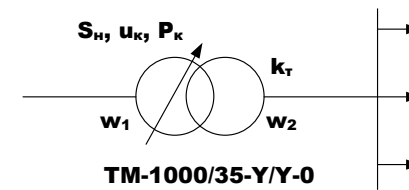


С. М. Левицький, І. В. Бальзан, Ю. В. Шевчук

РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ КУРСОВЕ ПРОЕКТУВАННЯ



Міністерство освіти і науки України
Вінницький національний технічний університет

С. М. Левицький, І. В. Бальзан, Ю. В. Шевчук

**РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ
ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**
Курсове проектування

Навчальний посібник

Вінниця
ВНТУ
2018

УДК 621.314.25 (075)
ЛЗ7

Рекомендовано до друку Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (протокол № 3 від 24.09.2015 р.)

Рецензенти:

О. П. Чорний, доктор технічних наук, професор
О. В. Садовой, доктор технічних наук, професор
В. М. Кухарчук, доктор технічних наук, професор
Ю .В. Булига, кандидат технічних наук, доцент

Левицький, С. М.

ЛЗ7 Розрахунок і проектування трифазних трансформаторів.
Курсове проектування : навчальний посібник / Левицький С. М.,
Бальзан І. В., Шевчук Ю. В. – Вінниця : ВНТУ, 2018. – 127 с.

В навчальному посібнику викладено методику розрахунку активної частини трифазних трансформаторів, наведено відомості, необхідні для вибору елементів пасивної частини силового трансформатора. Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за спеціальністю «Електротехніка та електротехнології».

УДК 621.314.25 (075)

© ВНТУ, 2018

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Проектне завдання.....	5
1 Розрахунок основних електричних величин.....	8
2 Попередній розрахунок трансформатора.....	10
2.1 Активна частина трансформатора.....	10
2.2 Вартість активної частини трансформатора.....	17
2.3 Втрати і струм холостого ходу.....	21
2.4 Середня густина струму в обмотках.....	27
2.5 Механічні напруження у проводі обмоток.....	27
2.6 Послідовність визначення оптимального варіанта.....	27
2.7 Результати розрахунку ORTR.....	30
3 Розрахунок оптимального варіанта трансформатора.....	32
3.1 Вибір типу обмоток.....	32
3.2 Розрахунок обмотки низької напруги.....	33
3.2.1 Двошарова циліндрична обмотка.....	34
3.2.2 Гвинтова обмотка.....	40
3.2.3 Багатошарова циліндрична обмотка.....	45
3.2.4 Неперервна спіральна котушечна обмотка.....	48
3.3 Розрахунок обмотки високої напруги.....	55
3.3.1 Багатошарова циліндрична обмотка високої напруги.....	56
3.3.2 Неперервна спіральна котушечна обмотка високої напруги ...	58
3.4 Розрахунок характеристик короткого замикання.....	62
3.4.1 Втрати короткого замикання.....	62
3.4.2 Напруга короткого замикання.....	65
3.5 Механічні сили і напруги в обмотках.....	67
3.6 Розрахунок магнітної системи.....	71
3.6.1 Маса магнітної системи.....	71
3.6.2 Втрати холостого ходу.....	72
3.6.3 Струм холостого ходу.....	73
3.7 Тепловий розрахунок трансформатора.....	74
3.7.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом.....	75
3.7.2 Вибір і розрахунок системи охолодження.....	77
3.7.3 Розрахунок поверхні охолодження.....	80
3.7.3.1 Розрахунок поверхні охолодження баку з гладкими стінами.....	80

3.7.3.2 Розрахунок поверхні охолодження баку з трубами	80
3.7.3.3 Розрахунок поверхні охолодження баку з навісними радіаторами	82
3.7.4 Визначення фактичних перегрівів.....	84
3.8 Техніко-економічні показники трансформатора	85
4 Конструювання трансформатора	87
4.1 Конструктивна схема трансформатора.....	87
4.2 Магнітопровід трансформатора.....	90
4.3 Перемикачі регулювальних відгалужень	96
4.4 Бак з візком	101
4.5 Вводи	105
4.6 Відводи	108
4.7 Охолоджувальні пристрої	112
4.8 Розширювач	113
4.9 Допоміжна арматура	117
4.10 Контрольні та захисні пристрої.....	121
Література.....	125

ВСТУП

Силовий трансформатор – один з найважливіших елементів будь-якої електроенергетичної системи. Передача електричної енергії на великі відстані від місця її виробництва до місця споживання потребує в сучасних мережах не менше п'яти-шестикратної трансформації в підвищувальних і понижувальних трансформаторах.

Необхідність розподілу енергії між багатьма невеликими споживачами призводить до значного збільшення кількості окремих трансформаторів порівняно з числом генераторів. Внаслідок цього загальна потужність усіх трансформаторів, установлених у мережі, нині перевищує загальну генераторну потужність у 7–8 разів, а в майбутньому вона ще може збільшитися. Із віддаленням від електростанції одиничні потужності трансформаторів зменшуються, а питома витрата матеріалів на їх виготовлення та втрати, віднесені до одиниці потужності, а також ціна 1 кВт втрат зростають. Тому значна частина матеріалів, які витрачаються на усі силові трансформатори, вкладається в найбільш віддалені частини мережі, тобто в розподільчі трансформатори з напругою живлення 35, 20, 10, 6 і 3 кВ. На ці ж трансформатори припадає і основна частина втрат енергії, що оплачуються за найвищою ціною.

З огляду на вищесказане одним з найважливіших завдань проектування силових трансформаторів у наш час є завдання значного зменшення у них втрат енергії, які виділяються в магнітній системі (втрати холостого ходу) і в обмотках (втрати короткого замикання).

Зменшення втрат холостого ходу досягається, головним чином, за рахунок застосування холоднокатаної рулонної електротехнічної сталі з поліпшеними магнітними властивостями – низькими і особливо низькими питомими втратами і питомою намагнічувальною потужністю. За останні 30–40 років втрати холостого ходу вдалося знизити майже вдвічі.

Зменшення втрат короткого замикання досягається за рахунок зменшення робочої густини струму в обмотках трансформатора, що сприяє збільшенню маси металу обмоток внаслідок збільшення поперечного перерізу проводу.

Разом із зменшенням втрат при проектуванні трансформаторів має задовольнятися вимога найбільш ефективного використання матеріалів з метою зменшення вартості всього виробу.

Проектне завдання

Студентам пропонується спроектувати окремий трифазний силовий масляний трансформатор із стандартними параметрами, які б задовольняли

вимоги ДСТУ 2105-92 (ГОСТ 11920-93) [1].

До числа стандартних параметрів, які вказані в завданні, належать:

- а) номінальна повна потужність $S_{\text{н}}$, (кВА);
- б) номінальні лінійні напруги обмоток низької (НН) та високої (ВН) напруги $U_{1\text{лн}}$, $U_{2\text{лн}}$, (кВ);
- в) втрати холостого ходу P_0 , короткого замикання $P_{\text{к}}$, Вт;
- г) струм холостого ходу i_0 , %;
- д) напруга короткого замикання $u_{\text{к}}$, %;
- е) схема та група з'єднання обмоток (чисельник – схема обмотки ВН, знаменник – обмотки НН);
- ж) матеріал проводу обмоток (мідь або алюміній).

Усі трансформатори розраховуються на промислову частоту $f = 50$ Гц, тривалий режим роботи, зовнішнє установаження і наявність пристроїв для перемикання регульовальних відгалужень обмотки ВН без збудження трансформатора (ПБЗ). Діапазон регулювання напруги $\pm 2 \times 2,5\%$ від $U_{\text{н}}$.

В наведених далі розрахункових формулах усі величини, які відносяться до обмотки НН, мають індекс 1, а до обмотки ВН – індекс 2!

У всіх розрахункових виразах величини, наведені у завданні, мають вказану розмірність. Розмірності додатково введених параметрів вказуються окремо. Всі лінійні розміри слід підставляти в сантиметрах, крім розмірів поперечного перерізу проводу, які використовуються при обчисленнях в мм^2 .

Як об'єкт для курсового проектування взято трифазний силовий масляний трансформатор потужністю 25...16000 кВА включно, з напругою обмоток ВН до 35 кВ включно, тобто розподільчі трансформатори, в яких поряд із мідними широко використовуються й алюмінієві обмотки.

Курсовий проект містить розрахункову частину (пояснювальну записку) та графічну частину. Зміст пояснювальної записки вказується в завданні. В додатках необхідно додати результат розрахунку трансформатора за допомогою програми ORTR.

Зміст пояснювальної записки курсового проекту

1 Попередній розрахунок трансформатора

1.1 Розрахунок основних електричних величин

1.2 Попередній розрахунок за допомогою ORTR

2 Розрахунок оптимального варіанта трансформатора

2.1 Перевірочний розрахунок оптимального варіанта трансформатора

2.2 Вибір типу обмоток

2.3.1 Розрахунок обмотки низької напруги

2.3.2 Розрахунок обмотки високої напруги

- 3 Розрахунок характеристик короткого замикання
 - 3.1 Втрати короткого замикання
 - 3.3. Напруга короткого замикання
- 4 Механічні сили та напруги в обмотках
- 5 Розрахунок магнітної системи
 - 5.1 Маса магнітної системи
 - 5.2 Втрати холостого ходу
 - 5.3 Струм холостого ходу
- 6 Тепловий розрахунок трансформатора
 - 6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом
 - 6.2 Вибір і розрахунок системи охолодження
 - 6.3 Розрахунок поверхні охолодження
 - 6.4 Визначення фактичних перегрівів
- 7 Техніко-економічні показники трансформатора
- 8 Висновок
- 9 Додатки

Графічна частина містить один аркуш креслення формату А1. На аркуші наводять загальний вигляд трансформатора в трьох проекціях з необхідними розрізами та перерізами, які дозволяють показати його основні вузли. При неможливості показати деякі пристрої на основних проекціях необхідно зробити додаткові виносні розміри та перерізи. Специфікацію виробів при навчальному проектуванні бажано розміщувати в правому куті відповідного креслення над основною назвою. За відсутності місця на кресленні її можна виконати на окремих стандартних листах. Студенти заочного відділення виконують тільки креслення загального вигляду трансформатора.

Необхідно пам'ятати, що розрахунок та проектування – процеси взаємопов'язані, через що, приступаючи до розрахунків, студенти мають попередньо ознайомитися з конструкцією трансформатора.

1 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН

Номінальні лінійні струми трансформатора (розраховуються для обох обмоток ВН та НН), А:

$$I_{\text{ЛН}} = \frac{S_{\text{Н}}}{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ЛН}}}. \quad (1.1)$$

Номінальні фазні струми та напруги обмоток:

- при з'єднанні обмоток в зірку Y:

$$I_{\text{фН}} = I_{\text{ЛН}}, \quad (1.2)$$

$$U_{\text{фН}} = \frac{U_{\text{ЛН}}}{\sqrt{3}}, \quad (1.3)$$

- при з'єднанні обмоток в трикутник Δ:

$$I_{\text{фН}} = \frac{I_{\text{ЛН}}}{\sqrt{3}}, \quad (1.4)$$

$$U_{\text{фН}} = U_{\text{ЛН}}. \quad (1.5)$$

Активна складова напруги короткого замикання трансформатора:

$$u_{\text{а}} = \frac{P_{\text{к}}}{10 \cdot S_{\text{Н}}}, \quad (1.6)$$

де $P_{\text{к}}$ – втрати короткого замикання, Вт;

$S_{\text{Н}}$ – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Реактивна складова напруги короткого замикання трансформатора:

$$u_{\text{р}} = \sqrt{u_{\text{к}}^2 - u_{\text{а}}^2}. \quad (1.7)$$

В нормальних довготривалих режимах до обмоток трансформатора прикладені номінальні напруги. В аварійних режимах (при короткому замиканні і обриві ліній) або при їх включеннях і відключеннях можливі короточасні перенапруги, що перевищують номінальні значення в 3 – 4 рази. Крім того, в лініях електропередач можуть виникати значні атмосферні перенапруги. Внаслідок цього ізоляція трансформаторів має витримувати можливі перенапруги без пробою, тому вона розраховується і випробовується після виготовлення трансформатора на підвищену (випробувальну) напругу, значення якої для відповідної обмотки можна знайти з табл. 1.1 [1]:

Таблиця 1.1 – Випробувальна напруга обмоток трансформатора

$U_{\text{лн}}, \text{кВ}$	<1	3	6	10	15	20	35
$U_{\text{вип}}, \text{кВ}$	5	18	25	35	45	55	85

Наприклад, при $U_{1\text{лн}} = 3 \text{ кВ}$ (3,15 кВ) $U_{1\text{вип}} = 18 \text{ кВ}$, а при $U_{2\text{лн}} = 35 \text{ кВ}$ (38,5 кВ) $U_{2\text{вип}} = 85 \text{ кВ}$.

2 ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

Один і той самий трансформатор може бути спроектований при різних співвідношеннях між витратою сталі магнітопроводу і проводу обмоток. При цьому зі зменшенням перерізу сталі буде зростати число витків обмоток і навпаки, внаслідок чого буде змінюватись і вартість активної частини. При певному перерізу магнітопроводу ця вартість буде мінімальною. Визначення цього оптимального перерізу і є метою попереднього розрахунку.

2.1 Активна частина трансформатора

Основа конструкції трансформатора – його магнітна система, розміри якої разом з розмірами обмоток визначають габарити його активної частини.

В проєктованих трансформаторах розглядається тристержнева плоска магнітна система, що отримала найширше застосування як найдешевша у виготовленні. Її конструкція (рис. 2.1) складається з трьох стержнів і двох ярем, що розташовані в одній площині. Магнітна система набирається із листів електротехнічної сталі, ізольованих один від одного. В сучасних силових трансформаторах використовують холоднокатану текстуровану сталь марок 3404 і 3405 з товщиною листів 0,35 і 0,30 мм, що задовольняє вимоги [2]. Зі зменшенням товщини листів зменшуються втрати від вихрових струмів, але збільшується трудоемність у виготовленні магнітопроводу.

Холоднокатана сталь, що випускається у вигляді рулонів, має різку анізотропію магнітних властивостей, тобто має високу магнітну проникність і малі питомі втрати (втрати в 1 кг маси сталі), якщо напрямок магнітного потоку збігається із напрямком прокатки сталі, і відповідно низьку проникність та більші втрати, якщо ці напрямки не збігаються. Тому для зменшення втрат пластини магнітної системи вирізають так, щоб напрямок довгих сторін пластин збігався з напрямком прокатки.

Пластини стержнів і ярем укладаються так, що між ними утворюється стик (повітряний проміжок). При цьому в процесі укладання (шихтовки) пластин стики попереднього шару мають перекриватись цілими пластинами наступного шару, що дозволяє зменшити вплив повітряних проміжків на шляхи основного магнітного потоку. Якщо площа стику знаходиться під кутом 90° до напрямку магнітного потоку, то такий стик називається прямим, якщо кут менше 90° , то стик буде косим. На рис. 2.1, а) в середньому стержні показано прямі стики, в двох крайніх – косі. При прямих стиках отримуються найменші відходи в процесі розкрою сталі і найменша трудоемність виготовлення магнітопроводу, але найбільші втрати і струм холостого ходу.

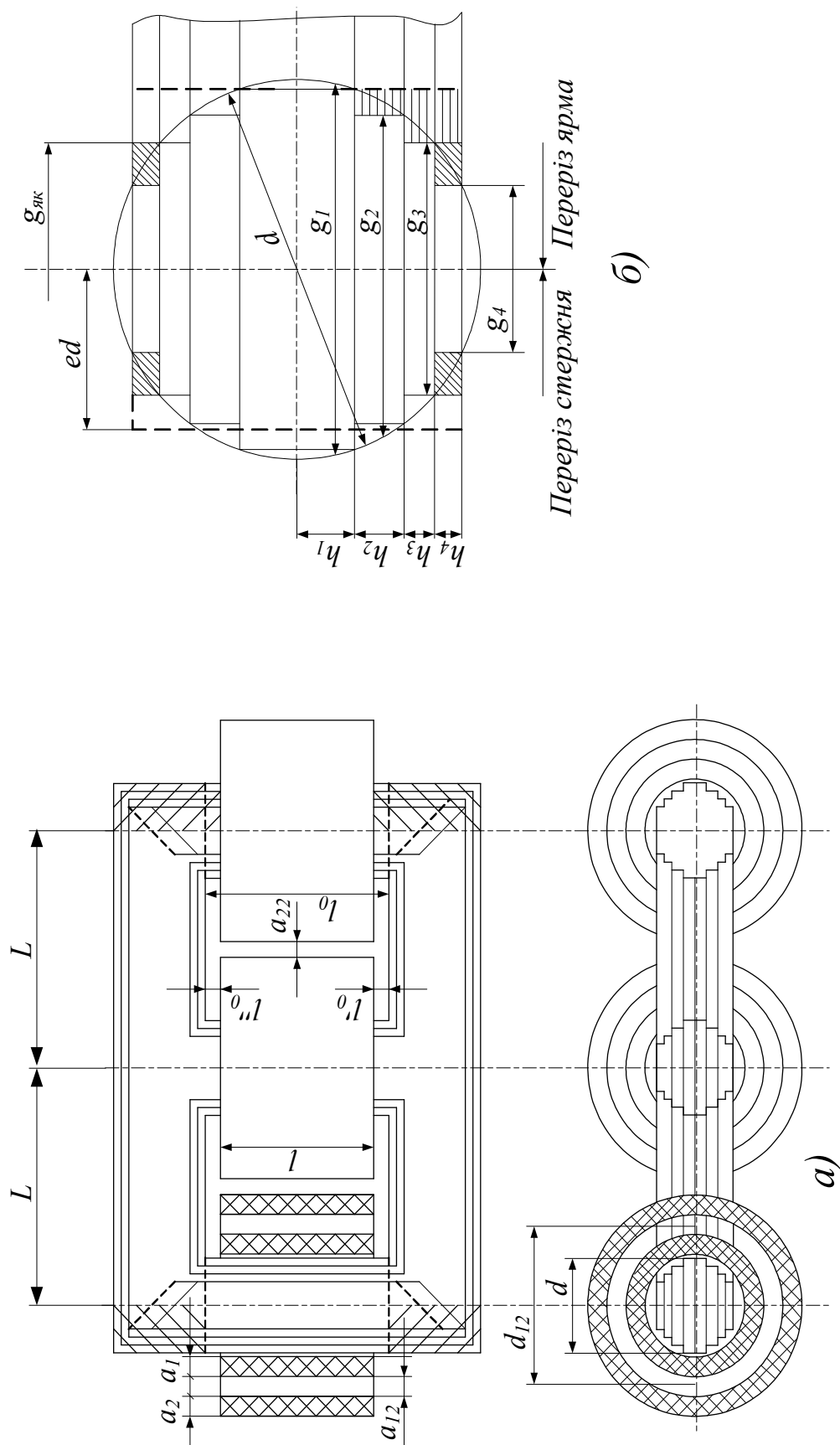


Рисунок 2.1 – Основні розміри активної частини трансформатора

Це пояснюється тим, що в цьому випадку об'єм сталі, де потік не збігається з напрямом прокатки, отримується найбільшим. Більш докладно це питання описане в [3, 4].

Оскільки обмотки силових трансформаторів повинні мати форму циліндра, то для максимального заповнення їх внутрішнього перерізу стержні також повинні мати круглий переріз. Але для отримання такого перерізу необхідно мати велику кількість типорозмірів пластин, тому дійсний переріз стержня являє собою багатосхідчасту фігуру, вписану в коло діаметром d (див. рис. 2.1, б), який називається діаметром стержня. Кожна сходинка утворюється набором пластин однакової ширини, наприклад, перший пакет набирається із пластин шириною g_1 , другий – g_2 і т. д. Товщина цих пакетів (на одну половину перерізу) позначається відповідно h_1, h_2 і т. д.

Переріз ярма, в основному, повторює переріз стержня, за виключенням двох-трьох останніх пакетів. Пластини ярма мають стягуватись ярмовими балками (швелерами), що розташовуються вздовж кожного ярма по обидві його сторони. Для збільшення площі натиску ширину пластин крайнього (останнього) пакета ярма доводиться брати порівняно більшою, ніж в стержні. При невеликих значеннях діаметра стержня ширина останнього пакета ярма дорівнює ширині попереднього (передостаннього) пакета. Наприклад, на рис. 2.1, б) останній пакет стержня має ширину пластин g_4 , а ярма – $g_{\text{як}} = g_3$. Внаслідок цього загальний переріз ярма збільшується, порівняно з перерізом стержня, на величину заштрихованих ділянок (див. рис. 2.1, б). При великих значеннях діаметра стержня ширина пластин двох або трьох крайніх пакетів ярма береться такою, що дорівнює ширині попереднього пакета, а всі інші пакети – такі ж, як в стержні.

З метою уніфікації розмірів пластин та найбільш економічного розкрою сталі в країнах – членах СЕВ діє стандарт [1, 5], що встановлює нормалізовані значення діаметрів стержнів, відхилення від яких неприпустимі. В навчальному проектуванні достатньо використовувати такі значення d , см: 7; 8; 9; 10; 11; 12,5; 14; 16; 18; 20; 22; 24; 26; 28; 30; 32; 34; 36; 38; 40; 42; 45; 48; 50; 53; 56; 60.

Для кожного значення діаметра нормалізовані розміри пакетів стержнів і ярем $g_1 \times h_1, g_2 \times h_2$ і т. д. та кількість сходинок в їх перерізі. Розміри цих пакетів для вказаних значень діаметрів наведено в табл. 2.1. Там також вказані площі перерізів ступінчастих фігур стержнів $P_{\text{фс}}$ і ярем $P_{\text{фя}}$, ширина крайнього пакета ярма $q_{\text{як}}$ і коефіцієнт $K_{\text{кр}}$ заповнення площі круга діаметром d площею ступінчастої фігури стержня.

Таблиця 2.1 – Типорозміри магнітопроводів силових трансформаторів

d, см	P _{ф2} , см ²	P _{ф3} , см ²	g _{як} , см	K _{кр}	Розміри пакетів стержня, см									
					$\frac{g_1 \times h_1}{g_9 \times h_9}$	$\frac{g_2 \times h_2}{g_{10} \times h_{10}}$	$\frac{g_3 \times h_3}{g_{11} \times h_{11}}$	$\frac{g_4 \times h_4}{g_{12} \times h_{12}}$	$\frac{g_5 \times h_5}{g_{13} \times h_{13}}$	$\frac{g_6 \times h_6}{g_{14} \times h_{14}}$	$\frac{g_7 \times h_7}{g_{15} \times h_{15}}$	$\frac{g_8 \times h_8}{g_{16} \times h_{16}}$		
8	43,3	44,8	5,5	0,869	$\frac{1,5 \times 1,4}{1,5 \times 1,4}$	$\frac{6,5 \times 0,9}{6,5 \times 0,9}$	$\frac{5,5 \times 0,6}{5,5 \times 0,6}$	$\frac{4,0 \times 0,5}{4,0 \times 0,5}$	–	–	–	–	–	–
9	56,7	58,2	5,5	0,891	$\frac{8,5 \times 1,5}{8,5 \times 1,5}$	$\frac{7,5 \times 0,9}{7,5 \times 0,9}$	$\frac{6,5 \times 0,6}{6,5 \times 0,6}$	$\frac{5,5 \times 0,4}{5,5 \times 0,4}$	$\frac{4,0 \times 0,5}{4,0 \times 0,5}$	–	–	–	–	–
10	72	73,2	5,5	0,917	$\frac{9,5 \times 1,6}{9,5 \times 1,6}$	$\frac{8,5 \times 1,0}{8,5 \times 1,0}$	$\frac{7,5 \times 0,7}{7,5 \times 0,7}$	$\frac{6,5 \times 0,5}{6,5 \times 0,5}$	$\frac{5,5 \times 0,4}{5,5 \times 0,4}$	$\frac{4,0 \times 0,4}{4,0 \times 0,4}$	–	–	–	–
11	86,2	89,7	6,5	0,905	$\frac{10,5 \times 1,6}{10,5 \times 1,6}$	$\frac{9,5 \times 1,1}{9,5 \times 1,1}$	$\frac{8,5 \times 0,7}{8,5 \times 0,7}$	$\frac{7,5 \times 0,6}{7,5 \times 0,6}$	$\frac{6,5 \times 0,4}{6,5 \times 0,4}$	$\frac{4,0 \times 0,7}{4,0 \times 0,7}$	–	–	–	–
12,5	112,3	115,3	6,5	0,915	$\frac{12 \times 1,8}{12 \times 1,8}$	$\frac{10,5 \times 1,6}{10,5 \times 1,6}$	$\frac{9,5 \times 0,6}{9,5 \times 0,6}$	$\frac{8,5 \times 0,6}{8,5 \times 0,6}$	$\frac{6,5 \times 0,7}{6,5 \times 0,7}$	$\frac{4,0 \times 0,6}{4,0 \times 0,6}$	–	–	–	–
14	141,5	144	6,5	0,919	$\frac{13,5 \times 1,9}{13,5 \times 1,9}$	$\frac{12 \times 1,7}{12 \times 1,7}$	$\frac{10,5 \times 1,0}{10,5 \times 1,0}$	$\frac{8,5 \times 0,9}{8,5 \times 0,9}$	$\frac{6,5 \times 0,7}{6,5 \times 0,7}$	$\frac{4,0 \times 0,5}{4,0 \times 0,5}$	–	–	–	–
16	183,5	188,3	8,5	0,913	$\frac{15,5 \times 2,0}{15,5 \times 2,0}$	$\frac{13,5 \times 1,9}{13,5 \times 1,9}$	$\frac{12 \times 1,0}{12 \times 1,0}$	$\frac{10,5 \times 0,7}{10,5 \times 0,7}$	$\frac{8,5 \times 0,7}{8,5 \times 0,7}$	$\frac{5,5 \times 0,7}{5,5 \times 0,7}$	–	–	–	–
18	232,8	237,6	9,5	0,915	$\frac{17,5 \times 2,1}{17,5 \times 2,1}$	$\frac{15,5 \times 2,5}{15,5 \times 2,5}$	$\frac{13,5 \times 1,3}{13,5 \times 1,3}$	$\frac{12 \times 0,8}{12 \times 0,8}$	$\frac{9,5 \times 0,9}{9,5 \times 0,9}$	$\frac{6,5 \times 0,8}{6,5 \times 0,8}$	–	–	–	–
20	288,4	296,2	12	0,918	$\frac{19,5 \times 2,2}{19,5 \times 2,2}$	$\frac{17,5 \times 2,6}{17,5 \times 2,6}$	$\frac{15,5 \times 1,5}{15,5 \times 1,5}$	$\frac{13,5 \times 1,1}{13,5 \times 1,1}$	$\frac{12 \times 0,6}{12 \times 0,6}$	$\frac{10,5 \times 0,5}{10,5 \times 0,5}$	$\frac{7,5 \times 0,7}{7,5 \times 0,7}$	–	–	–
22	353	360,5	12	0,929	$\frac{21,5 \times 2,3}{21,5 \times 2,3}$	$\frac{19,5 \times 2,8}{19,5 \times 2,8}$	$\frac{17,5 \times 1,5}{17,5 \times 1,5}$	$\frac{15,5 \times 1,2}{15,5 \times 1,2}$	$\frac{13,5 \times 0,9}{13,5 \times 0,9}$	$\frac{12 \times 0,5}{12 \times 0,5}$	$\frac{10,5 \times 0,4}{10,5 \times 0,4}$	$\frac{7,5 \times 0,7}{7,5 \times 0,7}$	–	–
24	419,3	425,6	13,5	0,927	$\frac{23 \times 3,4}{23 \times 3,4}$	$\frac{21,5 \times 1,9}{21,5 \times 1,9}$	$\frac{19,5 \times 1,7}{19,5 \times 1,7}$	$\frac{17,5 \times 1,2}{17,5 \times 1,2}$	$\frac{15,5 \times 0,9}{15,5 \times 0,9}$	$\frac{13,5 \times 0,8}{13,5 \times 0,8}$	$\frac{12 \times 0,5}{12 \times 0,5}$	$\frac{9,5 \times 0,6}{9,5 \times 0,6}$	–	–
26	490,6	507,1	15,5	0,924	$\frac{25 \times 3,5}{25 \times 3,5}$	$\frac{23 \times 2,5}{23 \times 2,5}$	$\frac{21,5 \times 1,3}{21,5 \times 1,3}$	$\frac{19,5 \times 1,3}{19,5 \times 1,3}$	$\frac{17,5 \times 1,0}{17,5 \times 1,0}$	$\frac{15,5 \times 0,8}{15,5 \times 0,8}$	$\frac{12 \times 0,9}{12 \times 0,9}$	$\frac{10,5 \times 0,6}{10,5 \times 0,6}$	–	–
28	570,9	591,1	17,5	0,927	$\frac{27 \times 3,7}{27 \times 3,7}$	$\frac{25 \times 2,6}{25 \times 2,6}$	$\frac{23 \times 1,7}{23 \times 1,7}$	$\frac{21,5 \times 0,9}{21,5 \times 0,9}$	$\frac{19,5 \times 1,1}{19,5 \times 1,1}$	$\frac{17,5 \times 0,9}{17,5 \times 0,9}$	$\frac{13,5 \times 1,3}{13,5 \times 1,3}$	$\frac{10,5 \times 0,7}{10,5 \times 0,7}$	–	–
30	657,2	657,2	17,5	0,93	$\frac{29,5 \times 2,8}{29,5 \times 2,8}$	$\frac{27 \times 3,7}{27 \times 3,7}$	$\frac{25 \times 1,8}{25 \times 1,8}$	$\frac{23 \times 1,9}{23 \times 1,9}$	$\frac{21,5 \times 1,8}{21,5 \times 1,8}$	$\frac{17,5 \times 1,8}{17,5 \times 1,8}$	$\frac{13,5 \times 1,2}{13,5 \times 1,2}$	$\frac{10,5 \times 0,6}{10,5 \times 0,6}$	–	–
32	746,2	762,4	19,5	0,928	$\frac{31,0 \times 4,0}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{29,5 \times 2,2}{29,5 \times 2,2}$	$\frac{27 \times 2,4}{27 \times 2,4}$	$\frac{25 \times 1,4}{25 \times 1,4}$	$\frac{23 \times 1,1}{23 \times 1,1}$	$\frac{21,5 \times 0,7}{21,5 \times 0,7}$	$\frac{19,5 \times 0,8}{19,5 \times 0,8}$	$\frac{15,5 \times 1,2}{15,5 \times 1,2}$	–	–
34	844,8	860,8	19,5	0,931	$\frac{32,5 \times 5,0}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{31 \times 1,9}{31 \times 1,9}$	$\frac{29,5 \times 1,5}{29,5 \times 1,5}$	$\frac{27 \times 1,9}{27 \times 1,9}$	$\frac{25 \times 1,2}{25 \times 1,2}$	$\frac{23 \times 1,0}{23 \times 1,0}$	$\frac{19,5 \times 1,4}{19,5 \times 1,4}$	$\frac{15,5 \times 1,1}{15,5 \times 1,1}$	–	–
36	929,2	944,8	19,5	0,913	$\frac{35 \times 4,2}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{32,5 \times 3,5}{32,5 \times 3,5}$	$\frac{29,5 \times 2,6}{29,5 \times 2,6}$	$\frac{27 \times 1,6}{27 \times 1,6}$	$\frac{25 \times 1,0}{25 \times 1,0}$	$\frac{23 \times 0,9}{23 \times 0,9}$	$\frac{19,5 \times 1,3}{19,5 \times 1,3}$	$\frac{15,5 \times 0,9}{15,5 \times 0,9}$	–	–

