок на стрижні, [1, рис. 6.15,а].

12. Висота обмотки, м:

з каналами між всіма котушками

$$l_2 = \{b' \cdot n_{КОТ2} + K \cdot [h'_K \cdot (n_{КОТ2} - 2) + h'_{кр}]\} \cdot 10^{-3}, \quad (3.90)$$

з шайбами в подвійних котушках і з каналами між подвійними котушками

$$l_2 = \left\{ b' \cdot n_{КОТ.2} + K \cdot \left[h'_K \cdot \left(\frac{n_{КОТ.2}}{2} - 2 \right) + h'_{кр} + \frac{n}{2} \cdot \sigma \right] \right\} \cdot 10^{-3}, \quad (3.91)$$

де b' - осьовий розмір котушки, мм; $K=0,94 - 0,96$ - коефіцієнт, що враховує усадку ізоляції після сушки і пресування обмотки; h'_K - висота радіального каналу, мм [1, табл. 9.2]; $h'_{кр}$ - висота каналу в місці розриву обмотки і розташування регулювальних витків, [1, §4.5, табл. 4.9].

13. Головна ізоляція. Мінімальна ізоляційна відстань обмоток ВН з врахуванням конструктивних вимог, [1, табл. 4.5].

14. Внутрішній діаметр обмотки, м:

$$D_2' = D_1'' + 2a_{12}, \quad (3.92)$$

де a_{12} - радіальний розмір каналу між обмотками НН і ВН, обирається в залежності від випробувальної напруги [1, табл. 4.5].

15. Зовнішній діаметр обмотки, м²:

$$D_2'' = D_2' + 2a_2, \quad (3.93)$$

16. Поверхня охолодження обмотки, м²:

$$\Pi_{02} = c \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D_2'' + D_2') \cdot l_2, \quad (3.94)$$

17. Густина теплового потоку, Вт/ м²:

$$q_1 = \frac{0.55 \cdot P_K \cdot 10^3}{\Pi_{02}}, \quad (3.95)$$

18. Основні розміри обмоток, [1, рис. 6.15,б].

19. Данні котушок обмотки ВН [1, табл. 6.1].
Значення q_2 повинно бути в межах 800-1400 Вт/м², воно визначає число охолоджуючих каналів.

Глава 4 Розрахунок параметрів короткого замикання [1, гл. 7].

4.1 Визначення втрат короткого замикання

1. Маса металу обмоток, кг:

$$G_{M.i} = K_v \cdot c \cdot D_{СЕР.i} \cdot W_i \cdot \Pi_i, \quad (4.1)$$

де i – належність до обмоток НН ($i=1$) і ВН ($i=2$); $K_v=28$ (для міді) і 8,47 (для алюмінію); c – число активних стрижнів; $D_{СЕР.i}$ – середній діаметр обмоток НН і ВН, м; W_i – число витків відповідної обмотки; Π_i – переріз витка відповідної обмотки, м².

2. Основні електричні втрати в обмотках, Вт :

$$P_{оснi} = K \cdot 10^{-12} \cdot J_i^2 \cdot G_{M.i}, \quad (4.2)$$

де $K=2,4$ (для міді); $K=12,75$ (для алюмінію); J_i – густина струму відповідної обмотки, А/м²; $G_{M.i}$ – маса металу відповідної обмотки, кг.

3. Коефіцієнт додаткових втрат в обмотках НН і ВН, Вт:
для мідного прямокутного проводу

$$K_{д.i} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta_i^2 \cdot a_i^2 \cdot n_i^2, \quad (4.3)$$

для мідного круглого проводу

$$K_{д.i} = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \cdot \beta_i^2 \cdot a_i^2 \cdot n_i^2, \quad (4.4)$$

для алюмінієвого прямокутного проводу

$$K_{д.i} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot \beta_i^2 \cdot a_i^2 \cdot n_i^2, \quad (4.5)$$

для алюмінієвого круглого проводу

$$K_{д.i} = 1 + 0,017 \cdot 10^8 \cdot \beta_i^2 \cdot a_i^2 \cdot n_i^2, \quad (4.6)$$

де $\beta = \frac{b_i \cdot m_i}{l_i} \cdot K_p$ - для прямокутного проводу; $\beta = \frac{d_i \cdot m_i}{l_i} \cdot K_p$ - для круглого проводу; a_i - розмір провідника відповідної обмотки в напрямку, перпендикулярному ліній магнітної індукції поля розсіювання, м; b_i – розмір провідника відповідної обмотки в напрямку, паралельному ліній магнітної індукції поля розсіювання, м; l_i – розмір відповідної обмотки в напрямку, паралельному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання, м; d_i – діаметр провідника відповідної обмотки, м; n_i – число провідників відповідної обмотки в напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання; m_i – число провідників відповідної обмотки в напрямку, паралельному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання; $K_p=0,95$ – коефіцієнт приведення поля розсіювання.

4. Маса металу відводів, кг:

$$G_{\text{від.}i} = l_{\text{від.}i} \cdot \Pi_{\text{від.}i} \cdot \gamma, \quad (4.7)$$

де $l_{\text{від.}i}$ – загальна довжина відводів відповідних обмоток: при з'єднанні в зірку - $l_{\text{від.}i} = 7,5 \ell$; при з'єднанні в трикутник - $l_{\text{від.}i} = 14 \ell$; де ℓ - висота обмотки; $\Pi_{\text{від.}i}$ – переріз витка відповідної обмотки, м²; γ – густина металу обмоток: для міді $\gamma_{\text{м}} = 8900 \text{ кг/м}^3$, для алюмінію $\gamma_{\text{А}} = 2700 \text{ кг/м}^3$.

5. Втрати у відводах, Вт:

$$P_{\text{від.}i} = K \cdot 10^{-12} \cdot J_i^2 \cdot G_{\text{від.}i}, \quad (4.8)$$

де $K=2,4$ (для міді); $K=12,75$ (для алюмінію); J_i – густина струму відповідної обмотки, А/м²; $G_{\text{від.}i}$ - маса металу відводів відповідних обмоток.