Продовження таблиці 2.1

d, см	$P_{\text{фз}},$ см ²	$P_{\text{фя}},$ см ²	$S_{\text{як}},$ см	$K_{\text{кр}}$	Розміри пакетів стержня							
					$\frac{g_1 \times h_1}{g_9 \times h_9}$	$\frac{g_2 \times h_2}{g_{10} \times h_{10}}$	$\frac{g_3 \times h_3}{g_{11} \times h_{11}}$	$\frac{g_4 \times h_4}{g_{12} \times h_{12}}$	$\frac{g_5 \times h_5}{g_{13} \times h_{13}}$	$\frac{g_6 \times h_6}{g_{14} \times h_{14}}$	$\frac{g_7 \times h_7}{g_{15} \times h_{15}}$	$\frac{g_8 \times h_8}{g_{16} \times h_{16}}$
38	1035,8	1063,4	21,5	0,913	$\frac{36,8 \times 4,7}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 2,7}{35 \times 2,4}$	$\frac{32,5 \times 2,4}{31 \times 1,2}$	$\frac{31 \times 1,2}{31 \times 1,2}$	$\frac{29,5 \times 1,0}{29,5 \times 1,0}$	$\frac{25 \times 2,3}{25 \times 2,3}$	$\frac{21,5 \times 1,3}{21,5 \times 1,3}$	$\frac{15,5 \times 1,5}{15,5 \times 1,5}$
40	1155,6	1167,6	21,5	0,920	$\frac{39,5 \times 5,4}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 2,4}{17,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 1,8}{15,5 \times 0,4}$	$\frac{32,5 \times 2}{32,5 \times 2}$	$\frac{29,5 \times 1,9}{29,5 \times 1,9}$	$\frac{27 \times 1,2}{27 \times 1,2}$	$\frac{25,5 \times 0,9}{25,5 \times 0,9}$	$\frac{21,5 \times 1,2}{21,5 \times 1,2}$
42	1282,9	1315	25	0,926	$\frac{41 \times 4,6}{21,5 \times 1,2}$	$\frac{39,5 \times 3,8}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 1,7}{15,5 \times 0,9}$	$\frac{35 \times 1,5}{35 \times 1,5}$	$\frac{32,5 \times 1,7}{32,5 \times 1,7}$	$\frac{29,5 \times 1,6}{29,5 \times 1,6}$	$\frac{27 \times 1,2}{27 \times 1,2}$	$\frac{25 \times 0,7}{25 \times 0,7}$
45	1479,2	1500,2	25	0,930	$\frac{44 \times 4,7}{29,5 \times 0,7}$	$\frac{42,5 \times 2,7}{27 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,9}{25 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 2,3}{23 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 1,9}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 1,2}{17,5 \times 0,8}$	$\frac{32,5 \times 1,4}{32,5 \times 1,4}$	$\frac{31 \times 0,8}{31 \times 0,8}$
48	1689	1718,8	27	0,933	$\frac{46,5 \times 5,9}{31 \times 0,7}$	$\frac{44 \times 3,7}{29,5 \times 0,6}$	$\frac{42,5 \times 1,5}{27 \times 0,9}$	$\frac{41 \times 1,4}{25 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 1,8}{21,5 \times 0,9}$	$\frac{36,8 \times 1,0}{17,5 \times 0,9}$	$\frac{35 \times 1,0}{35 \times 1,0}$	$\frac{32,5 \times 1,2}{32,5 \times 1,2}$
50	1816,4	1843,9	27	0,925	$\frac{48,5 \times 6,1}{32,5 \times 1,2}$	$\frac{46,5 \times 3,1}{29,5 \times 1,2}$	$\frac{44 \times 2,7}{27 \times 0,9}$	$\frac{42,5 \times 1,3}{25 \times 0,6}$	$\frac{41 \times 1,1}{21,5 \times 0,9}$	$\frac{38,5 \times 1,6}{17,5 \times 0,8}$	$\frac{36,8 \times 1,0}{36,8 \times 1,0}$	$\frac{35 \times 0,2}{35 \times 0,2}$
53	2044	2077,8	29,5	0,927	$\frac{52 \times 5,1}{36,8 \times 0,8}$	$\frac{50,5 \times 2,9}{35 \times 0,9}$	$\frac{48,5 \times 2,7}{32,5 \times 1,0}$	$\frac{46,5 \times 2}{29,5 \times 1,1}$	$\frac{44 \times 2,1}{27 \times 0,8}$	$\frac{42,5 \times 1,0}{29 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,0}{19,5 \times 0,8}$	$\frac{38,5 \times 1,4}{38,5 \times 1,4}$
56	2286,2	2316,7	29,5	0,928	$\frac{54 \times 7,4}{36,8 \times 0,8}$	$\frac{52 \times 3,0}{35 \times 0,7}$	$\frac{50,5 \times 1,7}{32,5 \times 1,0}$	$\frac{48,5 \times 1,9}{29,5 \times 1,0}$	$\frac{46,5 \times 1,6}{27 \times 0,7}$	$\frac{44 \times 1,7}{23 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,8}{19,5 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 1,2}{38,5 \times 1,2}$
60	2639,4	2690,9	32,5	0,934	$\frac{58 \times 7,7}{41 \times 1,5}$	$\frac{56 \times 3,1}{38,5 \times 0,7}$	$\frac{54 \times 2,2}{36,8 \times 0,7}$	$\frac{52 \times 2,0}{35 \times 0,6}$	$\frac{50,5 \times 1,2}{32,5 \times 0,9}$	$\frac{48,5 \times 1,4}{29,5 \times 0,9}$	$\frac{46,5 \times 1,9}{25 \times 1,1}$	$\frac{44 \times 1,5}{19,5 \times 1,1}$

$$K_{кр} = \frac{P_{фс}}{(\pi \cdot d^2)/4}. \quad (2.1)$$

Значення $P_{фс}$ і $P_{фя}$ розраховані без врахування площі поздовжніх каналів.

Наприклад, при $d = 40$ см крайній пакет ярма має ширину $q_{як} = 21,5$ см, тобто $q_{я8} = q_8$. Звідси $q_{я9} = q_{я10} = q_{я11} = q_{я8} = q_8 = 21,5$ см, а усі попередні пакети мають таку ж ширину, як і в стержні. Товщини усіх пакетів стержня і ярма однакові, тобто $h_1 = h_{я1}$, $h_2 = h_{я2}$ і т. д.

Збільшення ширини декількох крайніх пакетів ярма порівняно з відповідними пакетами стержня викликають невелике збільшення площі $P_{фя}$ порівняно з $P_{фс}$, що враховується коефіцієнтом $K_я = P_{фя} / P_{фс}$, значення якого становить 1,01...1,02. У попередньому розрахунку можна взяти $K_я = 1,015$.

Кожна пластина сталі має двостороннє жаростійке ізоляційне покриття у вигляді керамічних чи оксидних плівок, нанесених на металургійному заводі після прокату. Внаслідок цього площі ступінчастих фігур $P_{фс}$ і $P_{фя}$ не повністю заповнені чистою сталлю, а частина їх припадає на ізоляцію. Це враховується коефіцієнтом заповнення сталлю площі ступінчастої фігури:

$$K_з = P_c / P_{фс} = P_я / P_{фя}, \quad (2.2)$$

де P_c , $P_я$ – площа активних перерізів відповідно стержня і ярма.

Для сталі з довжиною листів 0,35 мм $K_з = 0,97$, а для листів 0,3 мм $K_з = 0,96$. В попередньому розрахунку, коли ще невідома выбрана товщина листів, слід брати $K_з = 0,965$.

На кожний стержень магнітопроводу надівається по дві обмотки у вигляді концентрично розташованих циліндрів (див. рис. 1.1, а). Внутрішньою зазвичай є обмотка НН, зовнішньою – ВН. Обидві обмотки повинні мати однакову висоту l . Між заземленими частинами магнітопроводу і обмотками, а також між обмотками НН і ВН однієї фази і обмотками ВН з'єднаних фаз потрібно дотримуватись мінімально допустимих ізоляційних відстаней a_{01} , a_{12} , l_0' , l_0'' , a_{22} (див. рис. 2.1, а), значення яких визначаються напругами випробування відповідних обмоток $U_{вип}$ (див. табл. 1.1).

Товщини стінок циліндрів (радіальні розміри) обмоток a_1 і a_2 залежать від потужності трансформатора і його класу напруги (напруги обмотки ВН).

При заданих значеннях потужності, номінальних і випробувальних напруг обмоток попередньо з достатньо високою ступінню точності можуть бути визначені усі ізоляційні відстані і радіальні розміри обмоток.

Середній діаметр двох обмоток (середній діаметр каналу розсіювання) d_{12} досить жорстко зв'язаний з діаметром стержня і цей зв'язок залежить, в основному, від потужності трансформатора. Звідси, при відомій потужності можна також знайти зв'язок між d_{12} і d на основі накопиченого досвіду проектування.

На основі відомої теорії трансформаторів можна отримати в загальному вигляді рівняння, яке пов'язує між собою два основних розміри трансформатора – діаметр стержня d і висоту обмоток l :

$$d^3 \times l = 6,8 \times 10^4 \times \frac{S_n \times a \times a_p \times K_p}{f \times B_c^2 \times K_c^2 \times u_p}, \quad (2.3)$$

де $a = d_{12} / d$;

a_p – приведена ширина каналу розсіювання, $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3$;

K_p – коефіцієнт приведення реального поля розсіювання до ідеального (коефіцієнт Роговського);

B_c – робоча індукція в стержні;

K_c – коефіцієнт заповнення сталлю площі круга з діаметром d ,
 $K_c = K_{кр} \cdot K_z$.

При заданій номінальній потужності і напругах обмоток значення a , a_p , K_p , B_c , K_c залишаються практично постійними, внаслідок чого праву частину (2.3) можна назвати трансформаторною сталою C_T .

Тоді основні розміри трансформатора можна пов'язати співвідношенням

$$l = C_T / d^3. \quad (2.4)$$

Звідси, кожний трансформатор можна спроектувати на різних значеннях діаметра стержня, отримуючи при цьому різні висоти обмоток. При цьому будуть змінюватись співвідношення між витратами сталі магнітопроводу і проводу обмоток та вартість активної частини. При деякому значенні d ця вартість буде мінімальною, Саме цей варіант і потрібно вибрати як оптимальний.

Для пошуку оптимального варіанта необхідно ввести рівняння, яке пов'язує вартість активної частини трансформатора (сума вартостей магнітопроводу і обмоток) з діаметром стержня d . Як незалежна змінна вибирається діаметр d , котрий має набувати тільки нормалізованих значень.

Рекомендовані значення нормалізованих діаметрів слід брати з табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Рекомендовані значення нормалізованих діаметрів стержнів магнітопроводів трансформаторів, см

$S_{н}, \text{кВА}$	d_1	d_2	d_3	d_4	d_5	d_6	d_7	d_8
25	7	8	9	10	11	12.5	14	16
40...100	8	9	10	11	12.5	14	16	18
160...630	12.5	14	16	18	20	22	24	26
1000...1600	20	22	24	26	28	30	32	34
2500...6300	28	30	32	34	36	38	40	42
10000	34	36	38	40	42	45	48	50
16000	40	42	45	48	50	53	56	60

2.2 Вартість активної частини трансформатора

Загальний вираз для вартості активної частини має такий вигляд:

$$C_{ач} = K_{ст} \cdot K_{отх} \cdot C_{ст} \cdot G_{ст} + K_0 \cdot C_0 \cdot K_{ip} \cdot G_0, \quad (2.5)$$

де $G_{ст}$ – маса сталі магнітопроводу, $G_{ст} = G_c + G_я$;

G_c – маса сталі стержнів, $G_c = A_1/d + A_2 \cdot d^2$;

$G_я$ – маса сталі ярем, $G_я = B_1 \cdot d^3 + B_2 \cdot d^2$;

G_0 – маса проводу обмоток, $G_0 = c_1 / d^2$.

Як видно з наведених виразів, $G_{ст}$, G_c , $G_я$, G_0 , і $G_{ач}$ – змінні величини, які залежать від d .

Всі інші величини у цих виразах не залежать від діаметра d і можуть бути визначені у такій послідовності:

$$A_1 = C_T \cdot B_5, \quad (2.6)$$

де B_5 – коефіцієнт, $B_5 = 0,018 \cdot K_c$;

K_c – коефіцієнт заповнення сталлю поперечного перерізу стержня магнітопроводу, $K_c = K_{кр} \cdot K_3$;

$K_{кр}$ – усереднений коефіцієнт заповнення площі круга діаметром d ступінчастою фігурою поперечного перерізу стержня магнітопроводу трансформатора, $K_{кр} = \frac{1}{8} \cdot (K_{кр1} + K_{кр2} + \dots + K_{кр8})$.

$K_{кр1}, K_{кр2}, \dots$ – значення коефіцієнтів (див. табл. 2.1) для рекомендованих в табл. 2.2 нормалізованих діаметрів перерізу стержня магнітопроводу трансформатора заданої потужності.

Коефіцієнт a , що входить в (2.1), для трансформаторів з мідними обмотками потужністю до 630 кВА включно при напругах обмотки ВН 3, 6 і 10 кВ має дорівнювати 1,36, а при напругах 20 і 35 кВ – 1,38....1,4;

потужністю 1000...6300 кВА та напругами 6 і 10 кВ – 1,38, а при напругах 20 і 35 кВ – 1,4; потужністю 10000кВА і більше та напругою обмотки ВН 35 кВ – 1,4; для трансформаторів з алюмінієвими обмотками рекомендовані значення a збільшуються в 1,06 раза.

Радіальні розміри обмоток:

$$\frac{a_1+a_2}{3} = 0,76 \cdot K_s \sqrt[4]{S_H}, \quad (2.7)$$

де K_s – коефіцієнт, який для мідних обмоток попередньо може бути знайденим з табл. 2.3.

Таблиця 2.3 – Наближені діапазони значень коефіцієнта K_s

S_H , кВА	25...100		160...630		1000...6300		10000 і більше	
$U_{2лн}$, кВ	6; 10	20; 35	6; 10	20; 35	6; 10	20; 35	6; 10	20; 35
K_s	0,8... 0,6	0,8... 0,7	0,65... 0,52	0,65... 0,58	0,51... 0,43	0,54... 0,46	–	0,48... 0,46

Примітка. Для трансформаторів з алюмінієвими обмотками знайдені значення K_s необхідно домножати на 1,25. Значення K_s , а значить, і радіальні розміри обмоток, визначаються в попередньому розрахунку найменш точно, через що рекомендується визначати оптимальний варіант трансформатора для декількох значень K_s .

Наприклад, для усіх трансформаторів потужністю 160...630 кВА і напругами $U_{2лн} = 20$ і 35 кВ $K_s = 0,65...0,58$ ($K_{smax} = 0,65$ відповідає $S_H = 160$ кВА, а $K_{smin} = 0,58$ – $S_H = 630$ кВА). Розрахунок виконується для усього діапазону $K_s = 0,58...0,65$ з кроком $\Delta K_s = 3...7$:

$$\Delta K_s = (K_{smax} - K_{smin}) / 5 = (0,65 - 0,58) / 5 = 0,014.$$

Як початковий оптимальний варіант слід брати таке значення K_s , яке найбільш відповідає заданій потужності S_H ; наприклад, якщо $S_H = 400$ кВА, то $K_{sopt} \approx 0,61$.

Коефіцієнт Роговського в попередньому розрахунку слід брати $K_p \approx 0,95$.

Величина робочої індукції B_c залежить від марки сталі магнітопроводу і потужності трансформатора. Для холоднокатаної сталі марок 3404 і 3405 значення B_c для масляних трансформаторів потужністю до 16 кВА можуть досягати 1,5...1,55 Тл, для $S_H = 25...100$ кВА – 1,55...1,6 Тл і для $S_H = 160$ кВА і вище – 1,6...1,65 Тл.

Значення ізоляційних відстаней a_{01} , a_{12} , a_{22} , l'_0 і l''_0 знаходяться з табл. 2.4.

Таблиця 2.4 – Ізоляційні відстані активної частини

$S_{н}, \text{кВА}$	$U_{\text{вип}} \text{ НН, кВ}$	$a_{01}, \text{см}$	$S_{н}, \text{кВА}$	$U_{\text{вип}} \text{ ВН, кВ}$	$a_{12}, \text{см}$	$a_{22}, \text{см}$	$l'_0, \text{см}$
25...250	5	0,4	25...100	18; 25; 35	0,9	0,8	2,0
400...630	5	0,5(1,5)	160...630	18; 25; 35	0,9	1,0	3,0
1000...2500	5	1,5	1000...6300	18; 25; 35	2,0	1,8	5,0
630...1600	18; 25; 35	1,5	≥ 630	45	2,0	1,8	5,0
2500...6300	18; 25; 35	1,75	≥ 630	55	2,0	2,0	5,0
≥ 630	45	2,0	63...630	85	2,7(3,0)	2,0	7,5
≥ 630	55	2,3	1000...6300	85	2,7(3,0)	3,0	7,5
			≥ 10000	85	3,0	3,0	8,0

Примітки:

1. В трансформаторах потужністю 400...630 кВА при $U_{\text{випНН}} = 5 \text{ кВ}$ $a_{01} = 1,5 \text{ см}$ вибирається у випадку застосування на стороні НН гвинтової обмотки. Ця обмотка використовується на стороні НН за струмів, більших 600 А при алюмінієвому проводі і 800 А – при мідному.

2. У випадку застосування на стороні ВН багатошарової циліндричної обмотки з круглого проводу з екраном (при $U_{\text{випВН}} = 85 \text{ кВ}$), $S_{н} \leq 1000 \text{ кВА}$ і з'єднанні обмоток в зірку брати $a_{12} = 3,0 \text{ см}$.

3. В трансформаторах потужністю до 1000 кВА брати $l''_0 = l'_0$, потужністю 1000...6300 кВА – $l''_0 = l'_0 + 4,5$; а при потужності більше 6300 кВА – $l''_0 = l'_0 + 6$.

Середня ізоляційна відстань між обмотками та магнітопроводом по висоті:

$$l_0 = \frac{l'_0 + l''_0}{2}. \quad (2.8)$$

При введенні даних для визначення оптимального варіанта за допомогою програми розрахунку параметрів трансформатора потрібно встановлювати значення $N_0 = 2460$ для мідних обмоток, а для алюмінієвих $N_0 = 1200$.

Значення коефіцієнта додаткових втрат K_d в попередньому розрахунку можна взяти з табл. 2.5.

Таблиця 2.5 – Значення коефіцієнта додаткових втрат

$S_{н\text{,}}$ кВА	25...100	160...630	1000...6300	10000...16000
K_d	1,03	1,04...1,08	1,1...1,11	1,11...1,15

Коефіцієнт $K_{отх} = 1,055$ враховує вартість відходів в процесі розкрою рулонної сталі, а коефіцієнт $K_{ip} = 1,06$ для мідного, $K_{ip} = 1,13$ для алюмінієвого проводу – збільшення вартості обмоток за рахунок наявності у проводу ізоляції, а також за рахунок збільшення числа витків ВН на 5% для регулювання напруги.

Значення K_0 , C_0 , $K_{ст}$, $C_{ст}$ знаходять за табл. 2.6.

Таблиця 2.6 – Питомі вартості обмоточного проводу та сталі (C_0 , $C_{ст}$) з врахуванням виготовлення та ізоляції (K_0 , $K_{ст}$)

$S_{н\text{,}}$ кВА	$U_{2лн\text{,}}$ кВ	Мідний провід марки ПБ		Алюмініє вий провід АПБ		Сталь 3404				Сталь 3405			
						0,35 мм		0,30 мм		0,35 мм		0,30 мм	
						J = 1		J = 3		J = 2		J = 4	
C_0 , г/кг	K_0	C_0 , г/кг	K_0	$C_{ст}$, г/кг	$K_{ст}$	$C_{ст}$, г/кг	$K_{ст}$	$C_{ст}$, г/кг	$K_{ст}$	$C_{ст}$, г/кг	$K_{ст}$	$C_{ст}$, г/кг	$K_{ст}$
25...630	6,10	1,35	1,27	1,23	1,46	0,8	1,23	0,88	1,3	0,9	1,2	0,96	1,2
63...630	20-35	1,35	1,35	1,23	1,55	0,8	1,23	0,88	1,3	0,9	1,2	0,96	1,2
1000... 16000	6-35	1,34	1,58	1,1	2,0	0,8	1,27	0,88	1,3	0,9	1,2	0,96	1,26

Примітка. C_0 і $C_{ст}$ – вартість 1 кг відповідно обмоточного проводу і трансформаторної сталі; K_0 – коефіцієнт, який враховує вартість виготовлення обмоток з урахуванням вартості ізоляційних матеріалів; J – 1...4 – шифр марок сталей у програмі розрахунку; $K_{ст}$ – коефіцієнт, який враховує вартість виготовлення магнітопроводу, включно із вартістю закріплювальних і інших матеріалів.

В результаті обчислення введених за допомогою ORTR даних знаходять оптимальний варіант трансформатора для декількох вибраних значень коефіцієнта K_s і для заданих марок сталей та товщині їх листів (сталь 3404 товщиною 0,35 мм – J = 1; сталь 3405 товщиною 0,35 мм – J = 2; сталь 3404 товщиною 0,3 мм – J = 3; сталь 3405 товщиною 0,3 мм – J = 4). Остаточний вибір марки сталі і товщини листів буде залежати від виконання умов проектного завдання (задані значення втрат і струму холостого ходу мають бути дотримані з певною точністю) і деяких

додаткових умов (середня густина струму в обмотках в номінальному режимі і механічні напруги в проводі обмоток при короткому замиканні не мають перевищувати допустимих значень).

2.3 Втрати і струм холостого ходу

Для знайденого значення оптимального діаметра при кожному значенні K_s і для кожної марки сталі програма ORTR має розрахувати втрати і струм холостого ходу трансформатора:

Втрати активної потужності, намагнічувальна потужність, яка йде на створення основного магнітного потоку трансформатора, розраховуються за наведеними нижче залежностями:

$$P_0 = K_{\text{пд}} \cdot (P_c \cdot (G_c + 0,5 \cdot K_{\text{уп}} \cdot G_y) + P_y \cdot (G_y + 0,5 \cdot K_{\text{уп}} \cdot G_y)), \quad (2.9)$$

$$Q_0 = Q_5 + Q_6, \quad (2.10)$$

де Q_5 – намагнічувальна потужність в стержнях та ярмах магнітопроводу, вар;

Q_6 – намагнічувальна потужність в стержнях та ярмах магнітопроводу, що враховує загальну площу зазорів та їх кількість.

$$Q_5 = K_{\text{тд}} \cdot (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y + 0,5 \cdot K_{\text{ут}} \cdot K_{\text{пл}} \cdot G_y \cdot (q_c + q_y)), \quad (2.11)$$

$$Q_6 = K'_{\text{тд}} \cdot \Pi_c \cdot (\sqrt{2} \cdot n'_z q'_z + n''_z q''_z). \quad (2.12)$$

Струм холостого ходу

$$i_0 = Q_0 / (10 \cdot S_H). \quad (2.13)$$

Принцип розрахунку P_0 і Q_0 полягає у такому: для кожної марки сталі при різних значеннях індукції задаються питомі втрати (Вт/кг) і намагнічувальні потужності (ВА/кг), тобто потужності, що виділяються в 1 кг маси сталі. Перемножуючи питомі значення цих величин на відповідні маси стержнів і ярем, можна отримати потужності, що виділяються в усьому об'ємі сталі. Оскільки активні перерізи стержнів і ярем різні, то при одному значенні потоку індукції у них будуть відрізнятися, внаслідок чого P_0 і Q_0 розраховуються окремо для стержнів і ярем. У місцях стиків

(зазорів) між листками потік проходить по повітрю, витрачається реактивна потужність (складова Q_6), для розрахунку якої також задаються питомі намагнічувальні потужності, що припадають на одиницю площі зазору ($\text{ВА}/\text{см}^2$). Перемножуючи їх на загальну площу зазорів і їх кількість, можна отримати значення Q_6 .

Величини, що входять до (2.9) – (2.13), визначаються в такій послідовності.

Питомі втрати і намагнічувальні потужності P_c, q_c, P_y, q_y в сталі відповідно стержня і ярма знаходять з табл. 1.7 для вказаних там марок сталей. При цьому значенні P_c і q_c визначають відповідно до обраного раніше значення індукції B_c , а P_y і q_y – за значенням $B_y = B_c / K_y$.

Стики (зазори) між листами можуть бути прямими і косими, причому кількість тих і інших може бути різною [3]. У вихідних даних до розрахунку в програмі ORTR закладається розрахунок трьох варіантів стиків:

- а) усі стики прямі ($n''_3 = 7, n'_3 = 0$);
- б) прямі стики в середньому стержні ($n''_3 = 3$) і косі – у двох крайніх ($n'_3 = 4$);
- в) усі стики косі ($n'_3 = 6, n''_3 = 0$).

У програмі розрахунку кожний варіант зашифровано змінною Т:
а) Т=1; б) Т=2; в) Т=3. Розрахунок починається з першого варіанта як найпростішого у виробництві.

Для кожної марки сталі в табл. 2.8 задаються значення питомих намагнічувальних потужностей у зоні стиків (зазорів) q_3 , причому у зоні прямих стиків (q_3'') вони визначаються за індукцією B_c , а косих (q_3') – за $B_c / \sqrt{2}$.

Наприклад, при індукції в стержнях $B_c = 1,56$ Тл та в зоні косих стиків $B_c = 1,56 / \sqrt{2} \approx 1,1$ Тл, відповідно індукція в ярмі становитиме: $B_y = B_c / K_y = 1,56 / 1,015 \approx 1,54$ Тл. Зразок вибору потужностей для вказаних значень індукції наведено в табл. 2.7.