6. Втрати в стінках баку та інших елементах конструкції:

$$P_B = 10 \cdot K \cdot S_H, \quad (4.9)$$

де K - коефіцієнт, що залежить від потужності трансформатора [1, табл. 7.1.]; S_H – номінальна потужність трансформатора, кВА.

7. Повні втрати короткого замикання трансформатора, Вт:

$$P_K = P_{\text{очн1}} \cdot K_{\text{Д1}} + P_{\text{очн2}} \cdot K_{\text{Д2}} + P_{\text{омв1}} + P_{\text{омв2}} + P_B, \quad (4.10)$$

де $K_{\text{Д1}}$, $K_{\text{Д2}}$ – коефіцієнт додаткових втрат відповідних обмоток.

Додаткові втрати в обмотках раціонально розрахованих силових трансформаторів з концентричними обмотками зазвичай досягають від 0,5-1,0 до 3,0-5,0 % головних втрат, в деяких випадках до 10 % при прямокутному проводі, і, як правило, не більше 1-2 % при використанні круглого проводу з діаметром не більше 3,55 мм.

8. Відхилення дійсних втрат від заданого значення $P_{\text{кз}}$, %:

$$\Delta P_K = (P_K - P_{\text{кз}}) \cdot 100 / P_{\text{кз}}, \quad (4.11)$$

Знайдені дійсні втрати короткого замикання не повинні відрізнятися від заданих значень більше ніж на 5 %.

4.2 Визначення напруги короткого замикання

1. Активна складова напруги короткого замикання, %:

$$u_a = P_K / (10 \cdot S_H), \quad (4.12)$$

де P_K – втрати короткого замикання, Вт; S_H – номінальна потужність трансформатора, кВА.

2. Реактивна складова напруги короткого замикання, %:

$$u_p = \frac{7.9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot K_p}{u_g^2} \cdot 10^{-1}, \quad (4.13)$$

де $\beta = \pi \cdot d_{12} / l$;

Ширина приведенного каналу розсіювання a_p , м, в тих випадках, коли радіальний розмір обмоток a_1 і a_2 дорівнюють чи мало відрізняються один від одного (в трансформаторах потужністю $S < 10000$ кВА):

$$a_p \approx a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}, \quad (4.14)$$

для трансформаторів $S > 10000$ кВА:

$$a_p \approx \frac{d_{12} \cdot a_{12} + D_{\text{СЕР.1}} a_1 / 3 + D_{\text{СЕР.2}} a_2 / 3}{d_{12}}, \quad (4.15)$$

де d_{12} – середній діаметр каналу між обмотками, м; $D_{\text{сер.1}}$ і $D_{\text{сер.2}}$ – середній діаметр обмоток, м.

При розрахунку u_p , а також при всіх подальших розрахунках необхідно використовувати реальні розміри розрахованих обмоток трансформатора ($a_1, a_2, a_{12}, d_{12}, l$), а не наближені значення β і a_p , які були знайдені при визначенні основних розмірів трансформатора. Весь розрахунок напруги короткого замикання проводиться для одного стрижня трансформатора. Тому при використанні формул для визначення u_p при розрахунку як трьохфазного, так і однофазного трансформатора необхідно підставляти в ці формули струм, напругу і потужність, а також число витків обмотки одного стрижня для номінального режиму.

Коефіцієнт K_p , що враховує відхилення реального поля розсіювання від ідеального паралельного поля:

$$K_p \approx 1 - \sigma, \quad (4.16)$$

$$\sigma - \text{розраховуємо за виразом, } \sigma = (a_{12} + a_1 + a_2) / (\pi \cdot l), \quad (4.17)$$

Зазвичай K_p при концентричному розташуванні обмоток і рівномірному розташуванні витків по їх висоті змінюється в межах від 0,93 до 0,98.

3. Напруга короткого замикання, %:

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}, \quad (4.18)$$

4. Відхилення дійсного u_k від заданого u_{k3} , %:

$$\Delta u_k = \frac{u_k - u_{k3}}{u_{k3}} \cdot 100, \quad (4.19)$$

відхилення не повинно перевищувати 5 %.

4.3 Механічні сили в обмотках

Процес короткого замикання трансформатора, що є аварійним режимом, супроводжується багаторазовим збільшенням струмів в обмотках трансформатора в порівнянні з номінальними струмами, підвищенням нагрівом обмоток і ударними

механічними силами, діючими на обмотки і їх частини. Перевірка обмоток на механічну міцність включає:

- 1) визначення найбільшого усталеного і ударного струму короткого замикання;
- 2) визначення механічних сил між обмотками та їх частинами;
- 3) визначення механічних напруг в ізоляційних опорних і міжкотушкових конструкціях і в проводах обмоток;
- 4) визначення температури обмоток при короткому замиканні обмоток.

1. Діюче значення усталеного струму короткого замикання з врахуванням опору мережі живлення для основного відгалуження обмотки, A :

$$I_{K.B} = \frac{100 \cdot I_H}{u_K \cdot (1 + 100 \cdot S_H / (u_K \cdot S_K))}, \quad (4.20)$$

де I_H – номінальний струм відповідної обмотки, A ; S_H – потужність короткого замикання електричної мережі за [1, табл. 7.2.], МВА; u_K – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Діюче значення найбільшого встановленого струму короткого замикання для трансформаторів потужністю менше 1,0 МВА (якщо прийняти $S_K = \infty$):

$$I_{K.B} = I_H \cdot \frac{100}{u_K}, \quad (4.21)$$

2. Ударний струм короткого замикання, A :

$$i_{KMAX} = \sqrt{2} \cdot K_{MAX} \cdot I_{K.B}, \quad (4.22)$$

де K_{MAX} – коефіцієнт, що враховує максимально можливу аперіодичну складову струму короткого замикання,

$$K_{MAX} = 1 + e^{-\pi \cdot u_a / u_p}, \quad (4.23)$$

В табл. 7.3 [1] приведені значення $\sqrt{2} \cdot K_{MAX}$ для різних відношень u_p і u_a .

3. Радіальна сила, що діє на обмотки, H :

$$F_p = 0.628 (i_{KMAX} \cdot W)^2 \cdot \beta \cdot K_p \cdot 10^{-6}, \quad (4.24)$$

де W – повне число витків однієї з обмоток (для обмотки ВН на середньому ступені). Якщо $I_{K.Y}$ визначаються для обмотки ВН, то і F_p визначається відповідно обмотки ВН. Коефіцієнти K_p , β – [п.3.2]; i_{KMAX} – [п.4.3].

Радіальна сила F_p , що діє на зовнішню обмотку, намагається розтягнути її. Така сама, але направлена протилежно, сила діє на внутрішню обмотку, намагаючись стиснути її. Ці дві сили рівномірно розподілені по колу обох обмоток. Вони найбільш небезпечні для проводів внутрішньої обмотки, що піддаються стисненню і згинанню під дією радіальних сил в проміжках між рейками, на яких намотана обмотка.

4. Середня стискуюча напруга в проводі обмотки НН, МПа:

$$\sigma_{CT.P} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot W_1 \cdot \Pi_1} \cdot 10^{-6}, \quad (4.25)$$

де F_p – радіальна сила, Н; W_1 – число витків обмотки НН; Π_1 – площа поперечного перерізу одного витку, м².

5. Середня напруга розтягування в проводах обмотки ВН, МПа:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot W_2 \cdot \Pi_2}, \quad (4.26)$$

де F_p – радіальна сила, Н; W_2 – число витків обмотки ВН; Π_2 – площа поперечного перерізу одного витка, м².

Таблиця 4.3. Припустиме значення σ_p і $\sigma_{ст}$.

Матеріал	Мідь			Алюміній
S ₁ , кВА	до 1600	до 6300	Більше 6300	до 6300
σ_p , МПа	30-40	50-60	100-150	22-25
$\sigma_{ст}$, МПа	-	18-20	35-40	16-18

6. Осьова сила при концентричних обмотках, Н:

$$F'_{OC} = F_p \frac{a_p}{2 \cdot l}, \quad (4.27)$$

Осьова сила F'_{OC} є сумою елементарних осьових сил, прикладених до окремих провідників обмотки і направлених вниз у верхній половині і вверх у нижній половині обмотки. Максимального значення F'_{OC} досягає на середині висоти обмотки.

7. Осьові сили при наявності розриву по висоті обмотки ВН, через відключення регулюючих витків чи катушок, Н:

$$F''_{OC} = F_p \frac{l_x}{l'' \cdot k_p \cdot m}, \quad (4.28)$$

де l_x – відстань між крайніми витками зі струмом при роботі трансформатора на нижньому ступені обмотки ВН, м, [1, рис.7.11 і 7.12]; l'' – середня приведена довжина індукційної лінії поперечного поля розсіювання. Визначається як відстань від стрижня до стінки баку, м, [1, рис. 7.12,б]; m – постійний множник за [1, рис. 7.11].

8. Після визначення F_p , F'_{OC} , F''_{OC} необхідно знайти максимальне значення стискаючої сили $F_{ст}$ і сили, діючої на ярмо, $F_{я}$, [1, рис. 7.11].

9. Напруга стиснення на опорних поверхнях, МПа:

$$\sigma_{ст} = \frac{F_{ст}}{n \cdot a \cdot b} \cdot 10^{-6}, \quad (4.29)$$

де $F_{ст}$ – максимальне значення стискаючої осьової сили, Н, [1, рис. 7.11]; n – число прокладок по колу обмотки; a – радіальний розмір обмотки, м; b – ширина прокладки, м, від 0,04 до 0,06 м.

Значення σ_p і $\sigma_{ст}$ повинні бути в межах, вказаних в табл. 4.3

10. Час нагріву обмоток до гранично допустимої температури (мідь - 250° С, алюміній -200° С), с:

мідні обмотки

$$t_{K200} = 2.5 \cdot [u_k / (J \cdot 10^{-6})]^2, \quad (4.30)$$

алюмінієві обмотки

$$t_{K200} = 0.79 \cdot [u_k / (J \cdot 10^{-6})]^2, \quad (4.31)$$

11. Гранична умовна температура обмотки, °С, через час t_k , с, після виникнення короткого замикання:

мідні обмотки

$$g_{KM} = \frac{670 \cdot t_K}{12.5 \cdot [u_K / (J \cdot 10)]^2 - t_K} + g_H, \quad (4.32)$$

алюмінієві обмотки

$$g_{KA} = \frac{670 \cdot t_K}{5.5 \cdot [u_K / (J \cdot 10)]^2 - t_K} + g_H, \quad (4.33)$$

де t_k – найбільша протяжність короткого замикання на виводах масляного трансформатора, приймається при короткому замиканні на сторонах з номінальною напругою 35 кВ і нижче – 4 с; J – густина струму при номінальному навантаженні, А/м²; $g_H = 90$ °С – початкова температура обмотки.

Глава 5. Остаточний розрахунок магнітної системи трансформатора [1, гл. 8]

При остаточному розрахунку магнітної системи знаходять: число ступенів в перерізі стрижня і ярма, розміри пакетів сталі, розташування і число охолоджувальних каналів, повні і активні перерізи стрижня і ярма, висота і відстань між осями стрижнів, маса сталі вузлів магнітної системи і повна маса магнітної системи трансформатора. Після встановлення всіх розмірів і маси сталі, визначають втрати і струм холостого ходу трансформатора.