Таблиця 2.7 – Визначення втрат та намагнічувальних потужностей

Параметр вибору	Потужност і	Тип сталі			
		J = 1	J = 2	J = 3	J = 4
B_c	$P_c, \text{Вт/кг}$	1,207	1,150	1,150	1,074
B_c	$q_c, \text{ВА/кг}$	1,575	1,447	1,511	1,383
$B_c / \sqrt{2}$	$q_3', \text{ВА/см}^2$	0,220	0,200	0,220	0,200
B_c	$q_3'', \text{ВА/см}^2$	2,070	1,680	2,070	1,680
B_y	$P_y, \text{Вт/кг}$	1,168	1,110	1,110	1,038
B_y	$q_y, \text{ВА/кг}$	1,486	1,376	1,431	1,321

Таблиця 2.8 – Питомі втрати і намагнічувальні поужності сталі трансформатора

В, Тл	Р _с (Р _я), Вт/кг		q _с (q _я), ВА/кг				q _з , ВА/см ²		Р _з , Вт/см ²
	3404	3405	3404	3405	3404	3405	3404	3405	
	0,35мм J=1	0,3 мм J=4	0,35 мм J=1	0,35 мм J=2	0,3 мм J=3	0,3 мм J=4	J=1; 3	J=2; 4	
0,8	0,32	0,280	0,375	0,366	0,371	0,362	0,028	0,028	3404/3405
1,0	0,475	0,425	0,548	0,533	0,540	0,525	0,100	0,090	
1,1	0,575	0,513	0,650	0,632	0,640	0,624	0,220	0,200	
1,2	0,675	0,610	0,752	0,732	0,742	0,722	0,400	0,370	
1,22	0,697	0,631	0,782	0,758	0,768	0,748	0,468	0,416	
1,24	0,719	0,652	0,811	0,783	0,793	0,773	0,536	0,462	
1,26	0,741	0,673	0,841	0,809	0,819	0,779	0,604	0,508	
1,28	0,763	0,694	0,870	0,834	0,844	0,824	0,672	0,554	
1,30	0,785	0,715	0,900	0,860	0,810	0,850	0,740	0,600	
1,32	0,814	0,739	0,932	0,892	0,904	0,880	0,820	0,664	
1,34	0,843	0,763	0,964	0,924	0,938	0,910	0,900	0,728	
1,36	0,872	0,787	0,996	0,956	0,972	0,940	0,980	0,792	
1,38	0,901	0,811	1,028	0,988	1,006	0,910	1,060	0,856	
1,40	0,930	0,835	1,060	1,020	1,040	1,000	1,140	0,920	
1,42	0,964	0,860	1,114	1,065	1,089	1,041	1,244	1,012	
1,44	0,998	0,889	1,168	1,110	1,139	1,082	1,348	1,104	
1,46	1,032	0,916	1,222	1,156	1,188	1,123	1,452	1,196	
1,48	1,066	0,943	1,276	1,210	1,238	1,161	1,556	1,288	
1,50	1,100	0,970	1,330	1,246	1,289	1,205	1,660	1,380	
1,52	1,134	1,004	1,408	1,311	1,360	1,263	1,796	1,476	
1,54	1,168	1,038	1,486	1,376	1,431	1,321	1,932	1,572	

Продовження таблиці 2.8

В, Тл	P _c (P _я), Вт/кг		q _c (q _я), ВА/кг		q ₃ , ВА/см ²		P ₃ , Вт/см ²
	3404 0,35мм J=1	3405 0,3 мм J=4	3404 0,35 мм J=1	3405 0,35 мм J=2	3404 0,3 мм J=3	3405 0,3 мм J=4	
1,56	1,207	1,150	1,575	1,447	1,511	1,383	0,0934
1,58	1,251	1,190	1,675	1,524	1,600	1,449	0,0962
1,60	1,295	1,230	1,775	1,602	1,688	1,526	0,0990
1,62	1,353	1,278	1,958	1,748	1,850	1,645	0,1017
1,64	1,411	1,326	2,131	1,894	2,012	1,775	0,1044
1,66	1,472	1,380	2,556	2,123	2,289	1,956	0,1071
1,68	1,536	1,440	3,028	2,435	2,681	2,188	0,1098
1,70	1,600	1,500	3,400	2,747	3,073	2,420	0,1125
1,72	1,672	1,560	4,480	3,547	4,013	3,080	0,1155
1,74	1,744	1,620	5,560	4,347	4,953	3,740	0,1185
1,76	1,824	1,692	7,180	5,551	6,364	4,736	0,1215
1,78	1,912	1,776	9,340	7,161	8,247	6,068	0,1245
1,80	2,000	1,860	11,500	8,770	10,130	7,400	0,1275

В кутових частинах магнітопроводу у місцях стиків стержнів і ярם (всього їх шість) магнітний потік направлений під кутом до напрямку прокатки сталі, що викликає збільшення втрат і намагнічувальної потужності. Ця обставина враховується коефіцієнтами $K_{уп}$ і $K_{ут}$.

Таблиця 2.9 – Значення коефіцієнта збільшення втрат в стиках $K_{уп}$

Значення $K_{уп}$ для сталей			Тип сталі
T = 1 прямих – 7 косих – 0	T = 2 прямих – 3 косих – 4	T = 3 прямих – 0 косих – 6	
12,74	10,18	8,58	J = 1 (3404; 0,35 мм)
13,13	10,45	8,75	J = 2 (3405; 0,35 мм)
13,13	10,45	8,75	J = 3 (3404; 0,3 мм)
13,52	10,64	8,85	J = 4 (3405; 0,3 мм)

Значення $K_{ут}$ залежать від індукції B_c , типу стиків і для всіх марок сталей ($J = 1 \dots 4$) можуть бути визначені по графіку на рис. 2.2.

Коефіцієнт $K_{т,пл}$, що враховує збільшення намагнічувальної потужності у кутах магнітної системи, залежить від індукції B_c і від ширини пластин другого пакета g_2 (табл. 2.1). Його значення можна знайти по графіку на рис. 2.3.

У попередньому розрахунку, коли оптимальний діаметр стержня ще невідомий, величину g_2 знаходять по табл. 2.1 для четвертого діаметра d_4 , вказаного в табл. 2.2.

Коефіцієнт $K_{нд}$ враховує збільшення втрат за рахунок різки листів сталі, зняття з них задирок і пресування магнітної системи для пластин, які піддаються відпалюванню після їх механічної обробки, внаслідок цих же причин збільшується намагнічувальна потужність трансформатора, що враховується коефіцієнтами $K_{тд}$ та $K'_{тд}$. Значення вказаних коефіцієнтів вибираються з табл. 2.10.

Для розрахованого оптимального діаметра мають виконуватись такі умови:

$$P_0 \leq 1,075 \cdot P_{0зад} \quad (2.14)$$

$$i_0 \leq 1,15 \cdot i_{0зад} \quad (2.15)$$

де $P_{0зад}$ та $i_{0зад}$ – задані значення відповідно втрат і струму холостого ходу.

Таблиця 2.10 – Коефіцієнти збільшення втрат при обробці листів сталі

$S_{н\tau}$, кВА	до 250	400 – 630	1000 – 6300	≥ 10000
$K_{пд}$	1,12	1,13	1,15	1,2
$K_{тд}$	1,27	1,27	1,28	1,38
$K'_{тд}$	1,06	1,06	1,07	1,15

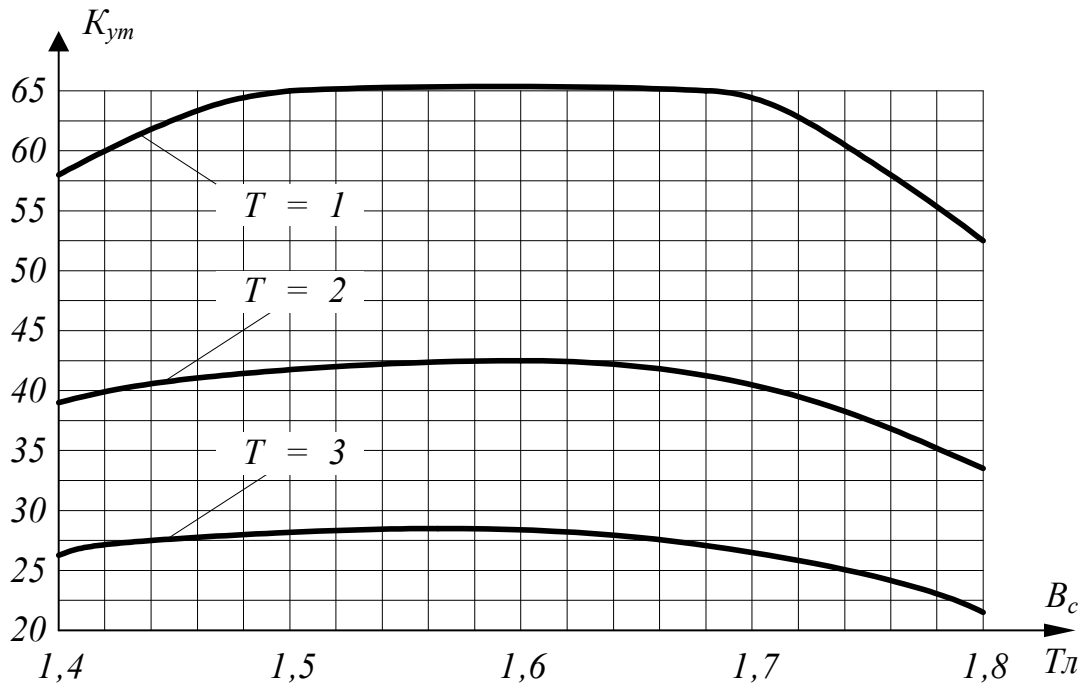


Рисунок 2.2 – Діаграма коефіцієнта збільшення втрат намагнічувальної потужності при робочій температурі K_{yt}

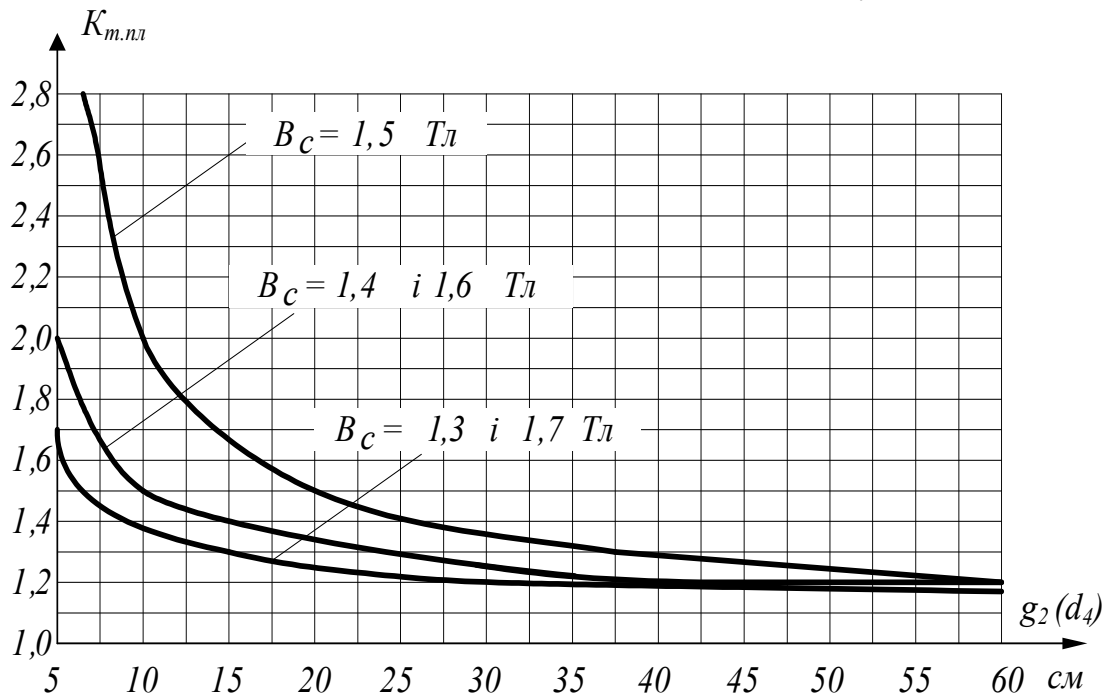


Рисунок 2.3 – Діаграма коефіцієнта збільшення намагнічувальної потужності у кутах магнітної системи $K_{т.пл}$

2.4 Середня густина струму в обмотках

Розрахована для оптимального варіанта густина струму не може перевищувати допустиму, тобто:

$$\Delta_{\text{ср}} \leq \Delta_{\text{ср.доп}} \quad (2.16)$$

Для мідних обмоток $\Delta_{\text{ср.доп}} = 4,5 \text{ А/мм}^2$, а для алюмінієвих $\Delta_{\text{ср.доп}} = 2,7 \text{ А/мм}^2$.

Коефіцієнт, що враховує умови приведення допустимих втрат короткого замикання до середнього розміру обмоток, обумовлених діаметром стержня d , береться $K_{\Delta} = 0,645$ для мідних та $K_{\Delta} = 0,28$ для алюмінієвих обмоток.

2.5 Механічні напруження у проводі обмоток

Обмотки трансформатора мають витримувати механічні сили, що виникають в них при короткому замиканні. У попередньому розрахунку враховуються тільки радіальні сили. Від цих сил у проводі обмоток виникають механічні напруження, які можна розрахувати таким чином:

$$\sigma_p = K_{\sigma} \cdot M \cdot d^3 \quad (2.17)$$

де $K_{\sigma} = 2,26 \cdot 10^{-5}$ для мідних обмоток;

$K_{\sigma} = 1,41 \cdot 10^{-5}$ – для алюмінієвих;

M – момент скручування, який діє в обмотках при короткому замиканні, $\text{Н} \cdot \text{м}$;

Для оптимального варіанта має виконуватись умова

$$\sigma_p \leq \sigma_{\text{р.доп}} \quad (2.18)$$

де $\sigma_{\text{р.доп}} = 60 \text{ МПа}$ для мідного проводу і $\sigma_{\text{р.доп}} = 25 \text{ МПа}$ – для алюмінієвого.

2.6 Послідовність визначення оптимального варіанта

Для визначення розрахункового варіанта трансформатора з оптимальними густиною струму, діаметром стержнів магнітопроводу та висотою обмотки використовується прикладна програма під назвою ORTR. Але обчислених за допомогою програми даних недостатньо для конструювання та виготовлення трансформатора. Потрібно розрахувати обмоточні дані для конкретної густини струму, встановити фактичні втрати в обмотках та магнітопроводі, перевірити спроектований трансформатор на перегрів.

Першим етапом проектування є підготовка даних до введення в програму ORTR та отримання вихідних даних для подальшого розрахунку. Підготовка даних до введення в програму попереднього розрахунку полягає в заповненні таблиці, яка має форму, наведену в табл. 2.11.

Таблиця 2.11 – Дані розрахунку трансформатора в ORTR

Прізвище, ім'я, по-батькові, група, варіант завдання								
$S_{\text{ном}},$ кВА	$P_k,$ Вт	$u_k,$ %	$P_0,$ Вт	$i_0,$ %	$u_{\text{ка}},$ %	$u_{\text{кр}},$ %	$B_c,$ Тл	
a	a_{01}	a_{12}	a_{22}	I_0	K_s	$K_{s\text{min}}$	$K_{s\text{max}}$	ΔK_s
K_c	$d_1,$ см	$d_2,$ см	$d_3,$ см	$d_4,$ см	$d_5,$ см	$d_6,$ см	$d_7,$ см	$d_8,$ см
K_p	$K_{\text{я}}$	$K_{\text{д}}$	N_0	K_{ip}	K_o	C_o	$K_{\text{отх}}$	$K_{\text{пл}}$
$K_{\text{тд}}$	$K'_{\text{тд}}$	$K_{\text{т.пл}}$	K_{Δ}	K_{σ}	$\Delta_{\text{ср.доп}}$	$\sigma_{\text{р.доп}}$		
/-/	J = 1	J = 2	J = 3	J = 4				
$C_{\text{ст}}$								
$K_{\text{ст}}$								
P_c								
$P_{\text{я}}$								
Q_c								
$Q_{\text{я}}$								
q'_z								
q''_z								
/-/	T = 1	T = 2	T = 3					
$K_{\text{уп}}$ (J=1)								
$K_{\text{уп}}$ (J=2)								
$K_{\text{уп}}$ (J=3)								
$K_{\text{уп}}$ (J=4)								
$K_{\text{ут}}$								

Складені вихідні дані підлягають перевірці керівником курсового проекту.

Після затвердження дані потрібно ввести за допомогою текстового редактора в файл програми розрахунку ORTR, використовуючи файловий

менеджер (*Total Commander, Volkov Commander, FAR Manager*). Для цього у файловому менеджері потрібно знайти місце розташування папки ORTR, у вказаній папці відмітити файл 1.INP, натиснувши F4, відкрити вибраний файл для редагування. Відповідно до рекомендацій введення даних, що будуть вказані у відкритому файлі, потрібно ввести дані із заповненої табл. 2.11 та зберегти файл під іншим іменем, але у цій же директорії ORTR і з тим же розширенням *.INP (*Файл → Сохранить как... → Petrenko.INP*).

Для обчислення необхідно запустити файл *ORTR.exe* на виконання (знаходиться в папці *ORTR*) та вказати відповідне ім'я файла для розрахунку. На запитання, чи друкувати результат обчислень, потрібно вибрати негативну відповідь, після чого програма розрахунку завершить роботу. Одночасно в директорії ORTR буде створений файл результатів розрахунку з таким самим ім'ям, але розширенням *.OUT. Вказаний файл (*Petrenko.OUT*) відкриваємо у файловому менеджері для перегляду, натискаючи F3. З відкритого вікна перегляду роздруковуємо (*Файл → Печать*) результати розрахунку у двох копіях – одна прикріплюється в процесі перевірки розрахунків на етапах проектування, а інша є додатком до пояснювальної записки курсового проекту.

Описаний вище варіант розрахунку нероботоздатний в нових версіях операційних систем, оскільки комп'ютерна техніка та програмне забезпечення розвиваються надзвичайно швидкими темпами. Тому працівниками кафедри ЕМСАІТ було розроблено нову версію програми розрахунку трансформатора ORTR, яка запускається у віконному режимі під операційною системою Windows.

Після запуску програми відкривається вікно програми ORTR (рис. 2.4) максимально наближене до форми таблиці даних розрахунку трансформатора (табл. 2.11). При запуску вікна є декілька комірок з уже введеними константами, вони виділені сірим кольором і не підлягають будь-яким змінам.

В першому рядку вводяться прізвище, ім'я та група студента. Дані можна вводити будь-якою мовою. Далі вводяться у відповідні комірки затверджені дані розрахунку. При введенні даних необхідно звернути увагу на таке: якщо число є десятковим дробом, то необхідно відділяти цілу частину від дробової крапкою, в іншому випадку, якщо буде поставлено кому, програма при спробі розрахунку видасть помилку та колір комірки, в якій допущено помилку, зміниться на червоний.

Після введення всіх даних у вікно програми потрібно натиснути кнопку «Розрахунок». Програма виконає відповідно розрахунки та видасть повідомлення «Розрахунок завершено». Разом із тим у директорії, де знаходиться файл програми ORTR, буде створено файл з прізвищем, введеним в першому рядку програми. Цей файл буде створено із розширенням *.txt (у нашому випадку файл матиме назву Петренко.txt).

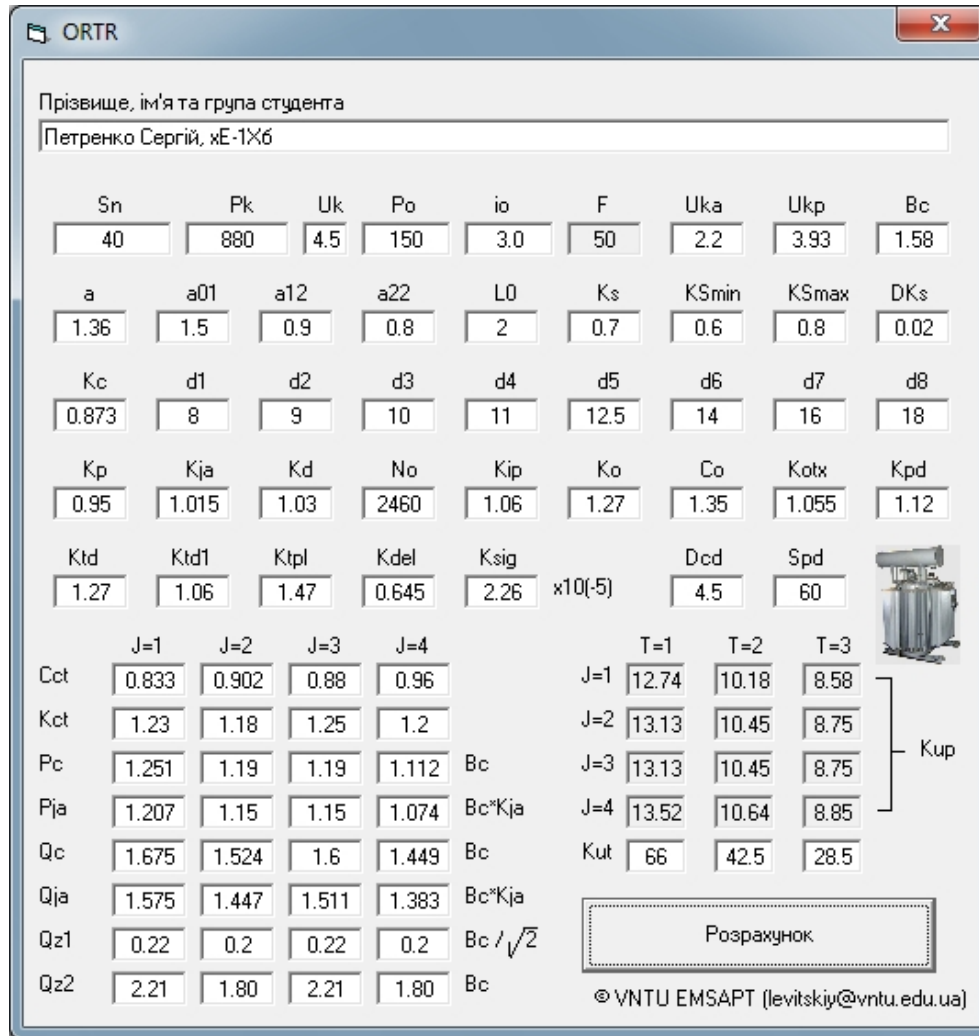


Рисунок 2.4 – Вікно програми ORTR

Створений файл з розрахунком відкривається у будь-якому текстовому редакторі. Структура файлу розрахунку аналогічна структурі файлу розрахунку, що формується програмою ORTR попередньої версії.

2.7 Результати розрахунку ORTR

Результатом розрахунку в ORTR є дані (6 варіантів), що містять значення коефіцієнта K_s , густини струму та висоти обмоток, а також дані для порівняння розмірів магнітопроводу з розрахунковою. Приклад:

$K_s=0.750$

Марка стали $J = 1$ 3404 $\sigma=0.35$ мм

Тип стыков $T = 2$ прямих - 3, косых - 4

Диаметр стержня $D = 11.000$ см

Длина обмотки $l = 29.766$ см

Плотность тока $\Delta = 1.65399$ А/мм²

$A5=4.818$

$A6=2.506$

$P4=81.681$

$U3= 2.859$

$L=24.04$

$G1= 63.2088$

$G2=72.2708$

$G3=5.724$

$$\begin{array}{llll} \mathbf{G}=135.480 & \mathbf{G0}=35.61 & \mathbf{C}=218.7159 & \mathbf{P0}=220.0449 \\ \mathbf{Q0}=1533.245 & \mathbf{F0}=2.434 & \mathbf{W}=2.7253 & \end{array}$$

Результати друкуються для діапазону K_s від K_{smin} до K_{smax} з кроком ΔK_s . Для подальшого розрахунку потрібно обрати варіант для такого значення K_s , яке відповідає заданій потужності трансформатора, матеріалу обмоток, для чого потрібно скористатись табл. 2.12. В тому разі, коли табличне значення K_s для трансформатора відрізняється від розрахункових, бажано вибрати варіант зі значенням K_s найближчим більшим до табличного. Крім цього потрібно перевіряти умови (2.14) – (2.18).

Додаткові результати розрахунку, що надаються у вигляді зашифрованих змінних:

- A5 – сума осьових розмірів обмоток ВН і НН, см – $(a_1 + a_2)$;
- A6 – ширина каналу розсіювання між обмотками ВН і НН, см – a_p ;
- P4 – переріз стержня, cm^2 – P_c ; U3 – напруга одного витка, В – u_b ;
- L – відстань між стержнями, см; G1 – маса стержнів, кг – G_c ;
- G2 – маса ярем, кг – G_y ; G3 – маса одного кута магнітопроводу, кг – G_k ;
- G – маса сталі (всього магнітопроводу), кг – G_c ;
- G0 – маса обмоток, кг – G_o ; C – вартість активної частини, грн. – $C_{ач}$;
- P0 – втрати холостого ходу, Вт – P_0 ; F0 – струм холостого ходу, % – i_0 ;
- Q0 – намагнічувальна потужність, ВА – Q_0 ;
- W – механічне напруження в обмотках при короткому замиканні, МПа – σ_p .

Таблиця 1.11 – Значення оптимального коефіцієнта K_s

$S_{нн}$, кВА	Al		Cu	
	6 – 10 кВ	20 – 35 кВ	6 – 10 кВ	20 – 35 кВ
25	1	1	0,8	0,8
40	0,97	0,98	0,775	0,78
63	0,9	0,925	0,725	0,75
100	0,84	0,875	0,67	0,7
160	0,78	0,83	0,625	0,67
250	0,725	0,775	0,58	0,62
400	0,69	0,74	0,55	0,59
630	0,66	0,712	0,53	0,575
1000	0,625	0,66	0,5	0,525
1600	0,61	0,65	0,49	0,52
2500	0,58	0,645	0,48	0,512
4000	0,57	0,625	0,46	0,5
6300	0,54	0,6	0,425	0,48
10000	0,5	0,58	0,4	0,475
16000	0,5	0,575	0,39	0,47

3 РОЗРАХУНОК ОПТИМАЛЬНОГО ВАРІАНТА ТРАНСФОРМАТОРА

Перевірочний розрахунок виконується для знайденого за допомогою ЕОМ оптимального діаметра стержня $d_{\text{опт}}$ (далі просто d) і відповідних йому висоти обмоток l , марки сталі $J_{\text{опт}}$, типу стиків $T_{\text{опт}}$ та середньої густини струму $\Delta_{\text{ср}}$. Усі інші величини уточнюються в процесі розрахунку, але вони не мають значно відрізнятись від відповідних величин, знайдених у попередньому розрахунку за допомогою ORTR.

Значення усіх ізоляційних відстаней, визначених раніше, використовуються і в попередньому розрахунку.

3.1 Вибір типу обмоток

Тип обмотки може бути вибраний за її номінальними значеннями напруги, струму і потужності, причому перевагу потрібно надавати найбільш простим у виготовленні і дешевим обмоткам.

У пропонованих для проектування трансформаторах застосовуються чотири типи обмоток:

а) *двошарова циліндрична обмотка* з прямокутного проводу – одна з найбільш простих і дешевих у виготовленні, але недостатньо міцна у механічному відношенні. Через це вона застосовується тільки на стороні НН у трансформаторах потужністю не більше 630 кВА при фазному струмі до 800 А для мідного проводу і до 600 А – для алюмінієвого проводу та напругах до 0,69 кВ включно;

б) *гвинтова обмотка* з прямокутного проводу – більш складна і дорога у виготовленні порівняно з попередньою, але має високу механічну міцність при короткому замиканні. Це обумовило її застосування на стороні НН в трансформаторах з фазним струмом більше 800 А для мідного та більше 600 А для алюмінієвого проводу і напругою до 10 кВ включно;

в) *багатошарова циліндрична обмотка* з круглого проводу за витратами на її виготовлення наближається до двошарової циліндричної і застосовується у трансформаторах потужністю до 1000 кВА включно переважно на стороні ВН при напругах 10...35 кВ включно. При цьому вона може використовуватись тільки при з'єднанні обмотки ВН в зірку та при струмі у ній до 65 А, що обмежується використанням для регулювання напруги перемикачем. На стороні НН ця обмотка може застосовуватись при напругах 3 кВ і більше та струмі до 80...100 А. У випадку, якщо можливе застосування двох типів обмоток, наприклад, двошарової і багатошарової циліндричних, остаточний вибір потрібно

робити після розрахунку і конструювання обох обмоток і порівняння їх між собою;

г) *неперервна спіральна (котушечна) обмотка* – найбільш складна у виготовленні, внаслідок чого застосовується тоді, коли інші типи обмоток не підходять за якими-небудь параметрами. На стороні ВН ця обмотка застосовується завжди за умови, що фазний струм перевищує 65 А при будь-якій схемі її з'єднання та при напругах 3 кВ і більше. На стороні НН вона застосовується в трансформаторах потужністю більше 1000 кВ·А та напругах 3, 6 і 10 кВ.

3.2 Розрахунок обмотки низької напруги

Обмотка НН розташована ближче до стержня магнітопроводу, тобто є внутрішньою, тому розрахунок починається з неї.