5.1 Визначення розмірів магнітної системи і маси сталі [1, 8.1]

1. Рекомендації по конструктивному виконанню осердя трансформатора. Для трьохфазних трансформаторів з номінальною потужністю 1-80 МВА застосовується трьох стрижнева несиметрична магнітна система, збирається з пластин холоднокатаної текстурованої сталі марок 3404, 3405, 3406 та інші з товщиною пластин 0,35, 0,3 і 0,27 мм, з жаростійким покриттям в якості міжлистової ізоляції за рис.8.14 [1]. Холоднокатана текстурована сталь в напрямку прокату має кращі магнітні властивості, ніж в напрямку поперек прокату. Тому з метою зменшення розмірів місць, де напрям магнітного потоку не співпадає з напрямком прокату, в трифазних трансформаторах на крайніх стрижнях робляться косі стики листів. Пресування стрижнів виконують бандажами з склострічки, пресування ярем – стальними напівбандажами чи шпильками, що проходять за межами активної сталі [1, табл. 2.8]. В масляних трансформаторах при напрузі обмоток ВН від 150кВ і вище краще з'єднувати верхні і нижні ярмові балки пресуючими пластинами стрижня, покладеними під бандаж по осі крайнього пакету стрижня і закріпленими механічно з ярмовими балками. Для поліпшення характеристик сталі, після різки листів і закачуванням задирок виконуються випалювання.

2. Розміри пакетів стрижня і ярма, число ступенів в перерізі стрижня і ярма в залежності від розрахованого діаметру d_n обирається за табл. 8.2-8.5 [1].

3. Площа ступінчатої фігури стрижня, ярма і об'єм кута магнітної системи за [1, табл.8.6 і 8.7]. Ширина ярма дорівнює загальній товщині пакетів стрижня (всі розміри в м, m^2 чи m^3).

4. Активний переріз стрижня, m^2 :

$$\Pi_C = K_3 \Pi_{\phi C}, \quad (5.1)$$

де K_3 – коефіцієнт заповнення перерізу стрижня (чи ярма) сталлю [1, табл. 2.2 і 2.3].

5. Активний переріз ярма, m^2 :

$$\Pi_Y = K_3 \Pi_{\phi Y}, \quad (5.2)$$

6. Об'єм сталі кута магнітної системи, m^3 :

$$V_{K.CT} = K_3 V_K, \quad (5.3)$$

7. Довжина стрижня, м:

$$l_c = l + (l'_o + l''_o), \quad (5.4)$$

де l - висота обмотки, м; l'_o, l''_o – відстань від обмотки ВН до верхнього і нижчого ярма, м.

8. Відстань між осями стрижнів, м:

$$C = D_2'' + a_{22}, \quad (5.5)$$

Маси сталі в стрижнях і ярмах магнітної системи розраховуються за [1, (8.6), (8.8) – (8.13)].

9. Маса сталі кута магнітної системи, кг:

$$G_K = V_{K.CT} \cdot \gamma_{CT}, \quad (5.6)$$

де γ_{CT} - густина холоднокатаної сталі 7650 kg/m^3 .

10. Маса сталі ярем, кг:

$$G_Y = G'_Y + G''_Y = 2\Pi_Y \cdot 2C \cdot \gamma_{CT} + 2G_K, \quad (5.7)$$

де $G'_Y = 2(c-1)C \cdot \Pi_Y \cdot \gamma_{CT}$ - маса частин ярем, укладених між осями крайніх стрижнів, кг [1, рис. 8.3]; $G''_Y = 2G_K$ - маса сталі в частинах ярем, кг, заштрихованих на рис. 8.3 [1]; $c = 3$ - число активних стрижнів; C - відстань між осями стрижнів, м.

11. Маса сталі стрижнів, кг:

$$G_C = G'_C + G''_C = c\Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{CT} + c(\Pi_c \cdot a_{1Y} \cdot \gamma_{CT} - G_K), \quad (5.8)$$

де $G'_C = c\Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{CT}$ - маса сталі стрижнів в межах вікна магнітної системи, кг; $G''_C = c(\Pi_c \cdot a_{1Y} \cdot \gamma_{CT} - G_K)$ - маса сталі в місцях стику пакетів стрижня і ярма, кг; Π_c – m^2 ;

c - число стрижнів; l_c - довжина стрижня, м; $a_{1я}$ - ширина ярма, що стикується, м; $\gamma_{ст}$ - густина трансформаторної сталі, 7650 кг/м³.

12. Загальна маса сталі, кг:

$$G_{ст} = G_{я} + G_c, \quad (5.9)$$

5.2 Визначення втрат холостого ходу

1. Фактична індукція в стрижні, Тл:

$$B_c = \frac{u_\epsilon}{4.44 f_1 \cdot \Pi_c}, \quad (5.10)$$

2. Фактична індукція в ярмі, Тл:

$$B_{я} = \frac{u_\epsilon}{4.44 f_1 \cdot \Pi_{я}}, \quad (5.11)$$

3. Індукція на косому стикуванні, Тл:

$$B_{кос} = B_c / \sqrt{2}, \quad (5.12)$$

4. Площі перерізу немагнітних зазорів на прямому стику середнього стрижня дорівнюють відповідно активним перерізам стрижня і ярма;

5. Площа перерізу стрижня на косому стику:

$$\Pi_{кос} = \sqrt{2} \cdot \Pi_c, \quad (5.13)$$

6. Втрати холостого ходу, Вт:

$$P_x = k_{п.д} p_c (G_c + 0.5 k_{п.у} G_y) + k_{п.д} p_{я} (G_{я} - 6 G_y + 0.5 k_{п.у} G_y), \quad (5.14)$$

де $k_{п.у}$ – коефіцієнт, що враховує кількість кутів з прямими і косими стиками [1, табл.8.13]; $k_{п.д}$ – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати, що викликані різанням задирок тощо [1, табл.8.14] $p_{я}$ - питомі втрати в сталі ярма, Вт/кг [1, табл.8.10];

7. Відхилення фактичних втрат холостого ходу від заданого (P_{03}) %

$$\Delta P_0 = (P_0 - P_{03}) \cdot 100 / P_{03}, \quad (5.15)$$

не повинне перевищувати 7,5%.

5.3 Визначення струму холостого ходу

1. За даними табл. 8.17 знаходимо питомі потужності, що намагнічуються, у функції від індукції: в стрижні q_c і ярмі $q_{я}$; в стрижні на прямому стику $q_{с.з}$ в стрижні на косому стику $q_{кос}$; в ярмі на прямому стику $q_{я.з}$.

2. Для прийнятої конструкції магнітної системи і технології її виготовлення використовуємо (8.43) [1], в якому по § 8.3 і табл. 8.12 і 8.21 приймаємо коефіцієнти: $K_{T,P}$ – коефіцієнт, що враховує вплив різання смуги рулону на пластини: для відпаленої сталі марок 3404 і 3405 $K_{T,P} = 1,18$, для невідпаленої - 1,49; $K_{T,З}$ - коефіцієнт, що враховує вплив зрізання задирок: для відпалених пластин $K_{T,З} = 1,0$ і для невідпалених - 1,01. Якщо задирки не зняті, то відповідно 1,02 і 1,05; $K_{T,Y}$ - коефіцієнт, що враховує форму стиків на крайніх і середніх стрижнях [1, таол.8.20]; $K_{T,Пл}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення потужності, що намагнічується, в кутках магнітної системи залежно від ширини пластини другого пакету a_2 для холоднокатаної сталі [1, табл.8.21]; $K_{T,Я}$ – коефіцієнт, що враховує форму перерізу ярма: для багатоступеневого перетину ярма - $K_{T,Я} = 1,0$; при співвідношенні числа ступенів стрижня і ярма, яке дорівнює трьом, $K_{T,Я} = 1,04$; при співвідношенні рівному шести, $K_{T,Я} = 1,06$; для ярма прямокутного перетину $K_{T,Я} = 1,07$; $K_{T,П}$ - коефіцієнт, що враховує пресування магнітної системи по табл. 8.12 [1]; $K_{T,Ш}$ - коефіцієнт, що враховує перешихтовку верхнього ярма, дорівнює 1,01 при потужності трансформатора до 250 кВА; 1,02 при потужностях 400 - 630 кВА; 1,04-1,08 при потужностях 1000-6300 кВА і 1,09 при потужностях 10000 кВА і більше.

3. Потужність намагнічування холостого ходу, вар:

$$Q_X = [K_{T,P} \cdot K_{T,З} \left(q_C \cdot G_C + q_Y \cdot G'_Y - 4 \cdot q_Y \cdot G_Y + \frac{q_C + q_Y}{2} \cdot K_{T,Y} \cdot K_{T,Пл} \cdot G_Y \right) + 4 \cdot q_{КОС} \cdot \Pi_{3,КОС} + 1 \cdot q_{С,З} \cdot \Pi_C + 2 \cdot q_{Я,З} \cdot \Pi_Y] \cdot K_{T,Я} \cdot K_{T,П} \cdot K_{T,Ш} \quad (5.16)$$

4. Струм холостого ходу, %:

$$i_0 = Q_X / (10S_H), \quad (5.17)$$

де Q_X – вар; S_H – кВА.

5. Активна складова струму холостого ходу, %:

$$i_{0A} = P_X / (10S_H), \quad (5.18)$$

6. Реактивна складова струму холостого ходу, %:

$$i_{0P} = \sqrt{i_0^2 - i_{0A}^2}, \quad (5.19)$$

Відхилення не повинне бути більше 15%.

Глава 6. Тепловий розрахунок трансформатора

Мета теплового розрахунку трансформатора полягає:

- 1) у визначенні перепадів температури між обмотками і магнітною системою, з одного боку, і маслом - з іншою;
- 2) у підборі конструкції і розмірів бака і системи охолодження, що забезпечують нормальну тепловіддачу всіх втрат при температурах обмоток, магнітної системи і масла, що не перевищує допустимі температури;

3) у перевірочному розрахунку перевищень температури обмоток, магнітної системи і масла над навколишнім повітрям.

6.1 Тепловий розрахунок обмоток

1. Внутрішній перепад температури в обмотці НН, °С:

$$\Theta_{01} = q_1 \sigma / \lambda_{iz}, \quad (6.1)$$

де σ - товщина ізоляції проводу на одну сторону, м; $q_1 = P_{OCH1} / \Pi_{01}$ - густина теплового потоку, Вт/м²; λ_{iz} - теплопровідність ізоляції, Вт/(м °С) [1, табл.9.1].

2. Перепад температури на поверхні обмотки НН, °С :

а) для циліндричних і гвинтових обмоток, що мають радіальні (горизонтальні) канали, а також при осьових (вертикальних) каналах в обмотці шириною не менше ніж [1, табл. 9.2, а]

$$\Theta_{O.M.1} = 0,285 \cdot q_1^{0.6}, \quad (6.2)$$

б) для гвинтових і котушкових обмоток за рис. 9.12 [1]

$$\Theta_{O.M.2} = K_1 K_2 K_3 0,35 \cdot q_1^{0.6}, \quad (6.3)$$

де для природного масляного охолодження $K = 1,0$; для масляного охолодження з дуттям $K_1 = 0,9$; для масляного охолодження з примусовою циркуляцією масла $K_1 = 0,7$. Коефіцієнт K_2 для зовнішніх обмоток ВН - 1,0; для внутрішніх обмоток НН і СН -1,1. Коефіцієнт K_3 визначається за табл. 9.3 [1].