Основний елемент будь-якої обмотки – виток. Залежно від струму виток може складатись з одного чи декількох паралельних проводів прямокутного чи круглого перерізу. Окремі витки обмотки можуть групуватись в котушки (котушечні обмотки). Котушкою називається група послідовно з'єднаних витків обмотки, конструктивно об'єднана і відокремлена від інших таких груп. Обмотка може складатись з одної, двох чи декількох десятків котушок.

Активний переріз стержня магнітопроводу:

$$P_c = P_{fc} \cdot K_3, \quad (3.1)$$

де P_{fc} – площа ступінчастої фігури стержня, відповідна діаметру d і визначається з табл. 1.1, см^2 ;

K_3 – коефіцієнт заповнення ступінчастої фігури активною сталлю, визначається для обраної марки сталі $J_{\text{опт}}$.

Напруга (ЕРС) одного витка:

$$u_v = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c \cdot 10^{-4}, \quad (3.2)$$

де B_c – робоча індукція у стержні, Тл.

Число витків обмотки НН:

$$w_1 = \frac{U_{1\text{фн}} \cdot 10^3}{u_v}. \quad (3.3)$$

Розраховане значення w_1 округлюється до найближчого цілого числа.

Потрібний переріз витка, мм²:

$$\Pi_{1\text{тр}} = \frac{I_{1\text{фн}}}{\Delta_{1\text{доп}}}, \quad (3.4)$$

де $\Delta_{1\text{доп}}$ – густина струму в обмотці НН, за якої будуть забезпечені задані у ній втрати при допустимому нагріванні, $\Delta_{1\text{доп}} = 1,05 \cdot \Delta_{\text{ср}}$, А/мм².

Подальший розрахунок залежить від типу обраної обмотки, але для будь-якого типу у ній необхідно точно дотримуватись числа витків w_1 , а підібраний із стандартних проводів переріз витка та відповідно густина струму Δ_1 можуть відрізнятись від потрібних не більше, ніж на $\pm 5\%$.

3.2.1 Двошарова циліндрична обмотка

Ця обмотка складається з двох котушок (шарів), намотаних одним чи декількома паралельними проводами. Обидва шари з'єднуються між собою послідовно. На рис. 3.1 показано приклад цієї обмотки, намотаної одним паралельним проводом. Внутрішня котушка (шар H_1-K_1) намотується або безпосередньо на бакелітовий циліндр 1, або на букові рейки 2, прокладені між циліндром і витками котушки. В першому випадку внутрішня поверхня цієї котушки не контактує з маслом, тобто не охолоджується.

Зовнішня котушка (шар H_2-K_2) намотується у тому ж напрямку, тільки витки цього шару укладаються в осьовому напрямку знизу вгору так, що початок і кінець фази (a, x) розміщуються на одному краю обмотки (зазвичай вгорі).

На рис. 3.1 для більш наочного подання зовнішній шар умовно показано зміщеним вниз відносно внутрішнього шару. Між шарами за допомогою вертикальних рейок 3 утворюється осьовий масляний канал для охолодження обмотки.

В обмотках усіх типів розрізняють осьовий напрямок, що збігається з віссю стержня магнітопроводу, на який насаджена обмотка, та радіальний напрямок, що збігається з напрямком його радіуса.

Розміри прямокутних проводів в осьовому напрямку – осьовий розмір – прийнято позначати літерою «**b**», а радіальний розмір – «**a**».

У розглянутій обмотці усі витки одного шару мають однаковий середній діаметр. Якщо потрібний переріз витка перевищує найбільший з наявних перерізів стандартних проводів, то обмотку доводиться намотувати декількома паралельними проводами, причому ці проводи розміщуються один над одним так, що їх середній діаметр і загальна довжина будуть однаковими. Зазвичай усі проводи у витку беруться однаковими, тоді вони будуть мати однакові опори і струми у них будуть однаковими, що і потрібно при роботі трансформатора.

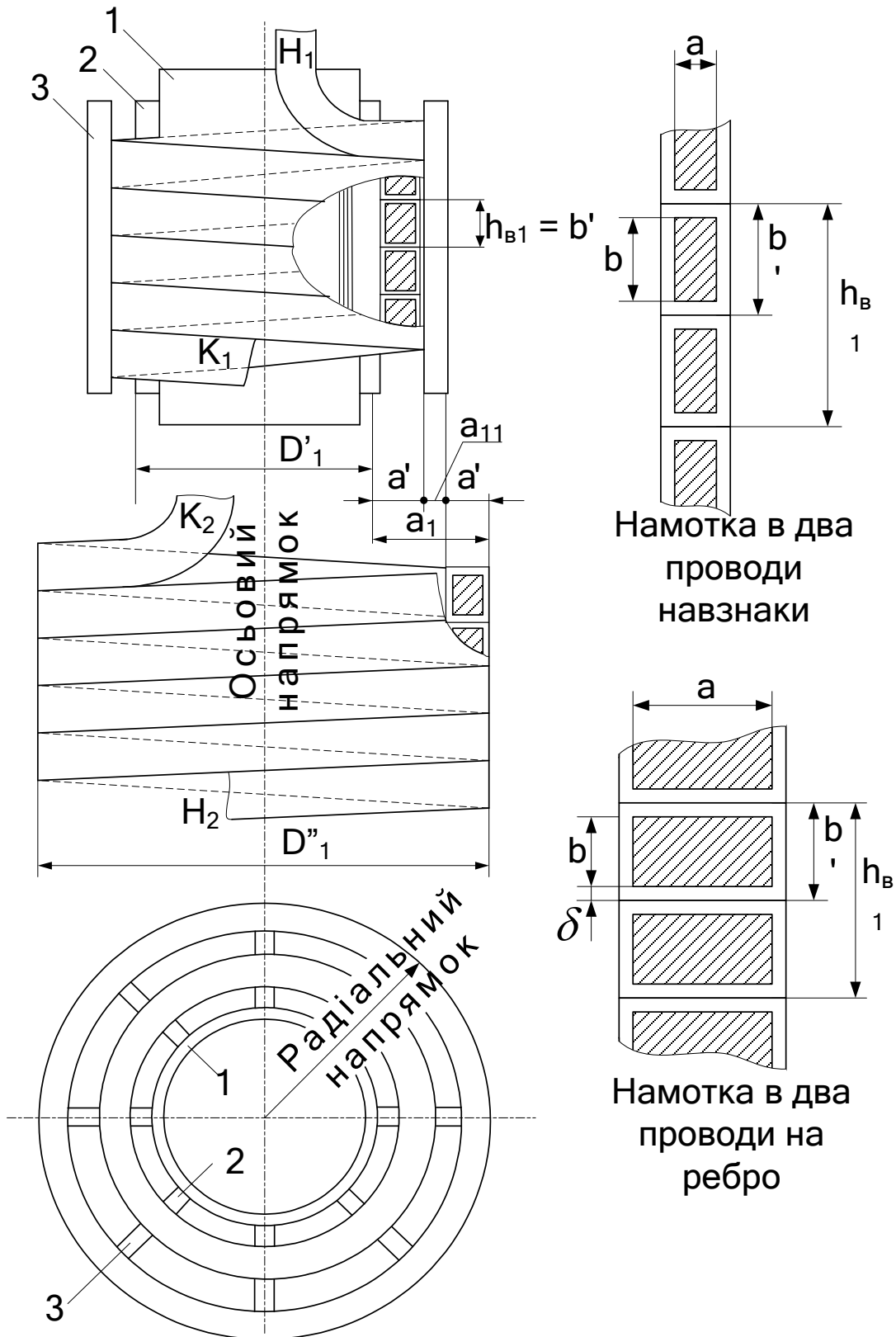


Рисунок 3.1 – Двошарова циліндрична обмотка

Кожний провідник має власну ізоляцію, одностороння товщина якої позначається δ (див. рис. 3.1) . Тоді осьовий і радіальний розміри проводів з урахуванням двосторонньої товщини ізоляції будуть:

$$b' = b + 2 \cdot \delta; \quad a' = a + 2 \cdot \delta. \quad (3.5)$$

На рис. 3.1 показано виток, що складається з одного провідника. У цьому випадку висота витка $h_{в1} = b'$. Справа зображено витки, що складаються з двох паралельних провідників ($h_{в1} = 2b'$), причому зверху показано розташування провідників у витку при намотці «навзнаки» ($b' > a'$), а знизу – при намотці «на ребро» ($b' < a'$). *Намотка «на ребро» допускається при умові $1,3 < b'/a' < 3$.*

Для виготовлення обмотки застосовують мідний і алюмінієвий обмоточні проводи марок ПБ і АПБ, ізольовані стрічками кабельного паперу класу нагрівостійкості А ($\theta_{доп} = 105^\circ\text{C}$) та відповідають вимогам ГОСТ 26606-85 [6].

Розміри стандартних проводів наведено в табл. 3.1. У верхньому рядку таблиці дано розміри в міліметрах одної сторони прямокутника, а у лівому і правому крайньому стовпцях – другої. На перетині розмірів сторін вказано його поперечний переріз (мм^2). Мідний провід має усі розміри, наведені в таблиці, за виключенням двох останніх рядків (17 і 18 мм). Алюмінієвий провід – усі розміри таблиці вправо і вверх від жирної риски.

В силових масляних трансформаторах застосовується провід з нормальною товщиною ізоляції $2 \cdot \delta = 0,5$ мм. В деяких обмотках може використовуватись провід з посиленою ізоляцією $2 \cdot \delta = 1,06$ мм або 1,5 мм.

Розрахунок обмотки зводиться до вибору розмірів і кількості стандартних паралельних проводів та розмірів самої обмотки. Розрахунок виконується в такій послідовності.

Визначається число витків у одному шарі

$$w_{ш1} = w_1 / 2. \quad (3.6)$$

Потрібна висота витка для отримання обмотки висотою l , мм,

$$h_{в1гр} = \frac{10 \cdot l}{w_{ш1} + 1}. \quad (3.7)$$

В загальному випадку виток може складатись з $n_{в1}$ паралельних проводів. Розрахунок слід починати з $n_{в1} = 1$ як найпростішого варіанта

обмотки. Якщо при цьому не вдається підібрати один стандартний провід потрібної висоти та перерізу, то переходять до варіанта $n_{в1} = 2$ і т. д.

При цьому необхідний переріз обмоточного проводу становитиме:

$$П_{пр.тр} = П_{1тр} / n_{в1}. \quad (3.8)$$

Необхідна висота проводу з ізоляцією:

$$b'_{тр} = h_{в1тр} / n_{в1}, \quad (3.9)$$

без ізоляції

$$b_{тр} = b'_{тр} - 2 \cdot \delta. \quad (3.10)$$

Наприклад, нехай для мідної обмотки $П_{1тр} = 136 \text{ мм}^2$, $h_{в1тр} = 18,3 \text{ мм}$. При $n_{в1} = 1$ маємо $b_{тр} = 18,3 / 1 - 0,5 = 17,8 \text{ мм}$. З табл. 3.1 видно, що стандартний мідний провід з таким розміром однієї сторони відсутній, тому переходимо до варіанта при $n_{в1} = 2$: $b_{тр} = 18,3/2 - 0,5 = 8,65 \text{ мм}$. Найближчий до потрібного стандартний провід має осьовий розмір $b_{тр} = 8,5 \text{ мм}$. Найбільший можливий переріз цього проводу при $a = 5,6 \text{ мм}$ становить $П_{пр} = 46,7 \text{ мм}^3$. Для отримання $П_{1тр} = 136 \text{ мм}^2$ необхідно мати $n_{в1} = 136 / 46,7 = 2,91$ проводів, при цьому можна вкласти в цю висоту витка $h_{в1тр}$ тільки два проводи висотою $8,5 \text{ мм}$. Відповідно, цей варіант не підходить, тому переходимо до наступного: при $n_{в1}=3$, $b_{тр}=18,3/3-0,5=5,6 \text{ мм}$. Стандартний провід з таким розміром сторони існує (останнє значення верхнього рядка табл. 3.1) – $b = b_{тр} = 5,6 \text{ мм}$.

Потрібний переріз одного проводу при $n_{в1} = 3$ проводів.

$$П_{пр.тр} = П_{1тр} / n_{в1} = 136 / 3 = 45,3 \text{ мм}^3.$$

При $b = 5,6 \text{ мм}$ є провід з перерізами $43,9$ та $46,7 \text{ мм}^3$. Необхідно вибрати найближчий до потрібного перерізу, але оскільки в цьому випадку $45,3$ лежить точно посередині між $43,9$ та $46,7$, то вибираємо $П_{пр} = 46,7 \text{ мм}^2$, щоб отримати менші густини струмів та втрати в обмотці. Цьому перерізу відповідає другий (радіальний) розмір проводу $a = 8,5 \text{ мм}$. Оскільки $a > b$, то намотка буде здійснюватись «на ребро». Умова $1,3 < a/b < 3$ виконується, оскільки $a/b = 8,5/5,6 = 1,53$. Таким чином, остаточно вибираємо три паралельні проводи з розмірами $b = 5,6 \text{ мм}$, $a = 8,5 \text{ мм}$ та $П_{пр} = 46,7 \text{ мм}^3$.

Таблиця 3.1 – Розміри прямокутних обмоточних проводів

Сторони	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8	1,9	2	2,12	2,24	2,36	2,5	2,65	2,8	3	3,15	3,35	3,55	3,75	4	4,25	4,5	4,75	5	5,3	5,6
3,75	5,04	—	5,79	—	6,39	—	7,14	—	8,04	—	8,83	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,6	8,89	9,45	10,1	10,7	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,25	5,74	—	6,59	—	7,29	—	8,14	—	9,16	—	10,1	—	11,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,5	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13	13,6	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
4,75	6,44	—	7,39	—	8,19	—	9,14	—	10,3	—	11,3	—	12,8	—	14,4	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
5	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12	12,7	13,5	14,5	15,2	16,2	17,2	—	—	—	—	—	—	—	—
5,3	7,21	—	8,27	—	9,18	—	10,2	—	11,5	—	12,7	—	14,3	—	16,2	—	18,3	—	—	—	—	—	—	—	—
5,6	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	8,19	—	9,39	—	10,4	—	11,6	—	13,1	—	14,5	—	16,3	—	18,4	—	20,8	—	23,1	—	—	—	—	—	—
6,3	8,61	9,24	9,87	10,4	11	11,6	12,2	13	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	—	—	—	—
6,7	9,11	—	10,5	—	11,7	—	13	—	14,7	—	16,2	—	18,2	—	20,6	—	23,2	—	25,9	—	—	—	—	—	—
7,1	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	32,9	34,6	—	—
7,5	10,3	—	11,8	—	13,1	—	14,6	—	16,4	—	18,2	—	20,5	—	23,1	—	26,1	—	29,1	—	—	—	—	—	—
8	11	11,8	12,6	13,2	14	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	37,1	39,2	41,5	43,9
8,5	11,7	—	13,4	—	14,9	—	16,6	—	18,7	—	20,7	—	23,3	—	26,2	—	29,6	—	33,1	—	—	—	—	—	—
9	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22	23,3	24,7	26,5	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5
9,5	13,1	—	15	—	16,1	—	18,6	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29,4	—	33,2	—	37,1	—	—	—	—	—	—
10	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22	23,1	24,5	26	27,5	29,5	31	33	35	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1
10,6	14,6	—	16,8	—	18,7	—	20,8	—	23,4	—	26	—	29,1	—	32,8	—	37,1	—	41,5	—	—	—	—	—	—
11,2	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1	30,8	33,1	34,7	37	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9
11,8	—	—	18,7	—	20,9	—	23,2	—	26,1	—	29	—	32,5	—	36,6	—	41,3	—	46,3	—	—	—	—	—	—
12,5	—	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29	30,7	32,6	34,5	37	38,8	41,3	43,8	46	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1
13,2	—	—	—	—	23,4	—	26	—	29,2	—	32,5	—	36,4	—	41	—	46,3	—	51,9	—	—	—	—	—	—
14	—	—	—	—	24,8	26,2	27,6	29,3	31	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5	43,6	46,4	49,2	52	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5
15	—	—	—	—	—	—	29,6	—	33,2	—	37	—	41,5	—	46,7	—	52,7	—	59,1	—	—	—	—	—	—
16	—	—	—	—	—	—	31,6	33,6	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	75,1	79,1	83,9	88,7
17	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	47,2	—	53,2	—	59,4	—	67,1	—	—	—	—	—	—
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	53,1	55,8	59,4	63	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9

Зазвичай записуються тип проводу, кількість паралельних проводів та розміри кожного в такому вигляді:

$$\text{провід ПБ (АПБ) } n_{\text{в1}} \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \frac{8,5 \times 5,6}{9,0 \times 6,1}; \Pi_{\text{пр}} = 46,7 \text{ мм}^3.$$

Враховуючи погіршену тепловіддачу при намотці «на ребро», має виконуватись умова (для мідного проводу):

$$a \leq \frac{7,5 \cdot q_{\text{доп}}}{T \cdot \Delta_1^2}, \quad (3.11)$$

де $q_{\text{доп}} = (1200 \dots 1400) \text{ Вт/м}^2$ – гранично допустима густина теплового потоку на поверхні обмотки, тобто втрати в ній, віднесені до одиниці поверхні охолодження,

T – питома теплоємність матеріалу обмотки, $T = 107$ для міді, $T = 172$ для алюмінію.

Дійсні значення висоти витка (мм) та його перерізу (мм^2):

$$h_{\text{в1}} = n_{\text{в1}} \cdot b'; \Pi_1 = n_{\text{в1}} \cdot \Pi_{\text{пр}}. \quad (3.12)$$

Дійсна висота обмотки, см:

$$l_1 = 0,1 \cdot h_{\text{в1}} \cdot (w_{\text{ш1}} + 1) + 1, \quad (3.13)$$

де 1 см враховує технологічний допуск при виготовленні обмотки.

Дійсна густина струму в обмотці, А/мм^2 :

$$\Delta_1 = I_{1\text{фн}} / \Pi_1. \quad (3.14)$$

Дійсна висота l_1 та густина струму Δ_1 обмотки не можуть відрізнятися від попередніх значень l (з розрахунку ORTR) та $\Delta_{1\text{доп}}$ не більше, ніж на $\pm 5\%$.

В записці потрібно розрахувати та вказати величину цього відхилення.

$$\begin{cases} \delta_l = \frac{|l_1 - l|}{l} \cdot 100\%, \\ \delta_{\Delta} = \frac{|\Delta_{1\text{доп}} - \Delta_1|}{\Delta_{1\text{доп}}} \cdot 100\%. \end{cases} \quad (3.15)$$

Радіальний розмір обмотки (див. рис. 3.1), см:

$$a_1 = 0,2 \cdot a' + a_{11}, \quad (3.16)$$

де a_{11} – ширина каналу між внутрішнім та зовнішнім шарами, значення якого в обмотках напругою до 1 кВ вибирається таким, що дорівнює 0,4...0,5 см при $l_1 < 30$ см; 0,5...0,6 см при $l_1 = 30...50$ см та 0,6...0,8 см при $l_1 = 50...100$ см.

Внутрішні та зовнішні діаметри обмотки, відповідно D'_1 та D''_1 , см:

$$D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}; \quad D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \quad (3.17)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки (всіх фаз), намотаної на рейки (обидва шари охолоджуються з обох сторін), м²:

$$P_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot (D''_1 + D'_1) \cdot l_1 \cdot 10^{-4}, \quad (3.18)$$

де $k = 0,75$ – коефіцієнт, який враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та іншими ізоляційними деталями.

3.2.2 Гвинтова обмотка

Ця обмотка може бути одно-, дво- та чотириходновою. Одноходова обмотка намотується декількома (зазвичай не менше чотирьох) паралельними проводами прямокутного перерізу на рейки 2, розташовані по твірних бакелітового циліндра 1 (рис. 3.2). Всі паралельні проводи мають бути однакових розмірів і намотування їх виконується «навзнаки», тобто *радіальний розмір проводів завжди має бути меншим осьового*.

Крім того, паралельні проводи у витку, на відміну від циліндричної обмотки, лежать не один на одному, а поряд, тобто всі вони мають однакову висоту, але різні середні діаметри витка.

Кожен виток обмотки утворює окрему котушку. Котушка одна від одної відокремлені масляним каналом, який утворений прокладками з електрокартону, розташованими між ними в місцях розташування рейок.

При більшій кількості проводів доцільно розташовувати їх не в одній, а в двох однакових котушках, які намотуються паралельно та розташовуються одна над одною. Така обмотка називається двоходовою. Іноді виконується і чотириходова обмотка (з чотирьох паралельних котушок-гвинтів при струмі, вищому 2000...2500 А).

Оскільки паралельні проводи гвинтової обмотки мають різну довжину

(внутрішні коротші за зовнішні), то їх опори також будуть різними, що є причиною нерівномірного розподілу струму між ними (внутрішні більше нагріватимуться, ніж зовнішні). Для його вирівнювання застосовується транспозиція паралельних проводів, суть якої полягає у вирівнюванні їхніх опорів шляхом місцевого перекладання (транспозиції) проводів внутрішніх у зовнішні і навпаки. З цією метою при намотуванні обмотки розміщують у різних положеннях з таким розрахунком, щоб повна довжина всіх проводів була однаковою і кожна з них у сумі займала однакове положення відносно поля розсіювання трансформатора.

Так, в одноходовій обмотці робляться дві групові і одна загальна транспозиції. При групових транспозиціях, які виконуються через $\frac{1}{4}$ та $\frac{3}{4}$ загальної кількості витків, половина внутрішніх проводів (два із чотирьох на рис. 3.2) міняються місцями з іншою половиною зовнішніх. При загальній транспозиції, яка виконується в середині обмотки, кожний провід змінює своє положення. В двоходовій обмотці застосовується рівномірна розподілена транспозиція, суть якої зводиться до того, що кожний провід на всій довжині обмотки має побувати у всіх положеннях. При n проводів має бути виконано n транспозицій кожного проводу. Зазвичай перша транспозиція виконується через $\frac{1}{2}n$ витків від початку обмотки, а наступні – через $1/n$ витків. На рис. 3.2 показано приклад такої транспозиції при восьми проводах (по чотири проводи у кожному з ходів). При кожній транспозиції виконується кругове переміщення проводів у межах обох ходів. Після виконання всіх транспозицій проводи мають зайняти вихідне положення.

Розрахунок обмотки виконується у такій послідовності.

Визначається потрібна висота витка для одноходової обмотки, мм:

$$h_{в1тр} = \frac{10 \cdot l}{w_1 + 4} - h_{к1}. \quad (3.19)$$

Для дво- та чотириходової обмотки потрібна висота витка становить, мм:

$$h_{в1тр} = \frac{10 \cdot l}{w_1 + 1} - h_{к1}, \quad (3.20)$$

де $h_{к1} = 4 \dots 5$ мм – висота масляного каналу між котушками.

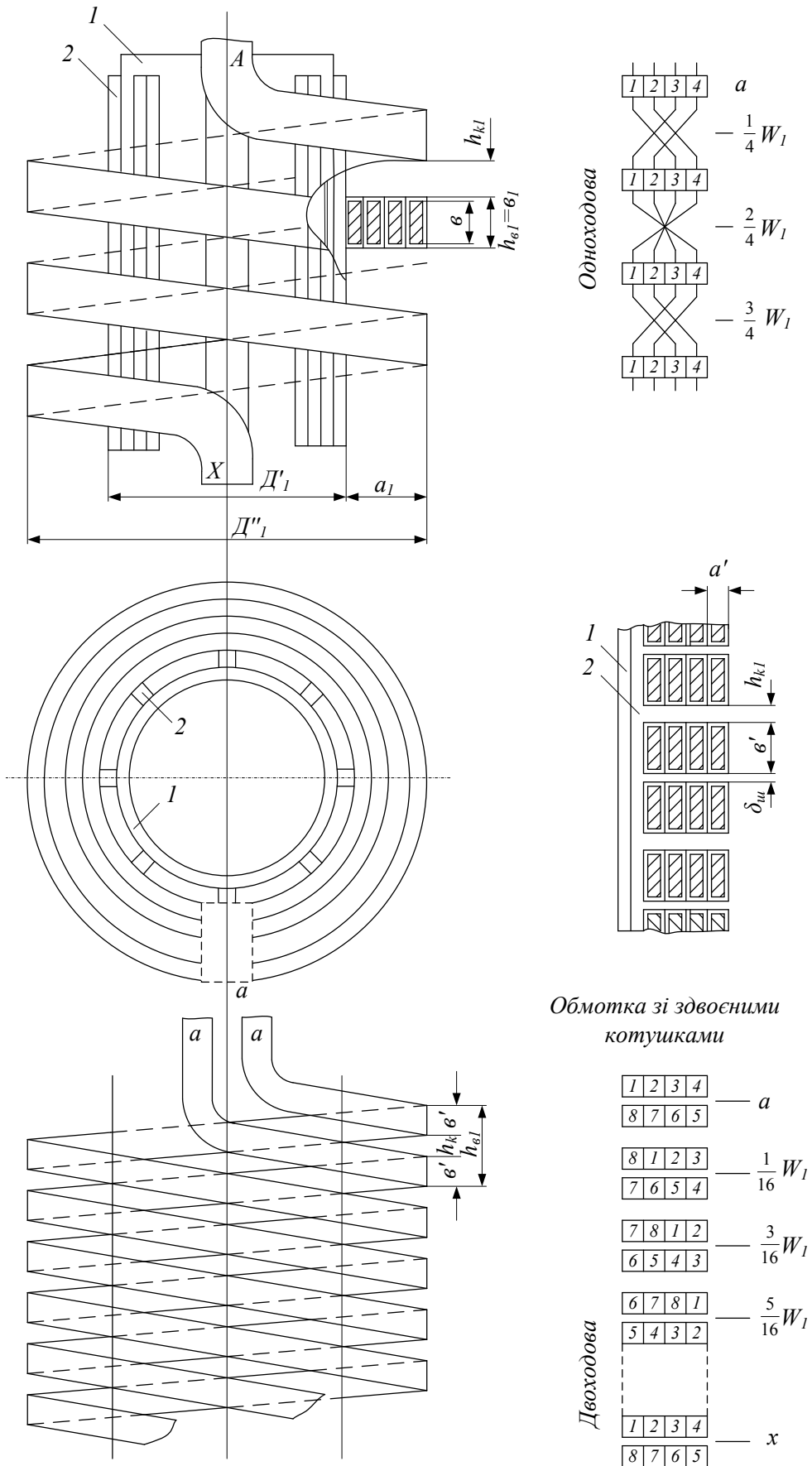


Рисунок 3.2 – Гвинтова обмотка

Спочатку розраховується $h_{в1тр}$ для однофазної обмотки. Якщо її значення буде меншим 16,5 мм для алюмінієвого проводу, то далі розраховується саме ця обмотка, а якщо більшим, розраховують $h_{в1тр}$ за (3.20). Якщо при цьому $16,5 \text{ мм} \leq h_{в1тр} \leq 38 \text{ мм}$ для міді і $18,5 \text{ мм} \leq h_{в1тр} \leq 42 \text{ мм}$ для алюмінію, то обмотка буде двофазною, а якщо $h_{в1тр} > 38$ (42) мм, необхідно розраховувати чотирифазову обмотку.

Потрібна висота проводу з ізоляцією (див. рис. 3.2), мм:

$$\begin{cases} b'_{тр} = h_{в1тр}, & \text{(однофазова),} \\ b'_{тр} = 0,5 \cdot (h_{в1тр} - h_{к1}), & \text{(двофазова),} \\ b'_{тр} = 0,25 \cdot (h_{в1тр} - 3 \cdot h_{к1}), & \text{(чотирифазова).} \end{cases} \quad (3.21)$$

Потрібна висота проводу без ізоляції, мм:

$$b_{тр} = b'_{тр} - 0,5. \quad (3.22)$$

По табл. 3.1 підбирається стандартний провід з висотою $b \approx b_{тр}$.

Необхідний сумарний радіальний розмір всіх проводів, мм:

$$a_{\Sigma тр} = \Pi_{1тр} / b. \quad (3.23)$$

По тій же табл. 3.1 вибирається стандартний радіальний розмір одного проводу a , який має бути меншим його висоти b . Після цього обчислюється потрібна кількість паралельних проводів обмотки:

$$n_{в1} = a_{\Sigma тр} / a. \quad (3.24)$$

Вибрана ширина проводу та кількість паралельних проводів в гвинтовій обмотці мають відповідати таким умовам:

- а) в однофазній обмотці кількість паралельних проводів $n_{в1}$ має бути цілим числом або близьким до нього, в останньому випадку $n_{в1}$ округлюється до найближчого цілого числа;
- б) у двофазній обмотці $n_{в1}$ має бути цілим та парним числом або округлюватися до нього;

в) в чотириходовій обмотці $n_{\epsilon l}$ має бути цілим і кратним чотирьом або округлюватися до нього.

Вибрані розміри стандартного проводу записуються у такому ж вигляді, як і для двошарової обмотки.