3. Середнє перевищення температури обмотки НН над температурою масла, °С:

$$\Theta_{O.M.CP1} = \Theta_{01} + \Theta_{O.M.1}, \quad (6.4)$$

4. Внутрішній перепад температури в обмотці ВН, °С :

а) обмотка котушки з прямокутного проводу

$$\Theta_{02} = q_2 \delta / \lambda_{iz}, \quad (6.5)$$

де $q_2 = P_{OCH2} / \Pi_{02}$ - густина теплового потоку обмотки вищої напруги, Вт/м², δ - товщина ізоляції проводу на одну сторону, м, [1, рис.9.9]

б) циліндрична обмотка з прямокутного проводу

$$\Theta_{02} = P \cdot a_2^2 / (8 \cdot \lambda_{CP}), \quad (6.6)$$

де P - втрати 1 м³ об'єму обмотки, Вт/м³;

$$P = K_P \cdot J_2^2 \cdot a \cdot b \cdot 10^{-8} / [(a' + \delta_{MШ}) b'], \quad (6.7)$$

де $K_P = 2,14$ (для міді); 3,44 - (для алюмінію); a, a' - розміри проводу в напрямі потоку тепла, м; b, b' - розміри проводу в перпендикулярному напрямі, м; $\delta_{M.C}$ - товщина міжшарової ізоляції, м, [1, табл. 4.7]; a_2 - радіальний розмір обмотки, м; за наявності в обмотці осьового охолоджуючого каналу за рис. 5.22, в, г або д розмір a потрібно

визначати як ширину - радіальний розмір найширший для двох котушок, на які розділена обмотка; λ_{CEP} – середня теплопровідність обмотки, Вт/(м ° С); $\lambda_{MII} = \lambda_{iz}$ – теплопровідність міжшарової ізоляції за [1, табл.9.1].

$$\lambda_{CEP} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{MII} (a' + \delta_{MII})}{\lambda \cdot \delta_{MII} + \lambda_{MII} a'}, \quad (6.8)$$

$$\lambda = \frac{\lambda_{iz} \cdot b \cdot a' (a' + \delta_{MII})}{2\delta \cdot b'}, \quad (6.9)$$

де 2δ - двостороння товщина ізоляції, м.

в) циліндрична обмотка з круглого проводу ° С

$$\Theta_{02} = P \cdot a_2^2 / (8 \cdot \lambda_{CEP}), \quad (6.10)$$

де $P = K'_p \cdot J_2^2 \cdot d \cdot 10^{-8} / [(d' + \delta_{MII}) d']$, Вт/м³, для мідного проводу $K'_p = 1,68$; для алюмінієвого проводу $K'_p = 2,71$; d, d', δ_{MII} – виражені в метрах; J_2 – густина струму в обмотці, А/м².

$$\lambda_{CEP} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{MC} (d' + \delta_{MC})}{\lambda \cdot \delta_{MC} + \lambda_{MC} d'}, \quad (6.11)$$

де λ_{MII} - теплопровідність міжшарової ізоляції за [1, табл. 9.1].

$$\lambda = \lambda_{iz} / \left[0.7 \sqrt{\frac{d' - d}{d}} \right], \quad (6.12)$$

де λ_{iz} - теплопровідність матеріалу ізоляції витків [1, табл. 9.1].

г) якщо обмотка намотана безпосередньо на ізоляційному циліндрі та має одну відкриту поверхню, то

$$\Theta_{0.2} = \frac{0,28 \cdot P \cdot a^2}{\lambda_{CEP}}, \quad (6.13)$$

Найбільш нагріта зона зміщується від центру перерізу обмотки в бік циліндра приблизно до $0,75a$ від зовнішньої поверхні.

5. Коливання температури на поверхні обмотки ВН °С:

Виконується за методикою, викладеною в п. 6.1 для обмотки НН.

6. Середнє перевищення температури обмотки ВН над температурою масла, °С:

$$\Theta_{O.M.CEP2} = \Theta_{02} + \Theta_{O.M.2}, \quad (6.14)$$

7. Припустиме перевищення температури масла над повітрям, °С:

$$\Theta_{M.B} = 65 - \Theta_{O.M.CEP}, \quad (6.15)$$

де $\Theta_{O.M.CEP}$ - більше зі значень $\Theta_{O.M.CEP1}$ і $\Theta_{O.M.CEP2}$

8. Припустимо перевищення температури стінки бака над температурою повітря, °С:

$$\Theta_{Б.В} = \Theta_{М.В} - \Theta_{МБ}, \quad (6.16)$$

де $\Theta_{МБ}$ - перепад температури між маслом і стінкою бака, що дорівнює 5-6 ° С.

9. Температура масла у верхніх шарах, °С:

$$\Theta_{МБВ} = 1,2\Theta_{Б.В}, \quad (6.17)$$

Ця температура не повинна бути вищою 55°С. Якщо ця умова не виконується, то $\Theta_{Б.В}$ визначається з виразу $\Theta_{Б.В} = 45,5 - \Theta_{МБ}$

6.2. Тепловий розрахунок бака

Втрати в трансформаторі пов'язані з його потужністю, тому при виборі конструкції бака слід орієнтуватися на потужність трансформатора [1, табл. 9.4]. Далі відповідно до рекомендацій гл.4 (див. табл. 4.11 і 4.12 [1]) провести визначення ізоляційних проміжків від відводів до обмотки ВН і стінки бака [1, рис. 9.18]:

S_1 - ізоляційна відстань від відводу обмотки ВН до стінки бака за [1, табл.4.11];

S_2 - ізоляційна відстань від відводу обмотки ВН до балки пресування яра за [1, табл. 4.11];

d_2 - діаметр ізольованого відводу обмотки ВН при U=10 і 35 кВ, $d_2 = 20$ мм при $S \leq 10000$ кВА і $d_2 = 25$ мм при великих потужностях;

S_3 - ізоляційна відстань від відводу обмотки НН до стінки бака за [1,табл.4.11];

S_4 - ізоляційна відстань від відводу обмотки НН до обмотки ВН за [1, табл.4.12];

d_1 - діаметр ізольованого відводу обмотки НН, що дорівнює d_2 або розмір неізольованого відводу НН (шини), дорівнює 10-15мм.

1. Мінімальна ширина бака, м:

$$B = D_2'' + (S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2) \cdot 10^{-3}, \quad (6.18)$$

2. Мінімальна довжина бака трифазного трансформатора класів напруг 6,10 і 35 кВ, м:

$$A = 2C + D_2'' + 2S_5 \cdot 10^{-3}, \quad (6.19)$$

де C - відстань між осями стрижнів, м; D_2'' - зовнішній діаметр обмотки ВН, м; S_5 - відстань від зовнішньої поверхні обмотки ВН до стінки бака [1,рис. 9.13, стр.429], мм

$$S_5 = S_3 + d_1 + S_4, \quad (6.20)$$

3. Висота активної частини трансформатора, м:

$$H_{a.ч} = l_C + 2h_{я} + n \cdot 10^{-3}, \quad (6.21)$$

де n - товщина прокладки під нижнє яро ($n = 30 \div 50$ мм).

4. Загальна глибина бака, м:

$$H_B = H_{a.c} + H_{я.к}, \quad (6.22)$$

де $H_{я.к}$ - відстань від верхнього ярма до кришки бака, визначається за табл. 9.5 [1].

Бак з навісними радіаторами

1. Габаритний розмір радіатора, м:

$$A_p \leq H_B - 0,34, \quad (6.23)$$

За табл. 9.9 або 9.10 [1] вибираються радіатори з відстанями між осями фланців A_p з поверхнею труб $\Pi_{т.р}$ і колекторів $\Pi_{к.к}$. Для установки цих радіаторів глибина бака повинна бути прийнята

$$H_B = A_p + c_1 + c_2, \quad (6.24)$$

де c_1 і c_2 - відстань осей фланців радіатора від нижнього і верхнього зрізів стінки баків за табл. 9.9 [1].

2. Поверхня конвекції гладкої стінки бака, m^2 :

$$\Pi_{к.гл} = H_B [2(A - B) + \pi \cdot B], \quad (6.25)$$

3. Орієнтовна поверхня випромінювання бака з радіаторами, m^2 :

$$\Pi_B = K \cdot \Pi_{к.гл}, \quad (6.26)$$

де K – коефіцієнт, що враховує оснащення бака: для гладкого бака $K = 1,0$; для бака з навісними радіаторами $K = 1,5 \div 2,0$.

4. Орієнтована необхідна поверхня конвекції для заданого значення $\Theta_{БВ}$, m^2 :

$$\Pi'_K = \frac{1.05(P_K + P_0)}{2.5 \cdot \Theta_{БВ}^{1.25}} - 1,12 \cdot \Pi_B, \quad (6.27)$$

де P_K і P_0 – виражені у ватах.

Поверхня конвекції складається з:

- поверхні конвекції гладкого бака $\Pi_{к.гл}$
- поверхні кришки бака, m^2 .

$$\Pi_{к.кр} = 0,5 \cdot [(A - B)(B + 0,16) + \pi \cdot (B + 0,16)^2 / 4], \quad (6.28)$$

5. Поверхня конвекції радіаторів, m^2 :

$$\sum \Pi_{к.р} = \Pi'_K - \Pi_{к.гл} - \Pi_{к.кр}, \quad (6.29)$$

6. Поверхня конвекції радіатора, приведена до поверхні гладкої стінки, m^2 :

$$\Pi_{K.P} = \Pi_{TP} K_{\phi} + \Pi_{KK}, \quad (6.30)$$

де Π_{TP} , Π_{KK} – визначаються за табл. 9.9 і 9.10 [1]; K_{ϕ} – за табл. 9.6 [1].

7. Необхідна кількість радіаторів:

$$n_P = \sum \Pi_{KP} / \Pi_{KP}, \quad (6.31)$$

8. Поверхня конвекції бака, м²:

$$\Pi_K = \sum \Pi_{KP} + \Pi_{K.ГЛ} - \Pi_{K.KP}, \quad (6.32)$$

де $\sum \Pi_{KP} = n_P \cdot \Pi_{KP}$ – сумарна поверхня конвекції радіаторів.

9. Поверхня випромінювання визначається після виконання ескізу розташування радіаторів на стінках бака, м²:

$$\Pi'_B = p_B \cdot H_B, \quad (6.33)$$

де p_B – реальний периметр випромінювання, що визначений за ескізом з урахуванням розмірів радіаторів (рис. 10.8 [1]), м; H_B – висота бака, м.

6.3 Розрахунок перевищень температури обмоток і масла трансформатора

1. Середнє перевищення температури стінки бака в порівнянні з температурою навколишнього повітря °С:

$$\Pi'_K = \left[\frac{K \cdot (P_K + P_0)}{2.5\Pi'_B + 2.5\Pi_K} \right]^{0.8}, \quad (6.34)$$

де $K = 1,05 - 1,10$; P_K та P_0 – у Вт.

2. Середнє перевищення температури масла біля стінки бака, °С:

$$\Theta_{MB} = 0,165 \cdot K_1 \left[\frac{K \cdot (P_K + P_0)}{\sum \Pi_P + \Pi_{K.ГЛ} + 0,5\Pi_{K.KP}} \right]^{0.6}, \quad (6.35)$$

де $K_1 = 1$ – для природного масляного охолодження; $\sum \Pi_P$ – поверхня конвекції радіаторів без урахування K_{ϕ} , тобто $K_{\phi} = 1,0$.