Дійсні перерізи витка (мм^2) та густина струму, А/мм^2 :

$$\begin{cases} \Pi_1 = n_{\text{вл}} \cdot \Pi_{\text{пр}}, \\ \Delta_1 = I_{\text{лфн}} / \Pi_1. \end{cases} \quad (3.25)$$

Для розрахованого перерізу проводу має виконуватися умова:

$$0,95 \cdot \Delta_{1\text{доп}} \leq \Delta_1 \leq 1,05 \cdot \Delta_{1\text{доп}}. \quad (3.26)$$

Крім того, більший (осьовий) осьовий розмір проводу має задовільняти умову нормального тепловідводу з поверхні обмотки:

$$b \leq \frac{10 \cdot q_{\text{доп}}}{T \cdot \Delta_1^2}, \quad (3.27)$$

де T , $q_{\text{доп}}$ – питома теплоємність матеріалу обмотки та допустима густина теплового потоку на поверхню обмотки (див. (3.11)).

Остаточна висота гвинтової обмотки (залежно від кількості ходів), см:

$$\begin{cases} l_1 = 0,1 \cdot [b' \cdot (w_1 + 4) + k \cdot h_{\text{кл}} \cdot (w_1 + 3)], & \text{(одноходова),} \\ l_1 = 0,1 \cdot [2 \cdot b' \cdot (w_1 + 1) + k \cdot h_{\text{кл}} \cdot (2 \cdot w_1 + 1)], & \text{(двоходова),} \\ l_1 = 0,1 \cdot [4 \cdot b' \cdot (w_1 + 1) + k \cdot h_{\text{кл}} \cdot (4 \cdot w_1 + 1)], & \text{(чотириходова).} \end{cases} \quad (3.28)$$

де $k = 0,94 \dots 0,96$ – коефіцієнт, що враховує усадку міжкотушечних прокладок після сушки та пресування обмотки.

Кінцева висота обмотки не може відрізнятись від її попереднього значення більше, ніж на $\pm 5\%$. Підгін під задану висоту може відбуватися зміною висоти каналу в заданих межах – $h_{\text{кл}} = 4; 4,5; 5,0$ мм.

Радіальний розмір одно-, дво- та чотириходової обмотки, відповідно, см:

$$\begin{cases} a_1 = 0,1 \cdot a' \cdot n_{B1}, & (\text{однофазова}), \\ a_1 = 0,1 \cdot a' \cdot n_{B1} / 2, & (\text{двофазова}), \\ a_1 = 0,1 \cdot a' \cdot n_{B1} / 4, & (\text{чотирифазова}). \end{cases} \quad (3.29)$$

Внутрішній (D'_1) та зовнішній (D''_1) діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}, \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (3.30)$$

Повна площа поверхні охолодження, m^2 :

$$\begin{cases} P_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, & (\text{однофазова}), \\ P_{01} = 12 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, & (\text{двофазова}), \\ P_{01} = 24 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, & (\text{чотирифазова}). \end{cases} \quad (3.31)$$

де $k = 0,75$ – коефіцієнт, що враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та прокладками.

3.2.3 Багатошарова циліндрична обмотка

Ця обмотка намотується одним або двома паралельними проводами *круглого* перерізу або прямо на циліндр 1 (рис. 3.3, а), або на вертикальній рейці 2, розташованій між циліндром та витками обмотки. При намотуванні двома паралельними проводами вони розташовуються один під одним як у двошаровій циліндричній обмотці, внаслідок чого їхній опір однаковий, і струм між ними розподіляється рівномірно. Між шарами проводів прокладається ізоляція 5 з декількох шарів кабельного паперу, який приклеюється до бортиків 4 з електрокартону. При великій кількості шарів обмотки внутрішні шари будуть перегріватися, тому з метою вирівнювання умов охолодження всієї обмотки її зазвичай виконують у вигляді двох концентричних котушок, розділених осьовим масляним каналом a_{11} на стороні НН і a'_{22} , якщо обмотка використовується на стороні ВН. На рис. 3.3 зображено обмотку ВН, тому всі її розміри мають індекс 3. Обмотка НН має таку ж саму конструкцію та розміри, але з індексом 1. Крім того, вона виконується без екрана та регулювальних відгалужень і витків. Для намотування обмотки застосовуються круглі стандартні мідні проводи марки ПБ та алюмінієві марки АПБ, діаметри $d_{пр}$, та перерізи $P_{пр}$ яких наведено в табл. 3.3.

У проєктованих трансформаторах потрібно використовувати розрахункову двосторонню товщину ізоляції круглого проводу $2 \cdot \delta = 0,4$ мм.

Розрахунок обмотки виконується в такій послідовності. *Висота обмотки вибирається такою, що дорівнює розрахунковій* ($l_1 = 1$). За потрібним перерізом витка $\Pi_{1\text{тр}}$ підбирається один ($n_{\text{в1}} = 1$) або два ($n_{\text{в1}} = 2$) стандартних круглих проводи з табл. 3.3. Вибрані розміри проводу записуються в такому вигляді:

$$\text{провід ПБ (АПБ) } n_{\text{в1}} \frac{d_{\text{пр}}}{d'_{\text{пр}}} = 2 \frac{1,20}{1,24}; \Pi_{\text{пр}} = 1,11 \text{ мм}^2,$$

де $d'_{\text{пр}} = d_{\text{пр}} + 2 \cdot \delta$ – діаметр проводу з ізоляцією.

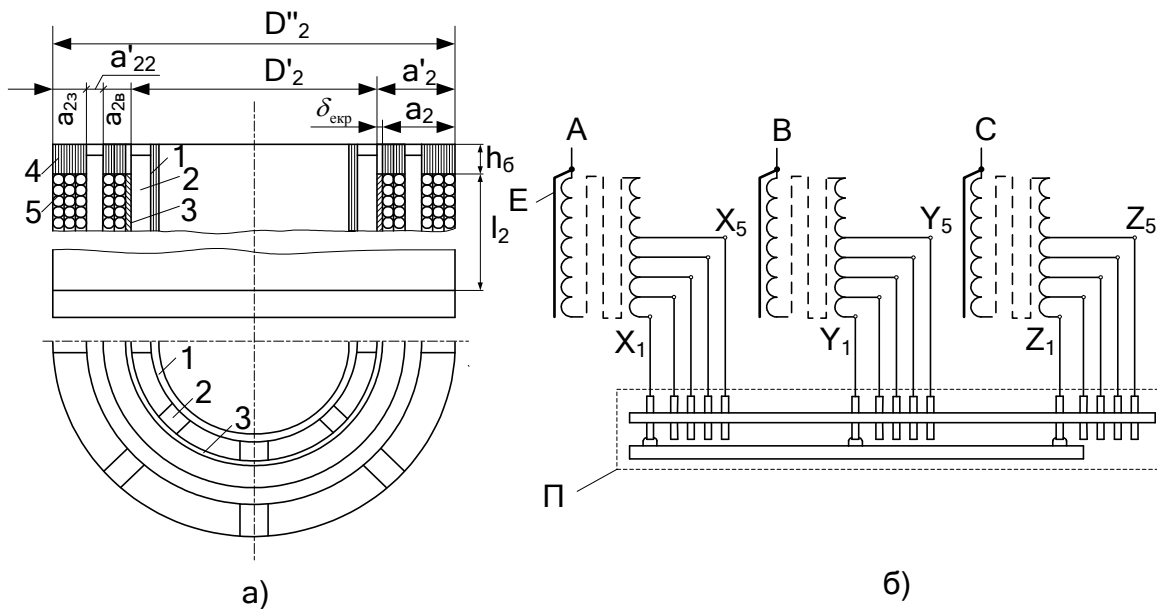


Рисунок 3.3 – Багатошарова циліндрична обмотка ВН (Е – екран, П – перемикач регулювальних відгалужень)

Дійсні перерізи витка (мм^2) та густина струму, А/мм^2 :

$$\begin{cases} \Pi_1 = n_{\text{в1}} \cdot \Pi_{\text{пр}}, \\ \Delta_1 = I_{1\text{фн}} / \Pi_1. \end{cases} \quad (3.32)$$

Дійсна густина струму може відрізнятись від $\Delta_{1\text{доп}}$ не більше, ніж на $\pm 5\%$. У записці необхідно розрахувати це відхилення за (3.15) та вказати його значення.

Кількість витків у шарі:

$$w_{ш1} = l_1 / (0,1 \cdot n_{в1} \cdot d'_{пр}) - 1. \quad (3.33)$$

Кількість шарів обмотки:

$$n_{ш1} = w_1 / w_{ш1}. \quad (3.34)$$

Таблиця 3.2 – Діаметри та перерізи обмоточних проводів круглих перерізів

Діаметр проводу $d_{пр}, \text{мм}$	Переріз проводу $\Pi_{пр}, \text{мм}$	Діаметр проводу $d_{пр}, \text{мм}$	Переріз проводу $\Pi_{пр}, \text{мм}$	Діаметр проводу $d_{пр}, \text{мм}$	Переріз проводу $\Pi_{пр}, \text{мм}$
ПЕЛБО – мідь		ПБ – мідь		2,5	4,91
0,57	0,255	1,18	1,094	2,65	5,515
0,67	0,353	1,20	1,11	2,8	6,16
0,69	0,374	1,25	1,23	3,0	7,07
0,72	0,407	1,30	1,33	3,15	7,795
0,74	0,430	ПБ, АПБ (алюміній)		3,35	8,81
0,77	0,466	1,32	1,37	3,55	9,895
0,80	0,503	1,35	1,43	3,75	11,05
0,83	0,541	1,40	1,51	4,0	12,5
0,86	0,581	1,50	1,77	4,1	13,2
0,90	0,636	1,60	2,015	4,25	14,2
0,93	0,679	1,70	2,27	4,5	15,9
0,96	0,724	1,80	2,545	4,75	17,7
1,00	0,785	1,90	2,805	5,0	19,63
1,04	0,849	2,0	3,14	5,2	21,22
1,08	0,916	2,12	3,53	5,3	22,06
1,12	0,985	2,24	3,94	6,0 (АПБ)	28,26
1,16	1,06	2,36	4,375	8,0 (АПБ)	50,24

Отриману розрахункову кількість шарів округлити до більшого цілого числа.

Радіальний розмір обмотки, що складається з двох котушок, см:

$$a_1 = 0,1 \cdot d'_{пр} \cdot n_{ш1} + 0,1 \cdot \delta_{мш} \cdot (n_{ш1} - 1) + a_{11}, \quad (3.35)$$

де $\delta_{мш}$ – товщина міжшарової ізоляції, що вибирається з табл. 3.3 за робочою напругою двох шарів обмотки: $U_{мш} = 2 \cdot w_{ш1} \cdot u_{в}$;

a_{11} – ширина осевого каналу між внутрішньою $a_{1в}$ та зовнішньою $a_{1з}$ котушками, дорівнює 0,4...0,5 см при $l = l_1 < 30$ см; 0,5...0,6 см при $l_1 = 30...50$ см та 0,6...0,8 см при $l_1 = 50...100$ см; $h_б$ – висота бортика (див. рис. 3.3, а).

Кількість шарів внутрішньої котушки дорівнює половині загальної кількості шарів, округлений до більшого цілого числа: $n_{ш1в} \approx 0,5n_{ш1}$.

Радіальний розмір зовнішньої котушки, см:

$$a_1 = 0,1 \cdot (d'_{пр} \cdot n_{ш1з} + \delta_{мш} \cdot (n_{ш1} - 1)), \quad (3.36)$$

де $n_{ш1з} = n_{ш1} - n_{ш1в}$ – кількість шарів зовнішньої котушки.

Внутрішній (D'_1) та зовнішній (D''_1) діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}, \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (3.37)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, m^2 :

$$P_{01} = 3 \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot l_1 \cdot 10^{-4}, \quad (3.38)$$

де $n = 2,0$ – кількість котушок в обмотці (внутрішня та зовнішня);
 $k = 0,75$ – коефіцієнт, що враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та прокладками.

Таблиця 3.3 – Товщина міжшарової ізоляції та висота бортика

$U_{мш}, В$	$\delta_{мш}, мм$	$h_б, см$
До 1000	$2 \times 0,12$	1,0
1001...2000	$3 \times 0,12$	1,6
2001...3000	$4 \times 0,12$	1,6
3001...3500	$5 \times 0,12$	1,6
3501...4000	$6 \times 0,12$	2,2
4001...4500	$7 \times 0,12$	2,2
4501...5000	$8 \times 0,12$	2,2
5001...5500	$9 \times 0,12$	2,2

3.2.4 Неперервна спіральна котушечна обмотка

Ця обмотка намотується одним або кількома (не більше п'яти) однаковими паралельними проводами прямокутного перерізу на

вертикальні рейки 2 (рис. 3.4), розташовані між бакелітовим циліндром 1 та котушками обмотки. На рис. 3.4 зображена обмотка, намотана по чотири витки в кожній котушці одним проводом, витки в котушці намотуються по спіралі один на одного, причому при звичайному намотуванні перший виток завжди знаходиться всередині, а останній – зовні.

Друга котушка намотується тим самим проводом і розташовується під першою та з'єднується з нею послідовно. Між котушками має бути утворений канал h_k , розмір якого визначається сумою напруг двох котушок. При звичайній намотці з'єднувальний провідник (головний провід обмотки) має проходити в каналі між котушками, оскільки він з'єднує кінець першої котушки, що знаходиться зовні її, з початком другої, розташованим всередині котушки. Аналогічні з'єднання будуть між всіма котушками.

Відповідно кожний канал по висоті має збільшуватися на товщину провoda, внаслідок чого збільшиться і вся висота обмотки. Для усунення недоліку необхідно вилучити з'єднувальний провідник з каналу між котушками, здійснюючи перекладку витків в усіх непарних котушках.

Таким чином, в обмотці всі парні котушки матимуть звичайну намотку (зсередини назовні), а всі непарні – зворотну намотку (ззовні всередину). Технологічно це здійснюється таким чином. Після звичайної намотки котушки зі зворотною намоткою, послабивши натяг провoda, «розвалюють» її витки та здійснюють перекладку першого (внутрішнього) витка на місце останнього (зовнішнього), другого знизу на місце другого зверху і т. д. В результаті такого перекладання початок котушки опиниться зовні, а кінець – всередині її при тій же довжині провoda та розмірах котушки. Потім провід перегинається (по ребру) і переходить по твірній циліндра в іншу котушку, котра намотується звичайним чином без перекладки.

Витки третьої котушки знову перекладаються, внаслідок чого її початок опиняється зовні та перехід з другої в третю котушку здійснюється по зовнішній поверхні обмотки. Внаслідок такого способу виконання обмотки з'єднувальні провідники зникають з каналів між котушками, а їхню роль виконують внутрішні (ВП) та зовнішні (НП) переходи, що виконуються тим самим проводом (рис. 3.4, а).

Обмотка НН буде мати неперервний ряд послідовно з'єднаних котушок. Початок обмотки (фази) завжди розташований зовні першої котушки, тому необхідно щоб початок та кінець її був розташований зовні останньої котушки. Для виконання цієї умови необхідно, щоб обмотка мала чітко визначену кількість котушок.

Якщо безперервна обмотка є обмоткою високої напруги, вона звичайно виконується з двох однакових половин, між якими робиться збільшений масляний канал за допомогою прокладки. У цьому місці півобмотки мають розрив і їх з'єднання між собою виконується за допомогою перемикача для зміни числа витків обмотки.

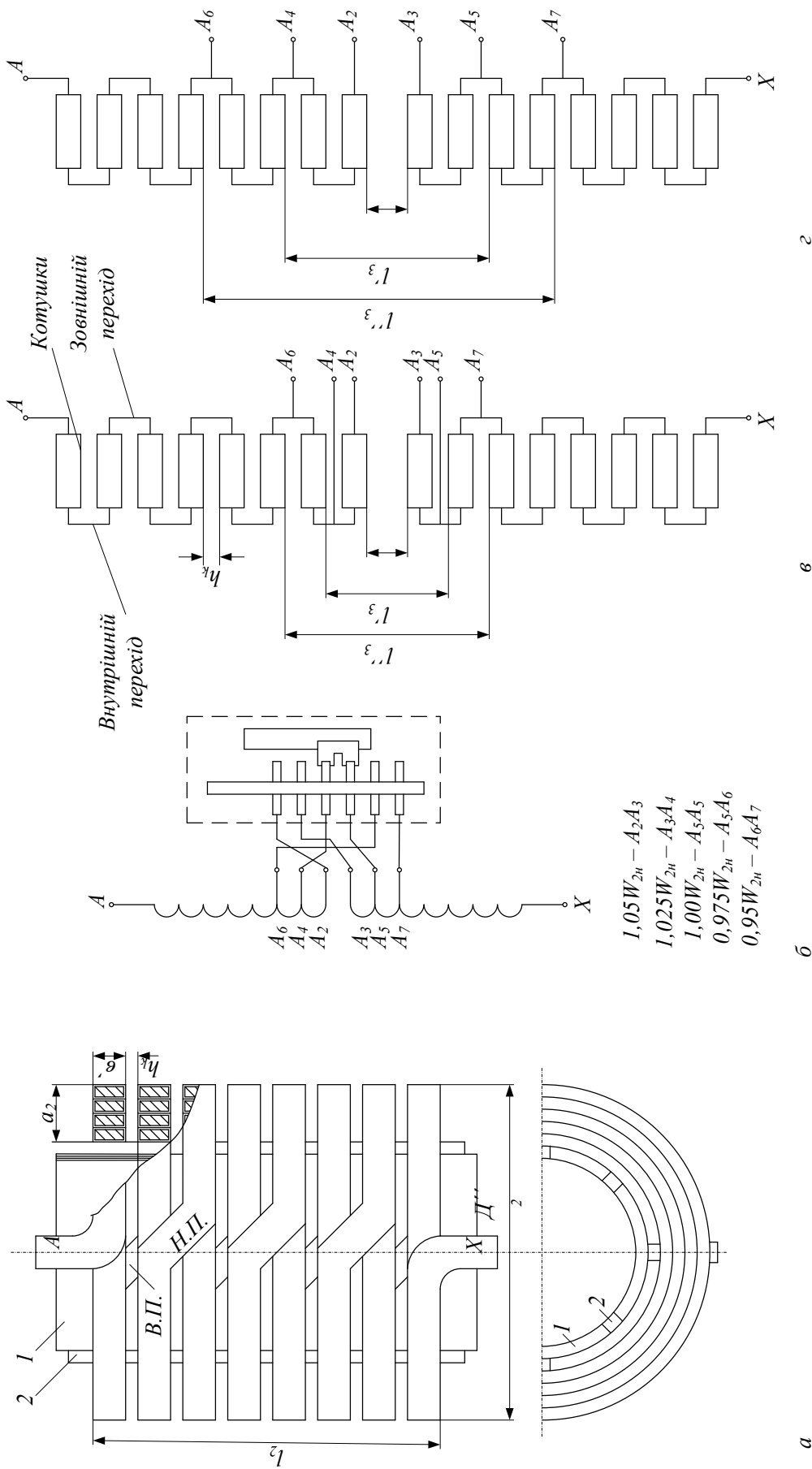


Рисунок 3.4 — Неперервна спіральна котушечна обмотка ВН

Регулювальні відгалуження знаходяться посередині висоти обмотки (по три відгалуження на кожній півобмотці: А2, А4, А6 – на верхній і А3, А5, А7 – на нижній). Бажано, щоб регулювальні відгалуження виконувалися від зовнішніх переходів між котушками, для цього між сусідніми відгалуженнями має бути парне число котушок.

При непарному числі котушок між відгалуженнями вони мають виконуватися як від зовнішніх, так і від внутрішніх переходів, що менш зручно. Відгалуження від зовнішніх переходів виконуються у вигляді петель, утворених тим же проводом. У місці розташування регулювальних відгалужень переходи додатково ізолюються коробками з електрокартону, на які накладається бандаж з тафтяної стрічки.

Крайні котушки, регулювальні відгалуження, а також початки і кінці півобмоток закріплюються бандажами з кіперної стрічки. Якщо обмотка намотується декількома паралельними проводами, має проводитися їх транспозиція на кожному зовнішньому переході, як у гвинтовій обмотці. Зовні обмотка додатково кріпиться вертикальними смугами з електрокартону, закріпленими в прокладках. Опорні поверхні обмотки створюються прокладками, що закріплюються на рейках.

Розміри бакелітового циліндра, а також прокладок і рейок такі ж, як і в гвинтовій обмотці.

Розрахунок обмотки здійснюється в такій послідовності.

Гранично допустима висота проводу з врахуванням нормального тепловідведення з поверхні обмотки визначається з умови:

$$b \leq \frac{10 \cdot q_{\text{доп}}}{T \cdot \Delta_1^2}, \quad (3.39)$$

де T , $q_{\text{доп}}$ – питома теплоємність матеріалу обмотки та допустима густина теплового потоку на поверхню обмотки (див. (3.11)).

По табл. 3.1 підбирається стандартний провід з розміром b меншим, але якомога ближчим до отриманого значення за (3.39). Потім розраховують сумарний необхідний радіальний розмір проводу при вибраному осьовому розмірі, мм:

$$a_{\Sigma \text{тр}} = \Pi_{1\text{тр}} / b. \quad (3.40)$$

Розрахункова потрібна кількість паралельних провідників:

$$n_{в1} = a_{\Sigma TP} / a, \quad (3.41)$$

де a – радіальний розмір стандартного проводу, що вибирається таким, щоб $n_{в1}$ було цілим числом або якомога ближчим до цілого (не більшим 5). В останньому випадку значення $n_{в1}$ заокруглюється до найближчого цілого. Крім того, має виконуватись умова $a < b$.

Вибрані розміри проводу записуються в такому ж вигляді, як і для гвинтової чи двошарової циліндричної обмотки:

$$\text{провід ПБ (АПБ)} \quad n_{в1} \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \frac{5,6 \times 8,5}{6,1 \times 9,0}; \quad \Pi_{пр} = 46,7 \text{ мм}^3.$$

де $a' = a + 2 \cdot \delta$; $b' = b + 2 \cdot \delta$.

Дійсні перерізи витка (мм^2) та густина струму, А/мм^2 :

$$\begin{cases} \Pi_1 = n_{в1} \cdot \Pi_{пр}, \\ \Delta_1 = I_{1фн} / \Pi_1. \end{cases} \quad (3.42)$$

Отримане значення густини струму не повинно відрізнятися від значення $\Delta_{1доп}$ більше, ніж на $\pm 5\%$. Дійсне відхилення має бути розраховано та вказано в записці (3.15).

Кількість котушок обмотки

$$n_{к1} = \frac{1 + h_k}{0,1 \cdot b' + h_k}, \quad (3.43)$$

де h_k – висота каналу між котушками, значення якого вибирають кратним 0,05 см; $h_k = 0,4 \dots 0,7$ см.

Отримане значення $n_{к1}$ округлюють до ближчого більшого парного числа.

Середня кількість витків в котушці:

$$w_{к1ср} = w_1 / n_{к1}. \quad (3.44)$$

Значення $w_{к1ср}$ може вийти цілим або дробовим числом. Якщо воно ціле, то такі котушки легко виконуються технологічно і це означає, що така обмотка буде мати всі однакові котушки з кількістю витків $w_{к1ср}$ кожна.

Якщо ж отримане значення $w_{к1ср}$ – дробове число, то практичне виконання таких котушок залежить від дробової частини числа. Якщо обмотчик досить просто може практично виконати цю дробову частину витка, тоді всі котушки також виконуються однаковими, але з дробовою кількістю витків. Практично легко виконуються такі дробові частини витків, знаменник дробу яких дорівнює кількості вертикальних рейок 2 (див. рис. 3.4, а), на які намотуються котушки обмотки. Відстань між двома сусідніми рейками – мінімальна дробова частина витка. Кількість цих рейок залежить від потужності трансформатора: при $S_n \leq 100$ кВА їх кількість має дорівнювати 6; при потужностях $S_n = 100 \dots 630$ кВА – 8 рейок; при $S_n = 1000 \dots 1600$ кВА – 10 рейок; при $S_n = 2500 \dots 16000$ кВА – 12–14 рейок.

Нехай отримано значення $w_{к1ср} = 5,4$ при дванадцяти рейках. Обмотчик може легко відраховувати такі дробові частини витків – $1/12$, $2/12$, $3/12$ і т. д. В прикладі дробова частина $w_{к1ср}$ становить $4/10 = 4/10 \times 1,2/1,2 = 4,8/12$, що практично намотати неможливо. Якщо взяти всі котушки по $5 \frac{4}{12}$ або по $5 \frac{5}{12}$ витка, то неможливо отримати задану кількість витків w_1 (у першому випадку отримаємо дещо менше значення, у другому – більше), а задане значення w_1 потрібно виконувати точно. Для цього доводиться виконувати два типи котушок, що відрізняються числами витків в них. Ця відмінність не може перевищувати одного витка. В котушці з меншою кількістю витків між витками вкладаються полоски електрокартону для вирівнювання радіальних розмірів всіх котушок.

Таким чином, у обмотці з дробовим середнім числом витків в котушках буде $n'_{к1}$ котушок по $w'_{к1}$ витків та $n''_{к1}$ котушок по $w''_{к1}$ витків, причому:

$$\begin{cases} n'_{к1} + n''_{к1} = n_{к1}, \\ n'_{к1} \cdot w'_{к1} + n''_{к1} \cdot w''_{к1} = w_1. \end{cases} \quad (3.45)$$

Значення $w'_{к1}$ та $w''_{к1}$ вибираються такими, що дорівнюють ближчим цілим числам відповідно зліва та справа від значення $w_{к1ср}$. Для розглянутого прикладу з $w_{к1ср} = 5,4$ витка це число знаходиться між 5 та 6, тому вибираємо $w'_{к1} = 5$, а $w''_{к1} = 6$ (можна брати $w'_{к1} = 5 \frac{4}{12}$; $w''_{к1} = 5 \frac{5}{12}$). Тоді в системі (3.45) залишаються два невідомі $n'_{к1}$ та $n''_{к1}$, які легко знаходяться.

Виразивши $n''_{к1} = n_{к1} - n'_{к1}$ та підставивши його у друге рівняння системи (3.45), отримаємо:

$$n'_{k1} = \frac{W_{k1} - n_{k1} \cdot W''_{k1}}{W'_{k1} - W''_{k1}}. \quad (3.46)$$

Взявши $n_{k1} = 40$ котушок та кількість витків обмотки: $w_1 = 5,4 \cdot 40 = 216$ витків, знайдемо:

$$n'_{k1} = \frac{216 - 40 \cdot 6}{5 - 6} = 24 \text{ котушки}; \quad n''_{k1} = 40 - 24 = 16 \text{ котушок.}$$

Ця операція називається розгоном витків по різних типах котушок.

Отже, у розглянутому прикладі обмотка буде мати 24 котушки по 5 витків та 16 котушок по 6 витків. Всього в обмотці буде $w_1 = 24 \times 5 + 16 \times 6 = 216$ витків, тобто стільки, скільки необхідно.

Дійсна висота обмотки, см:

$$l_1 = 0,1 \cdot b' \cdot n_{k1} + h_k \cdot (n_{k1} - 1). \quad (3.47)$$

Значення l_1 бажано якомога ближче підігнати до початкової величини l (з ORTR), що можна здійснити зміною значення h_k в межах рекомендованого діапазону (3.43).

Радіальний розмір обмотки, см:

$$a_1 = 0,1 \cdot n_{b1} \cdot a' \cdot W_{k1cp}. \quad (3.48)$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}, \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (3.49)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, m^2 :

$$П_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot n_{k1} \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, \quad (3.50)$$

де k – коефіцієнт, що враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та прокладками; $k = 0,75$.

3.3 Розрахунок обмотки високої напруги

При виборі та розрахунку обмотки ВН слід враховувати необхідність виконання в обмотці відгалужень для регулювання напруги. В проєктованих трансформаторах здійснюється регулювання напруги перемиканням відгалужень обмотки без збудження трансформатора (ПБЗ), для чого обмотка ВН повинна мати відгалуження, що відповідають (1,05; 1,025; 1,0; 0,975; 0,95) від номінальної напруги.

Кількість витків обмотки, що відповідає номінальній напрузі:

$$w_{2H} = w_1 \cdot \frac{U_{2фH}}{U_{1фH}}. \quad (3.51)$$

Кількість витків, що відповідає одній ступені регулювання ($0,025 \cdot U_H$):

$$w_p = 0,025 \cdot w_{2H}. \quad (3.52)$$

Значення w_{2H} та w_p округлюють до найближчих цілих чисел.

Кількість витків, що відповідають регулювальним відгалуженням:

$$\begin{cases} 1,05 \cdot U_H \rightarrow w_{2H} + 2 \cdot w_p, \\ 1,025 \cdot U_H \rightarrow w_{2H} + w_p, \\ 1,0 \cdot U_H \rightarrow w_{2H}, \\ 0,975 \cdot U_H \rightarrow w_{2H} - w_p, \\ 0,95 \cdot U_H \rightarrow w_{2H} - 2 \cdot w_p. \end{cases} \quad (3.53)$$

Потрібний переріз витка обмотки:

$$\Pi_{2тр} = I_{2фH} / \Delta_{2доп}, \quad (3.54)$$

де $\Delta_{2доп}$ – допустима густина струму в обмотці ВН, при якій будуть забезпечені задані в ній втрати при допустимому нагріванні, A/mm^2 ; $\Delta_{2доп} = 0,95 \Delta_{ср}$.

3.3.1 Багатошарова циліндрична обмотка високої напруги

Конструкція та технологія намотування цієї обмотки нічим не відрізняється від відповідної обмотки НН (див. п. 3.2.3 та рис. 3.3). На відміну від попередньої (обмотки НН), багатошарова циліндрична обмотка ВН повинна мати регульовальні відгалуження, розташовані в кінці кожної фази, тобто поблизу нульової точки зірки. При цьому напруги між відгалуженнями сусідніх фаз малі, що дозволяє знизити габаритні розміри перемикача. Ця обмотка *завжди* з'єднується в зірку, а її нульова точка утворюється на рухомій металевій рейці перемикача П (див. рис. 3.3, б). Нерухомі контакти перемикача з'єднані з регульовальними відгалуженнями обмотки.

В обмотках ВН напругою 35 кВ для вирівнювання розподілу напруг по витках обмотки в момент дії на неї хвилі перенапруги (наприклад, атмосферного розряду статичної електрики) застосовується металевий екран Е (рис. 3.3, б), що являє собою незамкнений циліндр з товщиною стінки 0,5 мм та з'єднаний електрично з лінійним кінцем обмотки (з початком відповідної фази). Екран розташовується під першим шаром обмотки та ізолюється від нього звичайною міжшаровою ізоляцією. Товщина ізолюваного екрана становить 3 мм.

Розрахунок обмотки виконується в такій же послідовності, як і обмотки НН.

За потрібним перерізом витка $\Pi_{2\text{тр}}$ підбираються один або два стандартних круглих проводи з табл. 3.2, вибрані дані проводу записуються за прикладом:

$$\text{провід ПЕЛБО } n_{\text{в1}} \frac{d_{\text{пр}}}{d'_{\text{пр}}} = 1 \frac{0,80}{0,84}; \Pi_{\text{пр}} = 0,503 \text{ мм}^2,$$

де $d'_{\text{пр}}$ – діаметр провода з ізоляцією; $d'_{\text{пр}} = d_{\text{пр}} + 2 \cdot \delta$.

Дійсні перерізи витка (мм^2) та густина струму, А/мм^2 :

$$\Pi_2 = n_{\text{в2}} \cdot \Pi_{\text{пр}}; \Delta_2 = I_{2\text{фн}} / \Pi_2. \quad (3.55)$$

Дійсна густина струму може відрізнитися від $\Delta_{2\text{доп}}$ не більше, ніж на $\pm 5\%$. Розраховується відхилення за формулою (3.15). У випадку, якщо при розрахунку характеристик короткого замикання (п. 3.4) в обмотці ВН обчислені втрати короткого замикання значно перевищують втрати в обмотці НН і необхідно підібрати провід більшого перерізу, допускається відхилення густини струму в сторону зменшення більше, ніж 5%.

Кількість витків в одному шарі обмотки:

$$w_{ш2} = \frac{l_2}{0,1 \cdot n_{в2} \cdot d'_{пр}} - 1, \quad (3.56)$$

де l_2 – висота обмотки ВН, см; береться такою, що дорівнює дійсній висоті l_1 обмотки НН ($l_2 = l_1$).

Кількість шарів обмотки ВН:

$$n_{ш2} = \frac{w_{2н} + 2 \cdot w_p}{w_{ш2}}. \quad (3.57)$$

Отримане значення $n_{ш2}$ округлити до більшого цілого числа.

Бажано, щоб всі регульовальні витки обмотки ($4 \cdot 0,025 \cdot w_{2н} = 0,1 w_{2н}$) були розташовані в одному або двох останніх шарах, що потрібно для зручного виведення відгалужень. Через це має дотримуватись умова (3.58), яку при розрахунку потрібно перевірити.

$$0,1 \cdot w_{2н} \leq 2 \cdot w_{ш3}. \quad (3.58)$$

Радіальний розмір обмотки з екраном, що складається з двох котушок, см:

$$a'_2 = 0,1 \cdot d'_{пр} \cdot n_{ш2} + 0,1 \cdot \delta_{мш} \cdot (n_{ш2} - 1) + a'_{22} + \delta_{екр}, \quad (3.59)$$

де $\delta_{екр}$ – товщина екрана від атмосферних перенапруг в обмотках напругою 35 кВ; $\delta_{екр} = 0,3$ см, при менших напругах $\delta_{екр} = 0$ см;

$\delta_{мш}$ – товщина міжшарової ізоляції, мм;

a'_{22} – ширина між внутрішньою та зовнішньою котушками обмотки, мм.

Значення $\delta_{мш}$ та a'_{22} визначаються за рекомендаціями, що наведені в п. 3.3.3, але для $U_{мш} = 2 \cdot w_{ш2} \cdot u_v$.

Число шарів внутрішньої обмотки вибирається $n_{ш2в} = 0,2 \dots 0,3 \cdot n_{ш2}$ (округлюється до цілого числа). Відповідно число шарів зовнішньої котушки буде дорівнювати:

$$n_{ш2з} = n_{ш2} - n_{ш2в}. \quad (3.60)$$

Радіальний розмір зовнішньої котушки, см:

$$a_{23} = 0,1 \cdot (d'_{\text{пр}} \cdot n_{\text{ш2н}} + \delta_{\text{мш}} \cdot (n_{\text{ш23}} - 1)). \quad (3.61)$$

Внутрішній (D'_2) та зовнішній (D''_2) діаметри обмотки, см:

$$D'_2 = D''_1 + 2 \cdot a_{12}; \quad D''_2 = D'_2 + 2 \cdot a'_2, \quad (3.62)$$

де a_{12} – ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН (рис. 2.1), см; дорівнює значенню, що вводилось в програму розрахунку ORTR.

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м^2 :

$$P_{02} = 3 \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot l_2 \cdot 10^{-4}, \quad (3.63)$$

де $n = 1,5$; $k = 0,83$ – для обмотки намотаної прямо на циліндр;
 $n = 2$; $k = 0,8$ – для обмотки, намотаної на рейки.

Спочатку потрібно розрахувати дешевший перший варіант, якщо він не підійде за питомим тепловим потоком, необхідно перейти до другого варіанта.

3.3.2 Неперервна спіральна котушечна обмотка високої напруги

Конструкція та технологія намотування обмотки – такі ж, як і відповідної обмотки НН (див. п. 3.3.4 та рис. 3.4). В цій обмотці застосовується схема регулювання, зображена на рис. 3.4, б при якій обмотка складається з двох однакових частин (верхньої та нижньої), послідовно з'єднаних між собою за допомогою перемикача П. Розташування регулювальних витків посередині висоти обмотки дозволяє зменшити осьові зусилля на регулювальні витки та котушки при короткому замиканні.

Ця схема регулювання може застосовуватись як при з'єднанні обмотки в зірку, так і в трикутник.

Необхідно, щоб початок та кінець кожної півобмотки розташовувались зовні котушок, для чого кожна з них повинна мати парну кількість котушок, а вся обмотка – кратна чотирьом.

На місці розриву обмотки робиться збільшений відносно інших канал $h_{\text{кр}} = 1,2$ см, а головні канали $h_{\text{к}} = 0,4 \dots 0,7$ см, причому розміри всіх каналів мають бути кратними 0,05 см. Зі збільшенням потужності трансформатора збільшується і висота каналу.

При впливах на обмотку хвилі атмосферної перенапруги перші (вхідні) та останні котушки витримують найбільші перенапруги. Для виключення можливості пробую у цих котушок має бути посилена ізоляція. В обмотках

напругою 20 кВ посилена ізоляція товщиною $2 \cdot \delta_{\text{пос}} = 1,06$ мм має бути у двох котушок (одна перша та одна остання), а при напрузі 35 кВ по дві котушки зверху та знизу – посилена ізоляція товщиною $2 \cdot \delta_{\text{пос}} = 1,5$ мм. Всі інші котушки мають нормальну ізоляцію. В обмотках напругою менше 20 кВ посилена ізоляція не застосовується.

Регулювальні відгалуження доцільно виконувати не від внутрішніх витків котушок, а від внутрішніх або зовнішніх переходів між ними. Тоді між двома сусідніми відпайками (ступінь регулювання) завжди буде ціле число котушок. Технологічно виконується два варіанти: одна котушка в регулювальному ступені $n_{\text{pc}} = 1$ (див. рис. 3.4, в) і дві котушки в регулювальному ступені $n_{\text{pc}} = 2$ (див. рис. 3.4, г). У першому випадку кількість витків в регулювальній котушці $w_{\text{кр}} = w_{\text{p}}$, а в другому $w_{\text{кр}} = 0,5 \cdot w_{\text{p}}$. В загальному випадку кількість витків в регулювальній котушці обчислюється за виразом:

$$w_{\text{кр}} = w_{\text{p}} / n_{\text{pc}}. \quad (3.64)$$

Зазвичай розрахунок починається при $n_{\text{pc}} = 1$, а якщо він з якихось причин не підходить, його повторюють при $n_{\text{pc}} = 2$ вважаючи, що всі котушки мають таку ж кількість витків, як і регулювальні.

Повна кількість котушок обмотки:

$$n_{\text{к2}} = \frac{w_{2\text{н}} + 2 \cdot w_{\text{p}}}{w_{\text{кр}}}. \quad (3.65)$$

Знайдене значення $n_{\text{к2}}$ округлюється до ближчого більшого числа, кратного чотирьом.

Вибравши величини $h_{\text{к}}$, $h_{\text{кр}}$ та вважаючи, що розрахункова висота обмотки ВН дорівнює висоті обмотки НН ($l_2 = l_1$), визначається осьовий розмір проводу, що дорівнює висоті котушки, мм:

$$b'_{\text{тр}} = 10 \cdot \frac{l_2 - h_{\text{к}} \cdot (n_{\text{к2}} - 2) - h_{\text{кр}}}{n_{\text{к2}}}; \quad b_{\text{тр}} = b'_{\text{тр}} - 2 \cdot \delta. \quad (3.66)$$

Знайдений розмір $b_{\text{тр}}$ має задовільняти умову нормального тепловідведення (3.39). За табл. 3.1 підбирають стандартний провід з розміром b , найближчим до $b_{\text{тр}}$, після чого розраховується сумарний необхідний радіальний розмір проводу:

$$a_{\Sigma\text{тр}} = \Pi_{2\text{тр}} / b. \quad (3.67)$$

Потім за цією ж таблицею підбирають стандартний радіальний розмір проводу так, щоб кількість паралельних проводів в обмотці (3.68) була числом цілим або близьким до нього (в останньому випадку його значення округлюється до цілого).

$$n_{\text{в}2} = a_{\Sigma\text{тр}} / a. \quad (3.68)$$

Крім того, $n_{\text{в}2}$ має бути якомога меншим для дотримання умови $a < b$. Розміри вибраного проводу записуються у вигляді:

$$\text{провід ПБ (АПБ)} \quad n_{\text{в}1} \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \frac{5,6 \times 8,5}{6,1 \times 9,0}; \quad \Pi_{\text{пр}} = 46,7 \text{ мм}^3.$$

Дійсні перерізи витка (мм^2) та густина струму, А/мм^2 :

$$\Pi_2 = n_{\text{в}2} \cdot \Pi_{\text{пр}}; \quad \Delta_2 = I_{2\text{фн}} / \Pi_2. \quad (3.69)$$

Дійсна густина струму може відрізнятися від $\Delta_{2\text{доп}}$ не більше, ніж на $\pm 5\%$. Дійсне відхилення має бути обчислене та вказане в записці (3.15).

Фактична висота обмотки з врахуванням висоти вибраного проводу, см:

$$l_2 = 0,1 \cdot b' \cdot n_{\text{к}2} + h_{\text{к}} \cdot (n_{\text{к}2} - 2) + h_{\text{кр}}. \quad (3.70)$$

Якщо фактична висота обмотки ВН l_2 різко відрізняється від l_1 , то можна підігнати зміною висоти каналів $h_{\text{к}}$ в межах рекомендованого діапазону (0,4...0,7 см).

В загальному випадку в обмотці ВН може бути $n_{\text{р}}$ регулювальних котушок по $w_{\text{кр}}$ витків у кожній, $n_{\text{п}}$ котушок з посиленою ізоляцією по $w_{\text{кп}}$ витків у кожній, а всі інші котушки називаються основними.

Кількість регулювальних котушок:

$$n_{\text{р}} = 4 \cdot n_{\text{рс}}. \quad (3.71)$$

Кількість котушок з посиленою ізоляцією $n_{\text{п}} = 2$ або 4, залежно від

величини $U_{2\text{лн}}$. Для отримання такого ж радіального розміру ці котушки повинні мати на 1–2 витка менше, ніж основні та регулювальні, тобто

$$w_{\text{кп}} = w_{\text{кр}} - (1 \dots 2). \quad (3.72)$$

Тоді кількість основних катушок:

$$n_{2o} = n_{\text{к2}} - n_{\text{р}} - n_{\text{п}}. \quad (3.73)$$

Кількість витків в основних катушках:

$$w_{2o} = w_{2\text{н}} + 2 \cdot w_{\text{р}} - n_{\text{р}} \cdot w_{\text{кр}} - n_{\text{п}} \cdot w_{\text{кп}}. \quad (3.74)$$

Середня кількість витків в основних катушках:

$$w_{2\text{косп}} = w_{2o} / n_{2o}. \quad (3.75)$$

Якщо це число отримується цілим або дробовим, але з такою дробовою частиною, знаменник якої дорівнює кількості рейок на каркасі обмотки, то всі головні катушки можуть бути виконані однаковими. Якщо дробова частина така, яку неможливо практично виконати, то «розгін» витків необхідно проводити за двома типами основних катушок відповідно до (3.45), тільки записаними для основних катушок обмотки ВН. Методика «розгону» така ж, як і для відповідної обмотки НН. В останньому випадку після вибору кількості витків всіх типів катушок має виконуватись рівняння:

$$w_{2\text{н}} + 2 \cdot w_{\text{р}} = n'_{2o} \cdot w'_{2\text{ко}} + n''_{2o} \cdot w''_{2\text{ко}} + n_{\text{р}} \cdot w_{\text{кр}} + n_{\text{п}} \cdot w_{\text{кп}}. \quad (3.76)$$

Радіальний розмір обмотки, см:

$$a_2 = 0,1 \cdot n_{\text{в2}} \cdot a' \cdot w_{2\text{косп}}. \quad (3.77)$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, см:

$$D'_2 = D''_1 + 2 \cdot a_{12}; \quad D''_2 = D'_2 + 2 \cdot a'_3, \quad (3.78)$$

де a_{12} – ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН (рис. 1.1), см; дорівнює значенню, яке вводилось в програму розрахунку ORTR.

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м²:

$$П_{02} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot n_{к2} \cdot (D'_2 + a_2) \cdot (a_2 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, \quad (3.79)$$

де k – коефіцієнт, що враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та прокладками; $k = 0,75$.

3.4 Розрахунок характеристик короткого замикання

Після конструювання обмоток розраховуються дійсні струми трансформатора, що відповідають його реальним розмірам, котрі мають задовольняти проектне завдання в межах допустимих відхилень.

3.4.1 Втрати короткого замикання

Маса металу обмоток, кг:

$$G_{01} = 1,5 \cdot K_\gamma \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot w_1 \cdot \Pi_1 \cdot 10^{-5}; \quad (3.80)$$

$$G_{02} = 1,5 \cdot K_\gamma \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot w_{2H} \cdot \Pi_2 \cdot 10^{-5}, \quad (3.81)$$

де K_γ – коефіцієнт відносної густини ($K_\gamma = 28$ – для *Cu*; $K_\gamma = 8,47$ – для *Al*).
Загальна маса металу обмоток, кг:

$$G_0 = G_{01} + G_{02} \cdot \frac{w_{2H} + 2 \cdot w_p}{w_{2H}}. \quad (3.82)$$

Основні електричні втрати в обмотках, Вт:

$$P_{ел10} = K \cdot (\Delta_1)^2 \cdot G_{01}; \quad P_{ел20} = K \cdot (\Delta_2)^2 \cdot G_{02}; \quad (3.83)$$

де K – коефіцієнт приведення ваги обмотки до її опору, для міді $K = 2,4$; для алюмінію $K = 12,75$.

Крім основних електричних втрат в обмотках з'являються додаткові

втрати, що залежать від розташування провідників відносно поля розсіювання, які враховуються коефіцієнтами β та k_d .

Коефіцієнт впливу поля розсіювання на опори обмоток залежить від того, який тип проводу використаний для обмотки – круглий чи прямокутний:

а) для обмотки з прямокутного проводу:

$$\beta = 0,1 \cdot \frac{b \cdot m}{l} \cdot K_p, \quad (3.84)$$

б) для обмотки з круглого проводу:

$$\beta = 0,1 \cdot \frac{d_{\text{пр}} \cdot m}{l} \cdot K_p, \quad (3.85)$$

де m – кількість провідників в обмотці, укладених в осьовому напрямку:

для двошарової циліндричної обмотки $m = n_{\text{в1}} \cdot w_{\text{ш1}}$;

для гвинтової одноходової обмотки $m = w_1$;

для гвинтової двоходової обмотки $m = 2 \cdot w_1$;

для гвинтової чотириходової обмотки $m = 4 \cdot w_1$;

для багатошарової циліндричної обмотки $m = n_{\text{в}} \cdot w_{\text{ш}}$;

для неперервної котушечної обмотки $m = n_k$;

$b, d_{\text{пр}}$ – розміри прямокутного та круглого проводів обмоток, мм;

K_p – коефіцієнт Роговського, $K_p = 0,95$;

l – висота відповідної обмотки, см.

Коефіцієнт збільшення втрат активної потужності за рахунок додаткових втрат:

а) для обмотки із прямокутного проводу:

$$k_d = 1 + 1,73 \cdot \beta^2 \cdot \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot a^4 \cdot (n^2 - 0,2) \cdot 10^{-4}, \quad (3.86)$$

б) для обмотки із круглого проводу:

$$k_d = 1 + 0,8 \cdot \beta^2 \cdot \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot (d_{\text{пр}})^4 \cdot (n^2 - 0,2) \cdot 10^{-4}, \quad (3.87)$$

де ρ – питомий електричний опір, Ом·м/мм²; для міді – $\rho = 0,02135$, для алюмінію – $\rho = 0,0344$;

а, $d_{\text{пр}}$ – розміри прямокутного і круглого проводів, мм;

n – число окремих провідників обмотки, укладених в радіальному напрямку:

для двошарової циліндричної обмотки	$n = 2$;
для гвинтової одноходової обмотки	$n = n_{\text{В1}}$;
для гвинтової двохходової обмотки	$n = 0,5 \cdot n_{\text{В1}}$;
для гвинтової чотирьохходової обмотки	$n = 0,25 \cdot n_{\text{В1}}$;
для багат шарової циліндричної обмотки	$n = n_{\text{ш}}$;
для неперервної котушечної обмотки	$n = n_{\text{В}} \cdot W_{\text{коср}}$.

Значення $k_{\text{д}}$ не може бути більшим 1,01...1,11. Коефіцієнти $k_{\text{д}}$ розраховуються для обох обмоток: для обмотки НН – $k_{\text{д1}}$, а обмотки ВН – $k_{\text{д2}}$).

Повні електричні втрати в обмотках, Вт:

$$P_{\text{ел1}} = k_{\text{д1}} \cdot P_{\text{ел1о}}; P_{\text{ел2}} = k_{\text{д2}} \cdot P_{\text{ел2о}}. \quad (3.88)$$

Дійсні густини теплових потоків на поверхні охолодження обмоток, Вт/м²:

$$q_1 = P_{\text{ел1}} / \Pi_{01}; q_2 = P_{\text{ел2}} / \Pi_{03}. \quad (3.89)$$

Маса металу відводів обмоток НН та ВН, відповідно (з'єднувальних провідників між обмотками і вводами і між обмотками сусідніх фаз), кг:

$$G_{\text{відв1}} = \frac{10^{-4} \cdot l_{\text{відв1}} \cdot \Pi_{\text{відв1}} \cdot K_{\gamma}}{\pi}, \quad (3.90)$$

$$G_{\text{відв2}} = \frac{10^{-4} \cdot l_{\text{відв2}} \cdot \Pi_{\text{відв2}} \cdot K_{\gamma}}{\pi}, \quad (3.91)$$

де $l_{\text{відв1}}$, $l_{\text{відв2}}$ – довжина проводів відводів обмоток НН та ВН;

для з'єднання «зірка» Y – $l_{\text{відв}} = 7,5 \cdot l$;

для з'єднання «трикутник» Δ – $l_{\text{відв}} = 14 \cdot l$;

$\Pi_{\text{відв}}$ – переріз проводу, що дорівнює перерізу витка відповідної обмотки Π_1 або Π_2 , мм³.

Електричні втрати в відводах, Вт:

$$P_{\text{відв1}} = K \cdot (\Delta_1)^2 \cdot G_{\text{відв1}}; \quad P_{\text{відв2}} = K \cdot (\Delta_2)^2 \cdot G_{\text{відв2}}. \quad (3.92)$$

Втрати в стінках бака, що виникають в них від полів розсіювання, Вт:

$$P_{\delta} = 10 k_{\delta} \cdot S_{\text{H}}, \quad (3.93)$$

де $k_{\delta} = 0,012$ в трансформаторах з $S_{\text{H}} < 1000$ кВА; $k_{\delta} = 0,025$ при $S_{\text{H}} \geq 1000$ кВА.

Повні втрати короткого замикання, Вт:

$$P_{\text{к}} = P_{\text{ел1}} + P_{\text{ел2}} + P_{\text{відв1}} + P_{\text{відв2}} + P_{\delta}. \quad (3.94)$$

Ці втрати не повинні перевищувати задані більше, ніж на 5%. В записці необхідно вказати дійсне відхилення. Якщо воно перевищує допустиме, то потрібно зменшити $P_{\text{ел1}}$ і $P_{\text{ел2}}$, знижуючи густину струму в обмотках, для чого потрібно вибрати провід більшого перерізу.

3.4.2 Напряга короткого замикання

Активна складова напруги короткого замикання, %:

$$u_{\text{а}} = \frac{P_{\text{к}}}{10 \cdot S_{\text{H}}}. \quad (3.95)$$

Середній діаметр двох обмоток, см:

$$d_{12} = D''_1 + a_{13}. \quad (3.96)$$

Приведена ширина каналу розсіювання між обмотками ВН та НН, см:

$$a_{\text{р}} = a_{12} + \delta_{\text{екр}} + \frac{(a_1 + a_2)}{3}. \quad (3.97)$$

Відносна ширина обмоток:

$$\sigma = \frac{a_{12} + \delta_{\text{екр}} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}. \quad (3.98)$$

Дійсне значення коефіцієнта Роговського:

$$K_p = 1 - \sigma \cdot \left(1 - e^{-\frac{1}{\sigma}} \right). \quad (3.99)$$

Дійсне значення напруги одного витка, В:

$$u_B = \frac{U_{1\phi} \cdot 10^3}{w_1}. \quad (3.100)$$

Середня висота обмоток, см:

$$l = (l_1 + l_2) / 3. \quad (3.101)$$

Для котушечної обмотки ВН потрібно врахувати наявність розриву між півобмотками, що полягає у визначенні коефіцієнта k_q ; для його визначення попередньо обчислюється абсолютна та відносна величини розриву при роботі на номінальному відгалуженні А4-А5.

Абсолютна величина розриву, см:

$$l'_x = 0,2 \cdot n_{pc} \cdot b' + 2 \cdot n_{pc} \cdot h_k + h_{кр}. \quad (3.102)$$

Відносна величина розриву:

$$x = l'_x / l. \quad (3.103)$$

Відповідно, коефіцієнт, що враховує наявність розриву між півобмотками:

$$k_q = 1 + \frac{1 \cdot x^2}{3 \cdot a_p \cdot K_p}. \quad (3.104)$$

Для багат шарової циліндричної обмотки ВН потрібно брати $k_q = 1$.

Реактивна складова напруги короткого замикання, %:

$$u_p = \frac{8,26 \cdot f \cdot S_H \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p \cdot k_q}{u_B^2 \cdot l} \cdot 10^{-3}. \quad (3.105)$$

Повна напруга короткого замикання, %:

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2}. \quad (3.106)$$

Знайдене значення напруги короткого замикання є важливим параметром трансформатора, тому може відрізнитись від заданого не більше, ніж на 5%. В записці необхідно вказати дійсне відхилення.

Якщо отримане u_k менше за допустиме більше, ніж на 5%, то можна збільшити u_p збільшенням відстані між обмотками a_{12} (але не більше, ніж в 1,5 рази). Якщо і цього недостатньо або відхилення u_k від заданого виявилось в більшу сторону, то потрібно повторити розрахунок при іншому значенні K_s (результати розрахунку ORTR): меншому, якщо u_k менше заданого значення і навпаки.

3.5 Механічні сили і напруженості в обмотках

Механічні сили в обмотках виникають в результаті взаємодії струму з магнітним полем розсіювання. З курсу електричних машин відомо, що в загальному випадку на кожну обмотку діють три сили, що мають найбільші значення в режимі короткого замикання і пропорційні ударному струму короткого замикання.

Радіальна сила F_p , що створюється повздовжньою складовою поля розсіювання і діє на стиск внутрішньої обмотки та розтяг зовнішньої в радіальному напрямку, визначається із співвідношення, Н:

$$F_p = 52,6 \cdot \frac{S_H \cdot u_p \cdot k_{уд}^2 \cdot 10^4}{f \cdot a_p \cdot u_k^2}, \quad (3.107)$$

де $k_{уд}$ –ударний коефіцієнт; $k_{уд} = 1 + e^{-\frac{\pi \cdot u_a}{u_p}}$.

Осьова сила $F'_{ос}$, що створюється поперечною складовою поля розсіювання і стискає обидві обмотки в осьовому напрямку:

$$F'_{oc1} = \frac{a_p}{2 \cdot l_1} \cdot F_p ; \quad F'_{oc2} = \frac{a_p}{2 \cdot l_2} \cdot F_p . \quad (3.108)$$

Осьова сила F''_{oc} викликається появою додаткового поперечного поля через нерівномірний розподіл струму по висоті обмотки ВН при відключенні регулювальних витків. Напрямок цієї сили в обмотці НН збігається з F'_{oc} , а в обмотці ВН – зустрічний F'_{oc} .

Значення цієї сили для обмотки ВН визначається в кілька етапів таким чином. Спочатку знаходяться еквівалентні діаметри відводів обмоток НН та ВН, см:

$$d_1 = 0,113 \cdot \sqrt{\Pi_1} ; \quad d_2 = 0,113 \cdot \sqrt{\Pi_2} . \quad (3.109)$$

Знаходиться проектна ширина бака, см:

$$B = D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2, \quad (3.110)$$

де S_1, S_2, S_3, S_4 – ізоляційні відстані, см; що визначаються з табл. 3.4 за відповідними випробувальними напругами:

S_1 – від обмотки ВН до відводу НН (за $U_{вип}$ обмотки ВН);

S_2 – від відводу НН до стінки бака (за $U_{вип}$ обмотки НН);

S_3 – від обмотки ВН до відводу ВН (за $U_{вип}$ обмотки ВН);

S_4 – від відводу ВН до стінки бака (за $U_{вип}$ обмотки ВН).

Проектна відстань від стержня до стінки бака, см:

$$l'' = (B - d) / 3. \quad (3.111)$$

Для неперервної котушечної обмотки визначається відстань між крайніми котушками зі струмом при відключенні всіх регулювальних витків (див. рис. 3.4, в, г) см;

$$l_x'' = 0,4 \cdot n_{pc} \cdot b' + 4 \cdot n_{pc} \cdot h_k + h_{кр} . \quad (3.112)$$

Зазначена відстань в багатошаровій обмотці ВН становить $l_x'' = 0$.

Осьова сила F''_{oc} викликається появою додаткового поперечного поля через нерівномірний розподіл струму по висоті обмотки ВН при

відключенні регулювальних витків:

$$F''_{oc1} = F''_{oc2} = \frac{l''_x \cdot F_p}{4 \cdot l'' \cdot K_p} \quad (3.113)$$

Таблиця 3.4 – Ізоляційні відстані між відводами та стінками бака

U _{вип} , кВ	до 25		35		45		55		85	
δ _{відв} , см	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2
S ₁ , S ₂ , S ₃ , S ₄ , см	2,5	2,0	3,3	2,0	4,2	2,5	5,0	3,2	9,0	5,0

Примітки:

1. Відводи НН і ВН завжди розташовуються з протилежних сторін активної частини.

2. Неізольовані відводи (δ_{відв} = 0) використовуються тільки в обмотках з U_{вип} = 5 кВ.

3. δ_{відв} – одностороння товщина ізоляції відводу.