3. Перевищення середньої температури масла над температурою повітря, °С:

$$\Theta_{M.B} = \Theta_{MB} + \Theta_{B.B}, \quad (6.36)$$

4. Перевищення температури масла у верхніх шарах в порівнянні з температурою повітря, °С:

$$\Theta_{MBB} = 1,2\Theta_{M.B} \leq 60, \text{°С}, \quad (6.37)$$

5. Перевищення середньої температури обмоток над температурою повітря, °С:

$$\text{НН} \quad \Theta_{O.B.1} = \Theta_{O.M.CEP.1} + \Theta_{B.B} + \Theta_{MB} \leq 60 - 65 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.38)$$

$$\text{ВН} \quad \Theta_{O.B.2} = \Theta_{O.M.CEP.2} + \Theta_{B.B} + \Theta_{MB} \leq 60 - 65 \text{ } ^\circ\text{C}, \quad (6.39)$$

Перевищення температури масла у верхніх шарах $\Theta_{MBB} \leq 60 \text{ } ^\circ\text{C}$ і обмоток $\Theta_{O.B} < 65 \text{ } ^\circ\text{C}$ лежать в межах допустимого нагріву за ДСТУ.

6.4 Визначення маси масла і основних розмірів розширювача

1. Об'єм активної частини трансформатора, м³:

$$V_{AЧ} = G_{AЧ} / \gamma_{AЧ}, \quad (6.40)$$

де $\gamma_{AЧ}$ - середня густина активної частини: (5,5-6)10 кг/м³ - для мідних обмоток; (5-5,5)10 кг/м³ - для алюмінієвих обмоток.

2. Об'єм бака трансформатора, м³:

$$V_B = (2C + 0,25 \pi B) V H_B, \quad (6.41)$$

де C, B, H_B – в метрах.

3. Маса масла у баці, кг:

$$G_{M.B} = 0,9(V_B - V_{AЧ}) \cdot 10^3, \quad (6.42)$$

4. Маса масла в радіаторах, кг:

$$G_{M.TP} = N \cdot G_{M.P}, \quad (6.40)$$

де N – кількість радіаторів; $G_{M.P}$ – маса масла в радіаторі [1, табл.9.9; 9.10].

5. Загальна маса масла в трансформаторі, кг:

$$G_M = 1,05(G_{M.B} - G_{M.TP}), \quad (6.43)$$

де 1,05 - коефіцієнт, що враховує масу масла в розширювачі.

6. Об'єм розширювача прийняти рівним 8-10% об'єму масла в баку і радіаторах. При цьому розширювач виконує наступну функцію: по-перше, при будь-яких коливаннях температури верхній рівень масла залишається в межах розширювача, по-друге, він сприяє збереженню (консервації) масла, оскільки дозволяє звести до мінімуму поверхню зіткнення (дзеркало) масла з повітрям. Якщо внутрішній об'єм розширювача сполучається з навколишнім повітрям, то на шляху руху повітря встановлюється фільтр, заповнений сорбентом – речовиною поглинаючим вологу з повітря, що поступає в розширювач.

Глава 7. Розрахунок характеристик трансформатора

7.1 Розрахунок зовнішньої характеристики трансформатора

Розрахувати і побудувати зовнішню характеристику трансформатора $U_2 = f(K_{HT})$ при $\cos \varphi = 0,8$, враховуючи, що $U_2 = U_{2H} - \Delta U$. Прийняти $U_{2H} = 100\%$, $\Delta U = K_{HT}(u_{KA} \cos \varphi_2 + u_{KP} \sin \varphi_2)\%$, $K_{HT} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$.

7.2. Розрахунок характеристики КПД трансформатора.

Розрахувати і побудувати характеристику КПД трансформатора $\eta = f(K_{HT})$ при $\cos \varphi_2 = 0.8$ використовуючи розрахункову залежність:

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + K_{HT}^2 \cdot P_K}{K_{HT} \cdot S_H \cdot \cos \varphi + P_0 + K_{HT}^2 \cdot P_K} \right) 100, \quad (7,1)$$

Дані розрахунків представити у формі таблиці.

Перелік посилань

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. - М.: Энергоатомиздат, 1986.-528С.
2. Гончарук А.И. Расчет и конструирование трансформаторов: Учеб. для техникумов.- М.: Энергоатомиздат 1990. -256 с: ил.
3. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л. : Энергия, 1974.- 840 с.
4. Костенко П.М., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Енергия, 1972. – 544 с.
5. Дымков А.М. Расчет и конструирование трансформаторов. – М.: Высш.шк., 1971. – 320с.
- 6.Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. - М.; Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 360 с.
7. Методичні вказівки до виконання графічної частини курсового проекту «Розрахунок і конструювання силового трансформатора» з дисципліни «Електричні машини». – Дніпропетровськ: ДГІ, 1986. – 37с.

ЗАВДАННЯ № _____ НА ПРОЕКТ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРУ

Видано студенту _____ групи _____

Виконати розрахунок і конструктивну розробку силового трансформатору з наступними даними:

1. Номінальна потужність _____ кВА
2. Число фаз _____
3. Частота _____ Гц
4. Номінальна напруга обмотки ВН _____ кВ
5. Номінальна напруга обмотки НН _____ кВ
6. Схеми та групи з'єднання обмоток
7. Система охолодження – природне масляне
8. Режим роботи – довготривале навантаження
9. Розташування зовнішнє

Параметри трансформатору

1. Втрати холостого ходу _____ Вт
2. Втрати короткого замикання _____ Вт
3. Напруга короткого замикання _____ %
4. Струм холостого ходу _____ %

Додаткові умови

Обмотка з _____ проводу.

Проект трансформатору повинен бути зроблений у відповідності з ДСТУ 11677-85

Завдання видано «__» _____ 200__ г.

Керівник проекту _____

Міністерство освіти і науки України
Національний гірничий університет

Кафедра електричних машин

Розрахунково-пояснювальна записка
до курсового проекту
«Розрахунок і конструювання силового трансформатору»

Проект виконав
Студент групи _____
_____ факультету

(прізвище, ініціали)
Керівник проекту

(посада, прізвище, ініціали)

Дніпропетровськ
200__р.

Зміст

1. Мета і завдання курсового проекту	3
2. Основні вимоги до проекту	3
3. Оформлення проекту	4
4. Вихідні дані проекту	5
5. Рекомендації по виконанню розрахунку трансформатору	40
6. Список рекомендованої літератури	41
7. Додатки	