Сумарні стискальні сили, що діють на обмотки, Н:

$$F_{ст1} = F'_{oc1} + F''_{oc1} ; \quad F_{ст2} = F'_{oc2} - F''_{oc2} \quad (3.114)$$

Якщо F_{ст2} > 0, вона стискає тільки одну обмотку, не діючи на ярма, а якщо F_{ст2} < 0, то вона давить і на обмотку, і на ярма.

Для оцінення механічної міцності обмоток визначають напруження на розрив в проводі та напруження стискання в прокладках міжкотушечної ізоляції обмоток.

Напруження на розрив в проводі обмоток, МПа:

$$\sigma_{p1} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_1 \cdot \Pi_1} ; \quad \sigma_{p2} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_{2H} \cdot \Pi_2} \quad (3.115)$$

В трансформаторах з мідними обмотками потужністю до 6300 кВА σ_p не має перевищувати 60 МПа, а при більшій потужності може досягати 150 МПа. В алюмінієвих обмотках σ_p ≤ 25 МПа.

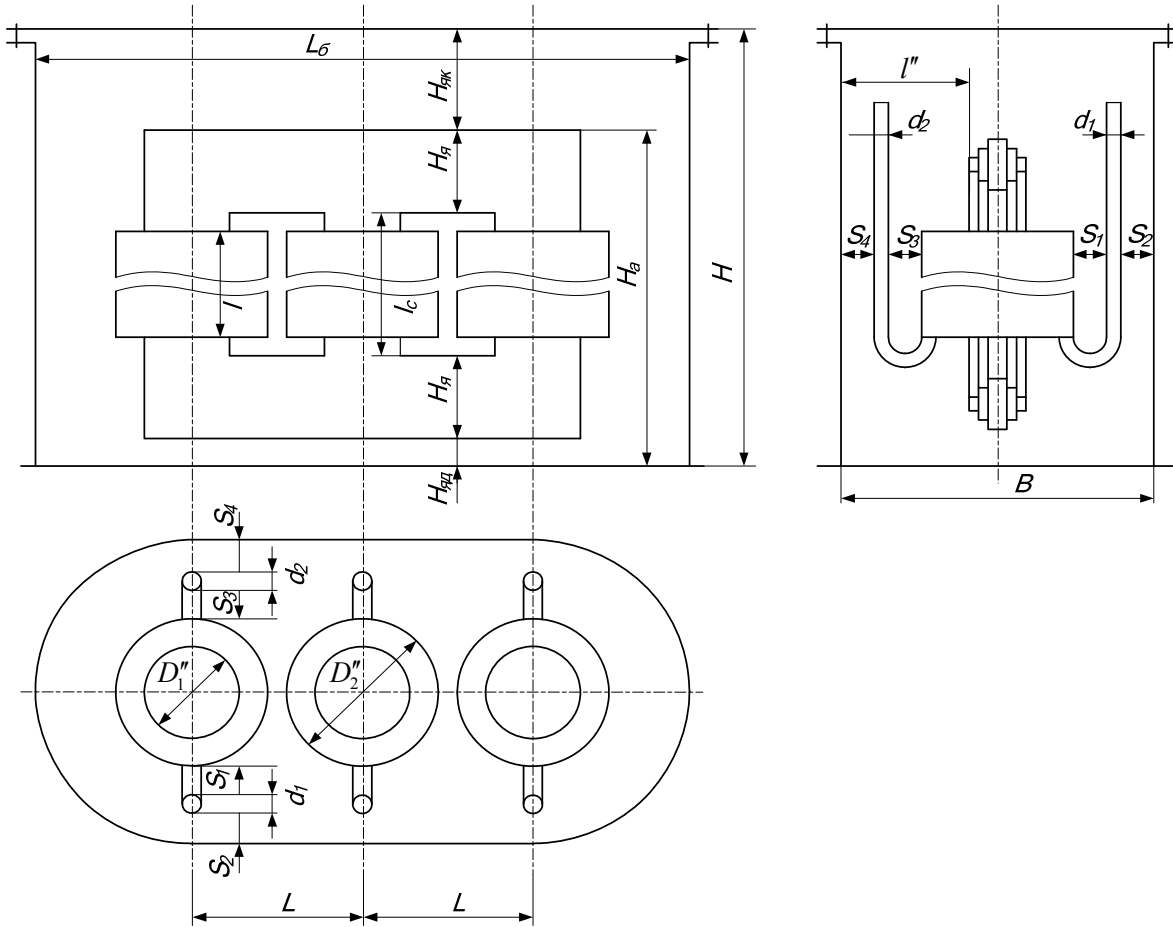


Рисунок 3.5 – Основні розміри бака

Напруження стискання на опорних поверхнях гвинтової та неперервної обмоток, утворених міжкотушечними прокладками з електрокартону, МПа:

$$\sigma_{ст1} = \frac{F_{ст1}}{10 \cdot a_1 \cdot t \cdot n_{п}} ; \sigma_{ст2} = \frac{F_{ст2}}{10 \cdot a_2 \cdot t \cdot n_{п}} , \quad (3.116)$$

де a_1, a_2 – радіальні розміри обмоток, см;

t – ширина прокладки, мм; $t = 40 \dots 60$ мм;

$n_{п}$ – число прокладок (рейок) по околу обмоток, шт.; дорівнює 6 при $S_{н} < 100$ кВА; 8 – при $S_{н} = 100 \dots 630$ кВА; 10 – при $S_{н} = 1000 \dots 1600$ кВА; 12...14 – при $S_{н} = 2500 \dots 16000$ кВА (п. 3.3.4)

Напруження стискання не можуть перевищувати 20 МПа для трансформаторів потужністю до 6300 кВА та 40 МПа – для більш потужних.

Для двошарової та багатошарової циліндричної обмоток осьові сили незначні і напруження стискання від них не виходять за допустимі межі.

3.6 Розрахунок магнітної системи

Мета розрахунку – визначити дійсні значення втрат і струму холостого ходу. Розраховуються усі величини, які впливають на ці параметри. Розрахунок проводиться для зазначених в результатах розрахунку ORTR оптимальних марки сталі $J_{\text{опт}}$ та типу стиків $T_{\text{опт}}$ з використанням дійсних розмірів магнітної системи і обмоток.

3.6.1 Маса магнітної системи

Фактична довжина стержня магнітопроводу, см:

$$l_c = l + l'_0 + l''_0, \quad (3.117)$$

де l'_0, l''_0 – ізоляційні відстані між обмотками та магнітопроводом по висоті (табл. 2.4), см;

l – середня висота обмоток, см, (3.101).

Маса сталі стержнів в межах вікна магнітної системи, кг:

$$G'_c = 3 \cdot \Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6}, \quad (3.118)$$

де Π_c – активний переріз стержня, см^2 , (3.1);

$\gamma_{\text{ст}}$ – густина сталі, $\text{кг}/\text{м}^3$; $\gamma_{\text{ст}} = 7650 \text{ кг}/\text{м}^3$.

Маса сталі одного кута магнітної системи, кг:

$$G_k = 2 \cdot K_3 \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} \cdot (g_{1c} \cdot g_{1я} \cdot h_1 + g_{2c} \cdot g_{2я} \cdot h_2 + g_{3c} \cdot g_{3я} \cdot h_3 + \dots), \quad (3.119)$$

де $g_{1c}, g_{1я}, g_{2c}, g_{2я}, \dots$ – ширина пластин стикованих пакетів стержня та ярма, відповідно, см, (табл. 2.1);

h_1, h_2, \dots – товщина відповідних пакетів, см.

Маса сталі в місцях стику пакетів стержня і ярма (місця відмічені повздовжньою штриховкою на рис. 2.1, б):

$$G''_c = 3 \cdot (\Pi_c \cdot g_1 \cdot \gamma_{\text{ст}} \cdot 10^{-6} - G_k), \quad (3.120)$$

де g_1 – ширина пластини першого пакета (див. табл. 2.1), см.

Фактична маса сталі стержнів, кг:

$$G_c = G'_c + G''_c. \quad (3.121)$$

Методика визначення маси сталі ярем тотожня. Спочатку визначається відстань між осями сусідніх стержнів, яка має бути заокруглена в більшу сторону до значення, кратного 0,5 см:

$$L = D''_2 + a_{22}, \quad (3.122)$$

де a_{22} – ізоляційна відстань між обмотками ВН сусідніх фаз, см (розрах. ORTR).

Маса сталі ярем між осями крайніх стержнів (див. рис. 2.1, а), кг:

$$G'_я = 4 \cdot L \cdot \Pi_я \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-6}, \quad (3.123)$$

де $\Pi_я$ – активний переріз ярма, см², $\Pi_я = K_3 \cdot \Pi_{фя}$ ($\Pi_{фя}$ – з табл. 2.1 за діаметром d).

Маса сталі ярем в кутках крайніх стержнів (заштриховані ділянки на рис. 2.1, а), кг:

$$G''_я = 2 \cdot G_к. \quad (3.124)$$

Фактична маса сталі ярем, кг:

$$G_я = G'_я + G''_я. \quad (3.125)$$

Повна маса сталі, кг:

$$G_{ст} = G_с + G_я. \quad (3.126)$$

3.6.2 Втрати холостого ходу

Втрати холостого ходу – це втрати в сталі магнітної системи (магнітні втрати). Вони складаються із втрат: в стержнях із масою $G_с$ і в частинах ярма з масою $G'_я - 4 \cdot G_к$, де магнітний потік збігається з напрямком прокатки сталі, в кутових частинах магнітопроводу, де потік не збігається з напрямком прокатки, і в зоні стиків листів стержнів і ярм, де з'являються додаткові втрати за рахунок спотворення ліній магнітного потоку.

Дійсне значення магнітної індукції, Тл:

$$B_с = \frac{U_{1фн} \cdot 10^3}{4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Pi_с \cdot 10^{-4}}. \quad (3.127)$$

Для фактичного значення магнітної індукції, відомого типу сталі $J_{\text{опт}}$ з табл. 2.7 вибираються питомі втрати в сталі для стержнів P_c , за значенням $B_y = B_c \cdot (P_c / P_y)$ з тієї ж таблиці визначаються питомі втрати потужності в ярмі P_y . Крім цього, за індукцією B_c визначаються питомі втрати потужності в зоні прямих стиків P'_3 та питомі втрати в зоні косих стиків P''_3 за значенням індукції $B_c / \sqrt{2}$.

Для відпалюваних після механічної обробки пластин втрати холостого ходу, Вт:

$$P_0 = k_{\text{пп}} \cdot k_{\text{пш}} \cdot \left[\begin{array}{l} k_{\text{пр}} \cdot (P_c \cdot G_c + P_y \cdot (G'_y - 4 \cdot G_k)) + \\ + 0,5 \cdot k_{\text{уп}} \cdot G_k \cdot (P_c + P_y) + \\ + n'_3 \cdot P'_3 \cdot P_c + n''_3 \cdot P''_3 \cdot P_c \end{array} \right], \quad (3.128)$$

де $k_{\text{пп}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення втрат внаслідок пресування пластин стержнів і ярм та дорівнює 1,03 в трансформаторах потужністю до 6300 кВА і 1,04 при $S_n \geq 10000$ кВА;

$k_{\text{пш}}$ – коефіцієнт, який враховує необхідність перешихтовки верхнього ярма для встановлення обмоток і дорівнює 1,01 при $S_n \leq 250$ кВА; 1,02 при $S_n = 400 \dots 630$ кВА; 1,04...1,08 при $S_n = 1000 \dots 6300$ кВА і 1,09 при $S_n \geq 10000$ кВА;

$k_{\text{пр}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення втрат за рахунок різання пластин сталі, $k_{\text{пр}} = 1,05$.

Значення $k_{\text{уп}}$ наведено в табл. 2.9.

Розраховані втрати холостого ходу (3.128) не можуть перевищувати задані більше, ніж на 7,5%. В записі вказати дійсне відхилення.

3.6.3 Струм холостого ходу

Струм, що споживається трансформатором в режимі холостого ходу, має дві складові – активну, що залежить від втрат холостого ходу, і реактивну, величина якої визначається намагнічувальною потужністю, що необхідна для створення основного магнітного поля.

Для відпалюваних після механічної обробки пластин намагнічувальна потужність, ВА:

$$Q_0 = k_{\text{тп}} \cdot k_{\text{тш}} \cdot \left[\begin{array}{l} k_{\text{тр}} \cdot (q_c \cdot G_c + q_y \cdot (G'_y - 4 \cdot G_k)) + \\ + 0,5 \cdot k_{\text{ут}} \cdot k_{\text{тпл}} \cdot G_k \cdot (q_c + q_y) + \\ + n'_3 \cdot q'_3 \cdot P_c + n''_3 \cdot q''_3 \cdot P_c \end{array} \right], \quad (3.129)$$

де $k_{\text{тп}}$ – коефіцієнт, що враховує пресування пластин і дорівнює 1,05 в

трансформаторах потужністю до 6300 кВА і 1,06 при $S_H \geq 10000$ кВА;

$k_{тш}$ – коефіцієнт, що враховує перешихтовку ярма ($k_{тш} = k_{пш}$);

$k_{тр}$ – коефіцієнт, що враховує різання пластин, $k_{тр} = 1,18$;

$k_{ут}$, $k_{тпл}$ – коефіцієнти, які знаходяться з рис. 2.2;

q_c , $q_{я}$, q''_z , q'_z – питомі намагнічувальні потужності, які знаходяться із табл. 2.7 для тих же значень індукцій, для яких знаходились відповідні питомі втрати.

Активна складова струму холостого ходу, А та %:

$$I_{0a} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1фн} \cdot 10^3}; \quad i_{0a} = \frac{P_0}{10 \cdot S_H}. \quad (3.130)$$

Реактивна складова струму холостого ходу, А та %:

$$I_{0p} = \frac{Q_0}{3 \cdot U_{1фн} \cdot 10^3}; \quad i_{0p} = \frac{Q_0}{10 \cdot S_H}. \quad (3.131)$$

Повний струм холостого ходу, А та %:

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}; \quad i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}. \quad (3.132)$$

Струм i_0 не може перевищувати задане значення більше, ніж на 15%. В записці вказати дійсне відхилення.

3.7 Тепловий розрахунок трансформатора

При роботі трансформатора втрати, що виникають в його обмотках і магнітній системі, виділяються в них у вигляді теплоти. Частина цієї теплоти йде на нагрівання активної частини, а решта відводиться в навколишнє середовище. В номінальному режимі навантаження температура обмоток і масла досягає встановлених значень, які не можуть перевищувати допустимих.

Найбільш нагріті точки в трансформаторі – провідники обмоток. При 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 $\theta_{m-б}$ і, нарешті, теплота від бака передається в навколишнє середовище, що визначає перепад температур між баком і повітрям $\theta_{б-п}$.

Для ізоляції, що застосовується в силових масляних трансформаторах, ГОСТ 11677-85 визначає максимально допустимий перепад (перевищення) температури обмоток над навколишнім середовищем $\theta_{(o-p)доп} = 65^{\circ}\text{C}$, а масла в верхніх шарах над повітрям $\theta_{(m-p)доп} = 60^{\circ}\text{C}$. При відомих втратах в обмотці, її розмірах і виду ізоляції проводу, можна розрахувати перепад температур θ_{o-m} ; перепад $\theta_{m-б}$ змінюється в дуже вузьких межах для різних трансформаторів і його значення становить 5...6 °С. Тоді допустиме перевищення температури бака відносно температури повітря становитиме $\theta_{б-п} = \theta_{(o-p)доп} - \theta_{o-m} - \theta_{m-б}$, за величиною якого можна визначити потрібну площу поверхні охолодження трансформатора, тобто вирішити задачу теплового розрахунку.

3.7.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом

Цей перепад складається із перепаду всередині самої обмотки, тобто між точками, що розташовані в центрі її перерізу, і зовнішньою поверхнею θ_o та між зовнішньою поверхнею обмотки і маслом $\theta_{по-м}$.

Для обмоток із прямокутного проводу, °С:

$$\theta_o = q \cdot \delta \cdot 10^{-5} / \lambda_{із}, \quad (3.133)$$

де q – дійсна густина теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м² (3.89);

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 із круглого проводу (багатошарова циліндрична обмотка) розрахунок виконується в кілька етапів. Спочатку обчислюється відносна товщина ізоляції проводу:

$$\alpha = (d'_{пр} - d_{пр}) / d_{пр}. \quad (3.134)$$

Відносна теплопровідність ізоляції:

$$\lambda = \frac{\lambda_{із}}{0,7 \cdot \sqrt{\alpha}}. \quad (3.135)$$

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

$$\lambda_{\text{ср}} = \frac{\lambda \cdot \lambda_{\text{із}} \cdot (d'_{\text{пр}} + \delta_{\text{мш}})}{(\lambda \cdot \delta_{\text{мш}} + \lambda_{\text{із}} \cdot d'_{\text{пр}})}. \quad (3.136)$$

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

$$p = C_p \cdot \frac{\Delta^2 \cdot d_{\text{пр}}^2}{(d'_{\text{пр}} + \delta_{\text{мш}}) \cdot d'_{\text{пр}}} \cdot 10^{-2}, \quad (3.137)$$

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 по масі обмотки з круглого проводу:

$$\theta_o = p \cdot \frac{a_{2\text{н}}^2}{8 \cdot \lambda_{\text{ср}}}, \quad (3.138)$$

де $a_{2\text{н}}$ – радіальний розмір зовнішньої котушки обмотки ВН, см, (див. рис. 3.3), для обмотки НН підставляти $a_{1\text{н}}$.

З наведених формул визначається температура найбільш нагрітої точки обмотки. При практичних розрахунках потрібно знаходити середній перепад всередині всієї обмотки:

$$\theta_{\text{оср}} = \frac{2}{3} \cdot \theta_o. \quad (3.139)$$

Перепад температури між поверхнею обмотки і маслом, °С:

- для двошарової і багатошарової циліндричних обмоток:

$$\theta_{\text{по-м}} = 0,285 \cdot q^{0,6}, \quad (3.140)$$

- для гвинтової і неперервної обмоток

$$\theta_{\text{по-м}} = 0,35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q^{0,6}, \quad (3.141)$$

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 (визначається з табл. 3.5).

Таблиця 3.5 – Розрахункові значення коефіцієнта 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 відносно температури масла, °С:

$$\theta_{(o-m)cp} = \theta_{ocp} + \theta_{no-m}. \quad (3.142)$$

Перепади розраховуються як для обмотки НН, так і для обмотки ВН.

3.7.2 Вибір і розрахунок системи охолодження

Для відведення теплоти в навколишній простір необхідно, щоб трансформатор мав певну поверхню дотику з повітрям. В трансформаторах малої потужності (до 40 кВА) – це поверхня самого бака, а із збільшенням потужності потрібно створювати додаткову поверхню охолодження за рахунок труб, що вварюються у стінки бака, або з'ємних трубних радіаторів, що додатково обдуваються вентиляторами. Наприклад, трифазний трансформатор з природним масляним охолодженням потужністю 4000 кВА і з напругою обмотки ВН 35 кВ позначається ТМ-4000/35, а трансформатор 10000 кВА з додатковим обдувом – ТД-10000/35.

Для попереднього вибору системи охолодження можна скористатись такими рекомендаціями:

а) в трансформаторах потужністю 63...100 кВА потрібно застосовувати трубчастий бак (рис. 3.6, а);

б) в трансформаторах 160...1600 кВА потрібно застосовувати одинарні радіатори з овальними (рис. 3.6, б) або круглими (рис. 3.6, в) трубами;

в) в трансформаторах 2500...6300 кВА зазвичай застосовують подвійні радіатори (рис. 3.6, в), одинарний радіатор (рис.3.6, г) являє собою половину подвійного;

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

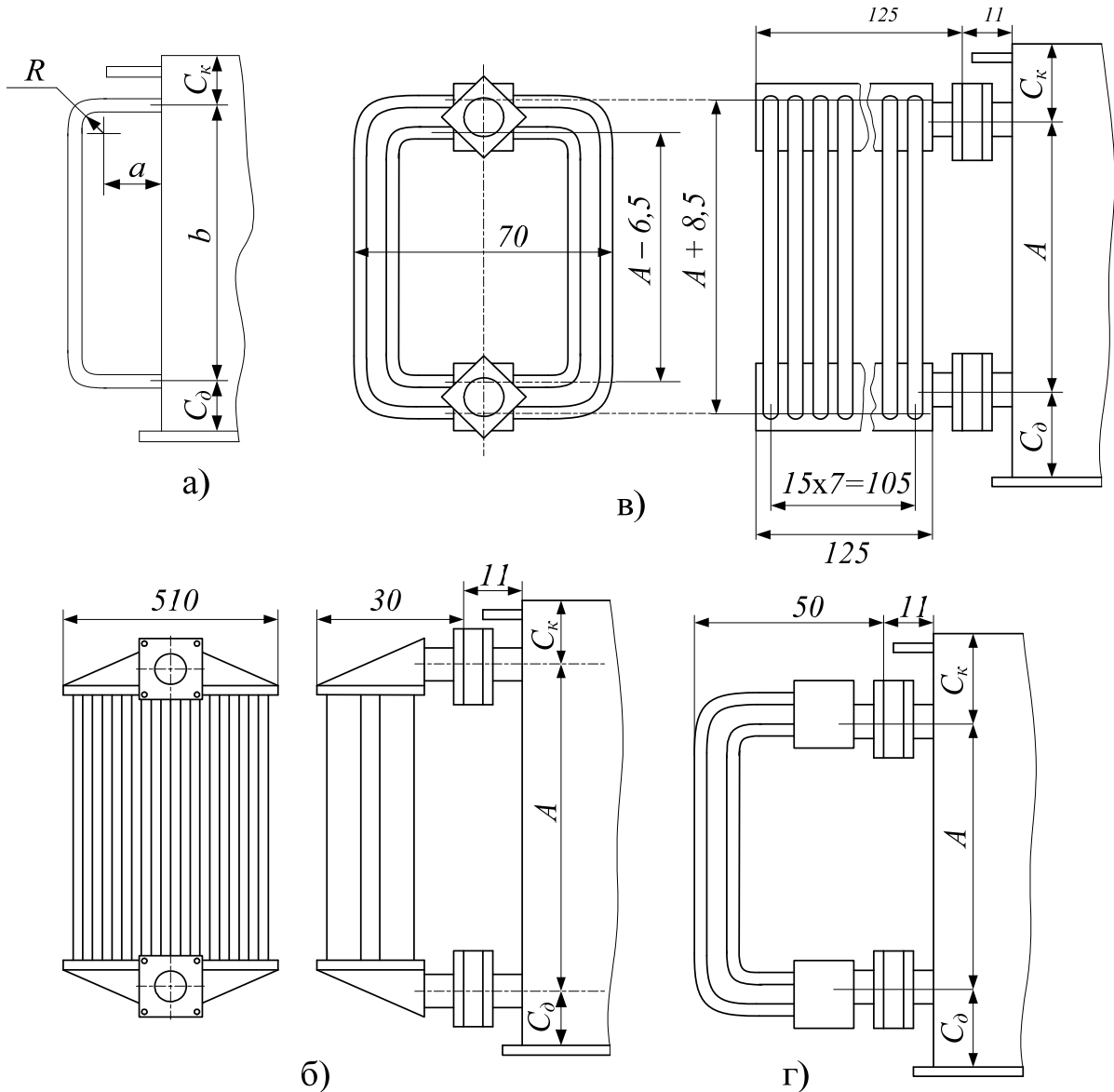


Рисунок 3.6 – Схеми розміщення труб і радіаторів на стінці бака

Для розрахунку системи охолодження згідно з рис. 3.5 потрібно визначити мінімальні розміри бака, см:

довжина:

$$L_6 = 2 \cdot L + D''_2 + 2 \cdot (S_3 + S_4 + d_2); \quad (3.143)$$

ширина:

$$B = D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2; \quad (3.144)$$

висота:

$$H = l_c + 2 \cdot H_{я} + H_{яд} + H_{як}, \quad (3.145)$$

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

$H_{\text{яд}}$ – товщина опорного бруса під нижнім ярмом, см, $H_{\text{яд}} = 3 \dots 5$ см;
 $H_{\text{як}}$ – відстань від верхнього ярма до кришки бака, см; $H_{\text{як}} = 16$ см при $U_{\text{ВН}} = 3 \dots 10$ кВ; $H_{\text{як}} = 30$ см при $U_{\text{ВН}} = 20$ кВ; $H_{\text{як}} = 40$ см при $U_{\text{ВН}} = 35$ кВ.

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

Площа поверхні випромінювання бака (овальної форми), м^2 :

$$P_{\text{вип}} = [2 \cdot (L_{\text{б}} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot k_{\text{вип}} \cdot 10^{-4}, \quad (3.146)$$

де $k_{\text{вип}}$ – коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні випромінювання бака з трубами і з радіаторами порівняно з гладким баком; (гладкий 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:

$$\theta_{(\text{б-п})\text{н}} = \theta_{(\text{о-п})\text{доп}} - \theta_{(\text{о-м})\text{ср}} - \theta_{\text{м-б}}, \quad (3.147)$$

де $\theta_{(\text{о-м})\text{ср}}$ – більше із двох значень для обмоток ВН і НН;

$\theta_{\text{м-б}}$ – перепад температури на поверхні «масло-бак», $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{\text{м-б}} = 5 \dots 6^{\circ}\text{C}$.

$\theta_{(\text{о-п})\text{доп}}$ – максимально допустимий перепад температури обмоток відносно температури навколишнього середовища, $^{\circ}\text{C}$; $\theta_{(\text{о-п})\text{доп}} = 65^{\circ}\text{C}$.

Знайдене значення $\theta_{(\text{б-п})\text{н}}$ має задовольняти умову:

$$1,2 \cdot \theta_{(\text{б-п})\text{н}} + \theta_{\text{м-б}} \leq 60^{\circ}\text{C}. \quad (3.148)$$

Тобто перепад температури між найбільш нагрітим маслом (під кришкою бака) і повітрям не повинен перевищувати допустимого значення 60°C (коефіцієнт 1,2 враховує відношення максимальної температури масла під кришкою до середньої).

Якщо вказана умова не виконується, то потрібно взяти

$$1,2 \cdot \theta_{(\text{б-п})\text{н}} + \theta_{\text{м-б}} = 60^{\circ}\text{C},$$

і знайти нове значення перепаду температури «бак-повітря», що відповідатиме умові:

$$\theta_{(\text{б-п})\text{н}} = 50 - \theta_{\text{м-б}}. \quad (3.149)$$

Необхідна площа поверхні конвекції, м²:

$$P_{\text{кн}} = \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_{\text{к}})}{2,5 \cdot \theta_{(\delta-p)_H}^{1,25}} - 1,12 \cdot P_{\text{вип}}, \quad (3.150)$$

де P_0 і $P_{\text{к}}$ – фактичні втрати холостого ходу і короткого замикання, Вт.

3.7.3 Розрахунок поверхні охолодження

Розрахунок зводиться до визначення дійсної площі конвекції $P_{\text{кд}}$, м², яка повинна бути не меншою за необхідну:

$$P_{\text{кд}} \geq P_{\text{кн}}. \quad (3.151)$$

3.7.3.1 Розрахунок поверхні охолодження бака з гладкими стінами

Площа поверхні кришки бака, м²:

$$P_{\text{кр}} = [(L_{\delta} - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (3.152)$$

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

$$P_{\text{кд}} = P_{\text{вип}} = [2 \cdot (L_{\delta} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot P_{\text{кр}}. \quad (3.153)$$

Після розрахунку $P_{\text{кд}}$ перевірити виконання умови (3.151). Якщо за рекомендацій п. 3.7.2 вона не виконується, то потрібно вибрати варіант охолодження з трубами.

3.7.3.2 Розрахунок поверхні охолодження бака з трубами

Зазвичай в трансформаторах невеликої потужності для створення необхідної поверхні конвекції достатньо одного неповного ряду труб, розташованих на прямолінійних ділянках стінок бака. Найчастіше застосовуються круглі труби діаметром 5,1 см. Площа поверхні 1 м такої труби становить $P_{\text{м}} = 0,16$ м², а маса масла в ній – 1,58 кг.

Розмір труб (див. рис. 3.6, а): $a = 5$ см; $C_{\text{к}} = 7$ см; $C_{\text{д}} = 8$ см; $R = 15$ см;

Висота між осями вварюваних в бак труб, см:

$$b = H - C_k - C_d. \quad (3.154)$$

Розгорнута довжина труби, см:

$$l_{тр} = b + 1,14 \cdot R + 2 \cdot a. \quad (3.155)$$

Максимально можливе число труб в ряду на прямолінійних ділянках стінок бака, шт.:

$$m_{тр} = 2 \cdot \frac{L_6 - B}{t_{тр}}, \quad (3.156)$$

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

Площа поверхні випромінювання бака з трубами, m^2 :

$$P_{вип} = 1,1 \cdot [2 \cdot (L_6 - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot P_{кр}, \quad (3.157)$$

де $P_{кр}$ – площа поверхні кришки бака, m^2 (3.152).

Площа поверхні конвекції гладкого баку:

$$P_{кгл} = [2 \cdot (L_6 - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot P_{кр}. \quad (3.158)$$

Площа поверхні конвекції труб:

$$P_{ктр} = P_m \cdot m_{тр} \cdot l_{тр} \cdot 10^{-3}. \quad (3.159)$$

Фактична площа поверхні конвекції бака з трубами, m^2 :

$$P_{кд} = P_{кгл} + 1,4 \cdot P_{ктр}. \quad (3.160)$$

Після розрахунку $P_{кд}$ перевірити виконання умови (3.151). Як правило, ця умова виконується, навіть $P_{кд} \gg P_{кн}$, це пов'язано з тим, що можлива кількість установлених труб на поверхні бака перевищує потрібну. В

такому разі можна зменшити кількість прийнятих труб на поверхні бака $m_{\text{тр}}$ до мінімально потрібної, за якої умова (3.151) виконується.

3.7.3.3 Розрахунок поверхні охолодження бака з навісними радіаторами

Радіатор складається із двох колекторів, у які вварюються труби. В сучасних трансформаторах застосовують одинарні і подвійні радіатори (рис. 3.6), які мають стандартні розміри і відрізняються відстанню між осями приєднаних фланців. Основні дані радіаторів наведено в табл. 3.6.

Для одинарного радіатора (див. рис. 3.6, б) $C_{\text{д}} = 8,5$ см, $C_{\text{к}} = 10$ см.

Радіатори підбирають за їхньою міжосьовою відстанню A , для чого розраховують потрібне значення $A_{\text{тр}} = H - 34$ для подвійних радіаторів (див. рис. 3.6, в, г) і $A_{\text{тр}} = H - 18,5$ для одинарних радіаторів (див. рис. 3.6, б).

Потім із табл. 3.6 підбирається стандартний радіатор з найближчою меншою відстанню A . Площа конвекції стінок гладкого бака, м^2 :

$$\Pi_{\text{кгл}} = [2 \cdot (L_{\text{б}} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4}. \quad (3.161)$$

Площа конвекції кришки гладкого бака, м^2 :

$$\Pi_{\text{кр}} = [(L_{\text{б}} - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (3.162)$$

Повна площа поверхні конвекції бака з радіаторами становитиме, м^2 :

$$\Pi_{\text{кд}} = \Pi_{\text{кгл}} \cdot k_{\text{фгл}} + \Pi_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}} + n_{\text{рад}} \cdot (\Pi_{\text{к.тр}} \cdot k_{\text{фтр}} + \Pi_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}), \quad (3.163)$$

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

а) $k_{\text{фгл}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,0$; $k_{\text{фтр}} = 1,26$ – для одинарних радіаторів (див. рис. 3.6, б);

б) $k_{\text{фгл}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,0$; $k_{\text{фтр}} = 1,4$ – для подвійних радіаторів (див. рис. 3.6, в, г) за відсутності обдуву;

в) $k_{\text{фгл}} = k_{\text{фкр}} = k_{\text{фк}} = 1,6$; $k_{\text{фтр}} = 2,24$ – для подвійних радіаторів (див. рис. 3.6, в, г) за наявності обдуву.

Таблиця 3.6 – Технічні дані трансформаторних радіаторів

Одинарний радіатор (рис. 3.6, б)			Одинарний радіатор (рис. 3.6, г)			Подвійний радіатор (рис. 3.6, в)		
А, см	П _{к.тр} , м ²	G _м , кг	А, см	П _{к.тр} , м ²	G _м , кг	А, см	П _{к.тр} , м ²	G _м , 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
П _{кк} = 0,34 м ²			П _{кк} = 0,72 м ²			П _{кк} = 0,66 м ²		
S _н = 160...1000 кВА			S _н = 1600...2500 кВА			S _н ≥ 2500 кВА		

Примітка. П_{к.тр} – площа поверхні конвекції труб, м²; G_м – маса масла в радіаторі, кг; П_{кк} – площа поверхні конвекції колекторів радіаторів, м³.

Оскільки поверхня П_{кд} має бути не меншою П_{кн} (за (3.151)), то, прирівнюючи їх, із (3.163) визначається потрібне число радіаторів:

$$n_{\text{рад}} = \frac{P_{\text{кн}} - P_{\text{кгл}} \cdot k_{\text{фгл}} - P_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}}}{P_{\text{к.тр}} \cdot k_{\text{фтр}} + P_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}} \quad (3.164)$$

Якщо $n_{\text{рад}}$ – ціле число, то знайдене число радіаторів вважається дійсним, а якщо дробове, то воно округляється до найближчого більшого цілого числа, за якого розраховується дійсна площа поверхні конвекції (за (3.163)).

Якщо отримане число одинарних радіаторів (див. рис. 3.6, б) не розміщується по периметру бака (відстань між ними не може бути меншою 10 см), то можна взяти радіатори з більшим розміром А, збільшивши відповідно висоту бака. Якщо те ж саме буде спостерігатись при подвійних радіаторах (відстань між ними не може бути меншою 16 см), то потрібно застосовувати дуття.

3.7.4 Визначення фактичних перегрівів

Середній перегрів стінки бака над повітрям, °С:

$$\theta_{\text{б-п}} = \left[\frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{2,8 \cdot \Pi_{\text{вип}} + 2,5 \cdot \Pi_{\text{кд}}} \right]^{0,8} \quad (3.165)$$

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

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{\Pi_{\text{кгл}} + \Pi_{\text{кр}} + \Pi_{\text{ктр}}} \right]^{0,6} \quad (3.166)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує зміну перепаду температури за наявності/відсутності обдуву; $k_1 = 1,0$ при природному охолодженні, $k_1 = 0,9$ – при наявності примусового обдуву.

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

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[\frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{\Pi_{\text{кгл}} + \Pi_{\text{кр}} + (\Pi_{\text{к.тр}} + \Pi_{\text{кк}}) \cdot n_{\text{рад}}} \right]^{0,6} \quad (3.167)$$

Перегрів верхніх шарів масла над повітрям, °С:

$$\theta_{\text{м-п}} = 1,2 \cdot (\theta_{\text{б-п}} + \theta_{\text{м-б}}), \quad (3.168)$$

який не повинен перевищувати 60 °С.

Перегрів обмоток над повітрям, °С:

обмотки НН:

$$\theta_{(o-п)1} = \theta_{(o-м)ср1} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\text{б-п}}; \quad (3.169)$$

обмотки ВН:

$$\theta_{(o-п)2} = \theta_{(o-м)ср2} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\text{б-п}}, \quad (3.170)$$

які не мають перевищувати 65 °С.

3.8 Техніко-економічні показники трансформатора

Для оцінення ефективності спроектованого трансформатора і для його порівняння з серійним трансформатором відповідної потужності та класу напруги необхідно приблизно розрахувати його основні техніко-економічні характеристики, до яких відносяться маса активної частини з елементами кріплення, маса масла та розміри розширювача.

Маса активної частини (з врахуванням деталей кріплення $\approx 20\%$), кг:

$$G_{\text{ач}} = 1,2 \cdot (G_{\text{ст}} + G_0 + G_{\text{відв1}} + G_{\text{відв2}}). \quad (3.171)$$

Загальна маса масла визначається таким чином.

Об'єм гладкого бака, м^3 :

$$V_{\text{б}} = \Pi_{\text{кр}} \cdot H \cdot 10^{-6}. \quad (3.172)$$

Об'єм активної частини, м^3 :

$$V_{\text{ач}} = G_{\text{ач}} / \gamma_{\text{ач}}, \quad (3.173)$$

де $\gamma_{\text{ач}}$ – середня густина активної частини трансформатора, $\text{кг}/\text{м}^3$;

$\gamma_{\text{ач}} = 5500 \dots 6000 \text{ кг}/\text{м}^3$ – при обмотках з міді,

$\gamma_{\text{ач}} = 5000 \dots 5500 \text{ кг}/\text{м}^3$ – при обмотках з алюмінію.

Маса масла в додаткових охолоджувальних елементах, кг:

а) в трубах (бак з трубами):

$$G_{\text{м.тр}} = 1,58 \cdot l_{\text{тр}} \cdot m_{\text{тр}} \cdot 10^{-2}; \quad (3.174)$$

б) в радіаторах (бак з радіаторами):

$$G_{\text{м.тр}} = G_{\text{м}} \cdot n_{\text{рад}}, \quad (3.175)$$

де $G_{\text{м}}$ – маса масла в одному радіаторі, кг, що визначається з табл. 3.6.

Відповідно загальна маса масла, кг:

$$G_{\text{м}} = 1,05 \cdot [\gamma_{\text{м}} \cdot (V_{\text{б}} - V_{\text{ач}}) + G_{\text{м.тр}}], \quad (3.176)$$

де 1,05 – коефіцієнт, що враховує масу масла в розширювачі;

γ_m – густина масла, кг/м^3 ; $\gamma_m = 900 \text{ кг/м}^3$.

Розміри розширювача:

- об'єм, м^3 :

$$V_p = (0,07 \dots 0,1) \cdot (V_\delta - V_{\text{ач}}); \quad (3.177)$$

- довжина вибирається близькою до ширини бака, $\text{см} - l_p \approx B$;

- діаметр розширювача, см :

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot V_p \cdot 10^6}{\pi \cdot l_p}} \quad (3.178)$$

У вказівках щодо конструювання трансформатора наведено нормалізовані розміри розширювачів, з яких потрібно підібрати найближчий до розрахованих розмірів.

Вартість (ціна) активної частини розраховується за (2.5), але масу сталі $G_{\text{ст}}$ і обмоток з врахуванням відводів ($G_o = G_0 + G_{\text{відв1}} + G_{\text{відв2}}$) потрібно взяти з попереднього розрахунку для вибраної марки сталі.

Вартість (ціна) всього трансформатора (грн) при навчальному проектуванні визначають наближено:

$$C_{\text{тр}} = \lambda \cdot C_{\text{ач}}, \quad (3.180)$$

де λ – коефіцієнт, що враховує відношення вартості всього трансформатора до вартості його активної частини; $\lambda \approx 1,45$ для трансформаторів потужністю $S_n = 25 \dots 630 \text{ кВА}$ при $U_{\text{вн}} = 10 \text{ кВ}$; $\lambda \approx 1,65 \dots 1,75$ при $U_{\text{вн}} = 20 \dots 35 \text{ кВ}$; $\lambda \approx 1,8 \dots 1,6$ для потужностей $S_n = 1000 \dots 16000 \text{ кВА}$ при $U_{\text{вн}} = 10 \dots 35 \text{ кВ}$.

В пояснювальній записці курсового проекту після закінчення розрахунку потрібно навести таблицю порівняння основних технічних показників спроектованого і серійного трансформаторів однакових потужностей і класів напруг. В цій таблиці мають бути вказані S_n , $U_{1л}$, $U_{2лн}$, P_0 , i_0 , P_k , u_k , маси активних частин, масла і габаритні розміри, взяті з креслення загального вигляду. Відповідні дані серійних трансформаторів потрібно брати з довідників або даних заводів-виробників.

4 КОНСТРУЮВАННЯ ТРАНСФОРМАТОРА

4.1 Конструктивна схема трансформатора

У кожному силовому масляному трансформаторі можна виділити такі вузли.

1. Магнітопровід.
2. Обмотки.
3. Перемикач.
4. Бак з візком.
5. Вводи
6. Виводи.
7. Охолоджувальний пристрій.
8. Розширювач.
9. Допоміжна арматура
10. Контрольні і захисні пристрої.

На рис. 4.1 і 4.2 наведено загальний вигляд трансформаторі в трьох проекціях: на рис. 4.1 – головний вигляд та вигляд збоку, а на рис. 4.2 – вигляд зверху. Потужність зображеного трансформатора – 1600 кВА, напруга обмотки ВН – 10 кВ, обмотки НН – 1,15 кВ, схема з'єднання обмоток – Y/Y_0 .

На головному вигляді та вигляді збоку (рис. 4.1) розріз бака дозволяє показати внутрішню (знімну) частину трансформатора, яка містить активну частину 1 трансформатора, що складається з магнітопроводу, обмоток, виводів і всіх деталей їх кріплення, а також перемикач 2 з приводом 4, встановленим на кришці бака. Знімна частина закріплена всередині бака чотирма розпірними гаками 5, що встановлені по кінцях верхніх яремних балок магнітопроводу, і зачеплені за скоби, що приварені до стінок бака. Бак 3 є резервуаром, звареним із сталевих листових конструкцій, призначений для розміщення в ньому знімної частини. Зверху бак закривається сталевією кришкою 6, яка притискається до верхньої рами болтами 7 з гайками 8 та шайбами 9 та ущільнена за допомогою прокладки 10 з маслостійкої гуми за ГОСТ 12855-77 [7]. До дна бака приварюється візок 11, на який спирається трансформатор і який забезпечує його переміщення в двох взаємно перпендикулярних напрямках.

Зверху на кришці розміщуються вводи НН – 12, вводи ВН – 13 і нульовий ввід – 14. Вводи призначені для з'єднання обмоток трансформатора з відповідними лініями електропередач (ЛЕП), нульовий ввід призначений для виведення нульової точки обмотки, з'єднаної «в зірку» (якщо це потрібно).

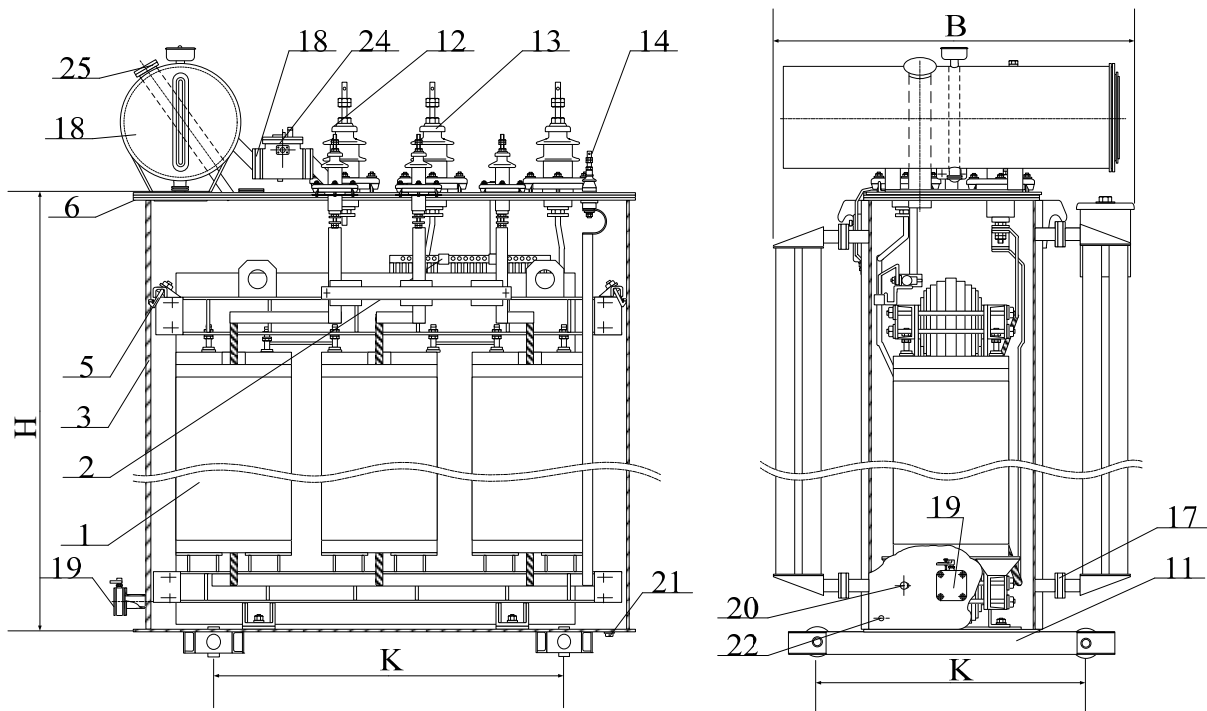


Рисунок 4.1 – Загальний вигляд трансформатора ТМ-1600/10

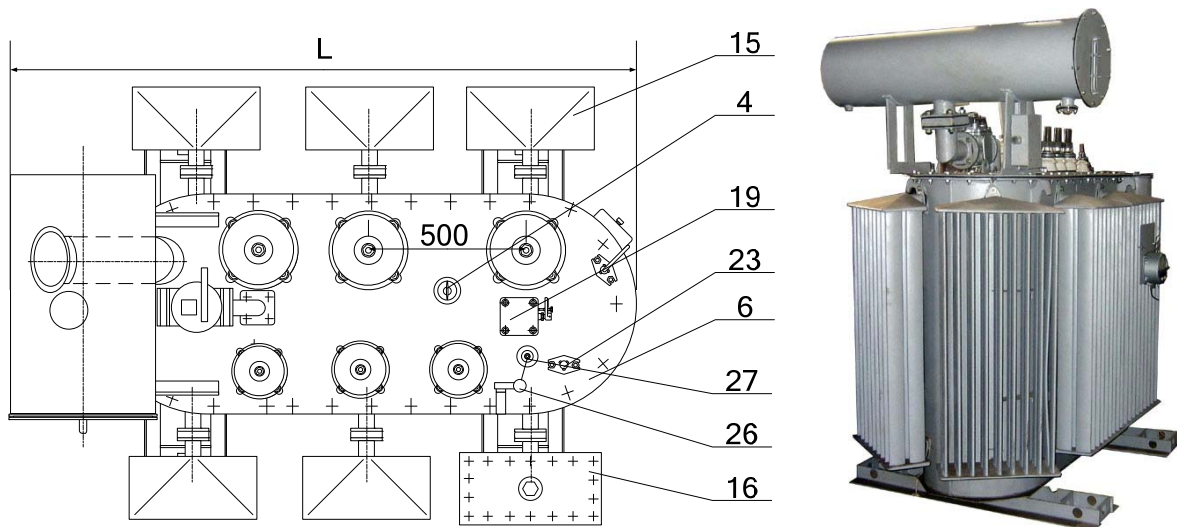


Рисунок 4.2 – Загальний вигляд трансформатора ТМ-1600/10

Охолоджувальними пристроями наведеного на рис. 4.1–4.2 трансформатора є знімні дворядні радіатори 15 з овальних труб, які закріплені на бічних стінках бака. Звичайно радіатори рекомендується розміщувати в межах прямолінійної частини стінки бака, але якщо всі радіатори на плоскій боковій поверхні не можуть бути розміщені, то допускається їх встановлення на заокругленій торцевій поверхні. Один з

радіаторів 16 має вбудований фільтр для безперервного очищення масла під час роботи трансформатора. Між фланцями бака і радіаторів встановлюється ущільнювальна прокладка 17 з маслостійкої гуми.

В трансформаторах типу ТМ з масляним охолодженням відведення тепла від магнітопроводу і обмоток здійснюється трансформаторним маслом, що заповнює весь внутрішній об'єм бака. Масло, стикаючись з нагрітими поверхнями магнітопроводу і обмоток, теж нагрівається і піднімається вгору. Гаряче масло з бака переміщується внаслідок конвекції в радіатори, де охолоджується навколишнім атмосферним повітрям, потім потрапляє в нижню частину бака, де воно знову нагрівається і піднімається вгору і т. д. Таким чином здійснюється безперервна природна циркуляція масла за рахунок різниці температур в верхній і нижній частинах бака. У потужних трансформаторах для збільшення інтенсивності охолодження застосовують додаткові вентилятори для обдуву труб радіаторів (примусове охолодження).

Розширювач 18 розташовується на кришці трансформатора і сполучений з баком спеціальною трубкою. Внутрішній об'єм розширювача приблизно наполовину заповнений трансформаторним маслом.

Допоміжна арматура :

- а) плоскі крани 19, призначені для заправки масла (на кришці бака), його зливання (в нижній частині бічної стінки), демонтажу газового реле (в розрізі трубки, що сполучає розширювач з баком), відключення радіаторів або фільтра (між фланцями бака і радіаторів або фільтра 29);
- б) кран 20 на бічній стінці бака для відбору проби масла;
- в) пробку 21 для спускання залишків масла з бака;
- г) фільтр 29 для безперервного очищення масла;
- д) болт заземлення 23.

Замість плоских кранів для зливання і заправки масла можуть застосовуватися вентиля. Всі пристрої допоміжної арматури забезпечують нормальну експлуатацію трансформатора.

До контрольних і захисних пристроїв відносяться:

- а) ртутний термометр 23, який призначений для контролю температури масла у верхній частині бака, встановлюється на кришці трансформаторів потужністю до 1000 кВА (в трансформаторах потужністю 1000 кВА і вище для контролю температури масла замість термометра застосовується термометричний сигналізатор 27 з датчиком 23);

- б) газове реле 24, яке призначене для захисту трансформатора від внутрішніх пошкоджень, розташовується в розрізі трубки між розширювачем та баком;
- в) запобіжна труба 25, яка призначена для запобігання деформації та пошкодженню бака трансформатора від внутрішнього надлишкового тиску, розміщується на кришці бака і проходить або всередині розширювача, або поверх нього;
- г) пробивний запобіжник 26, який захищає лінію НН від потрапляння на неї потенціалу високої напруги при пробіі ізоляції між обмотками ВН і НН; розміщується на кришці трансформатора.

Всі сучасні трансформатори залежно від їх потужності і класу напруги обмотки ВН поділяються на VIII габаритів, які наведено в таблиці 3.1. До VIII габариту відносяться також всі трансформатори напругою понад 330 кВ (незалежно від потужності). Далі розглядатимуться конструктивні особливості трансформаторів перших чотирьох габаритів

Таблиця 4.1 – Габарити трансформаторів

Номер габарита	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Потужність, кВА	<100	160... 630	1000... 6300	10000... 40000	До 40000	40000... 100000	160000.. 250000	Понад 250000
Напруга, кВ (включно)	До 35	До 35	До 35	До 35	110... 220	До 330	До 330	До 330

4.2 Магнітопровід трансформатора

Магнітопровід трансформатора – це його магнітна система, а також станина для кріплення обмоток, виводів, перемикача регулювальних відгалужень та інших деталей. Магнітопровід повинен мати жорстку конструкцію, стійку до механічних зусиль, що виникають при монтажі обмоток, транспортуванні та раптових коротких замиканнях під час експлуатації трансформатора. Внаслідок викладених вимог конструкція магнітопроводів містить активну частину та неактивну частину. Активна частина магнітопроводу призначена для безпосереднього протікання магнітного потоку та підсилення електромагнітного зв'язку між обмотками, а неактивна частина надає магнітопроводу необхідної механічної жорсткості.

Активна частина магнітопроводу виконується з електротехнічної сталі, що випускається металургійними заводами у вигляді рулонів, листів і різаної стрічки товщиною 0,1; 0,2; 0,35; 0,5; 0,65; 1,0 мм (листи) і 0,28; 0,3; 0,35; 0,5; 0,65 мм (рулони і стрічка).

У сучасних силових трансформаторах для виготовлення магнітопроводу застосовується холоднокатана анізотропна електротехнічна сталь марок E413 і E414 товщиною 0,35 мм, що має електроізоляційне термостійке покриття відповідно до ГОСТ 21427.1-83 [2]. Згідно з класифікацією – це сталі 3-го класу, із вмістом кремнію від 2,8 до 3,8%, 1-ї групи, для якої основною нормованою характеристикою є питомі втрати $P_{1,5/50}$, 3 і 4-го типів.

Використання холоднокатаної анізотропної сталі з робочою індукцією 1,65...1,7 Тл дозволяє зменшити переріз магнітопроводу, а отже, масу і габарити всього трансформатора порівняно з магнітопроводом з гарячекатаної ізотропної сталі. Зменшення товщини листів привело до зниження питомих, а також повних втрат і струму холостого ходу. Анізотропна сталь має високу магнітну проникність тільки у напрямі прокату, через що пластини магнітопроводу слід розташовувати так, щоб напрям магнітного потоку в них збігався з напрямом прокати сталі. Це дещо ускладнює технологію виготовлення магнітопроводу, але покращує робочі властивості трансформатора за рахунок зниження втрат і збільшення ККД.

У сучасних силових трансформаторах набув найбільшого поширення шихтований плоский стержневий магнітопровід, активна частина якого – головний і бічний вигляди – показана на рисунку 4.3, а. Стержні і ярма мають однакову форму поперечного перерізу – багатоступінчасту фігуру, вписану в коло. Проте один–два крайні пакети ярма мають більшу ширину порівняно з відповідними пакетами стержня, що необхідно для збільшення площі натиску стяжним швелером на ярмо.

Діаметри стержнів, розміри їх пакетів стандартизовані і наведені в табл. 2.1.

Шихтування (складання) активної частини магнітопроводу здійснюється «в сплетення», тобто стики (зазори) між листами непарних шарів перекриваються цілими листами парних. Такий спосіб шихтування забезпечує отримання міцної, в механічному відношенні, конструкції активної частини магнітопроводу. Стики між листами стержнів і ярем можуть бути прямими або косими. При прямих стиках в кутових частинах ярем (заштрихована область на рис. 4.3, б) магнітний потік проходить по листах сталі під кутом приблизно 45° до напрямку їх прокату, що збільшує втрати і струм холостого ходу (х.х.) трансформатора. При косих стиках ця зона підвищених втрат виходить значно меншою (заштрихована область на рис. 4.3, в).

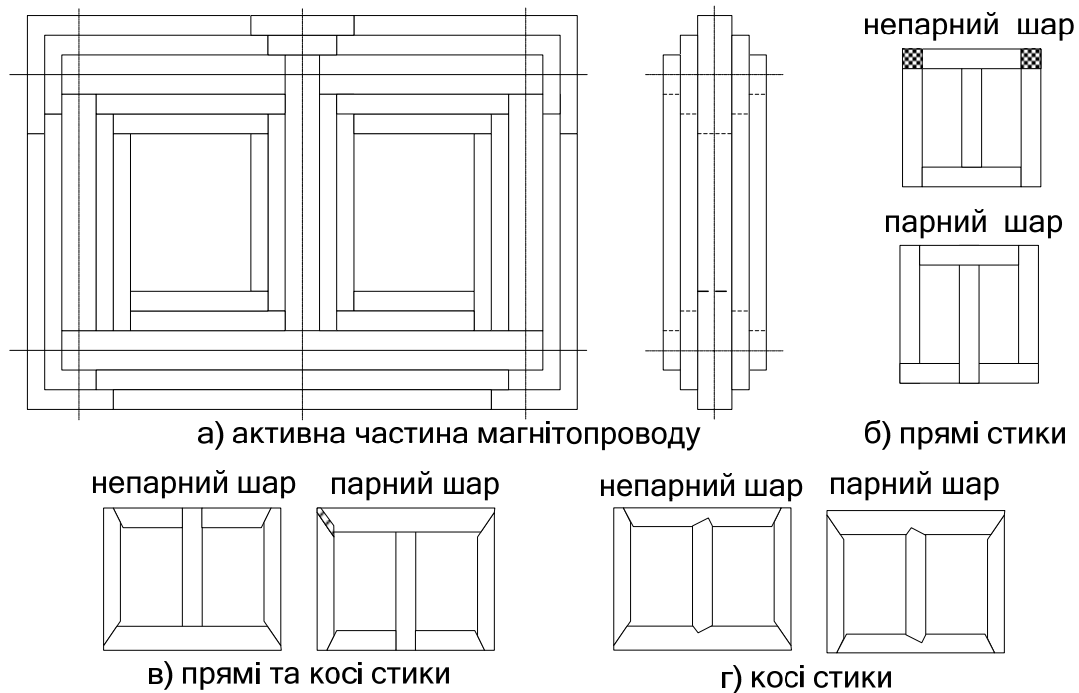


Рисунок 4.3 – Активна частина магнітопроводу трансформатора

У технологічному відношенні найбільш простим є магнітопровід з прямими стиками пластин (рис. 4.3, б), далі йде комбінований магнітопровід (рис. 4.3, в – з прямими стиками в середньому стержні і косими – в крайніх). Найскладнішим, але таким, що забезпечує мінімальні втрати і струм х.х., є магнітопровід з косими стиками у всіх стержнях (рис. 4.3, г).

Нині на деяких заводах випускаються трансформатори I і II габаритів з просторовим магнітопроводом, в якому стержні розташовані в трьох площинах під кутом 120° . Просторова конструкція, на відміну від плоскої, дозволяє знизити масу магнітопроводу, втрати х.х. і є повністю симетричною магнітною системою. Детальніше з різними конструкціями магнітопроводу можна ознайомитись в [3].

Неактивна частина магнітопроводу складається з ряду елементів, призначених для жорсткої фіксації активної частини, зниження вібрацій і шуму, створення опори для обмоток, заземлення магнітопроводу, кріплення монтажних елементів. Конструктивне виконання неактивної частини залежить від габариту трансформатора.

Фіксація стержнів активної частини необхідна для забезпечення щільного прилягання окремих шарів активної сталі один до одного, що знижує шум при роботі трансформатора і створює жорстку конструкцію стержня. Фіксувальні елементи стержнів розташовуються всередині обмоток, тому їх потрібно виконувати з мінімальними радіальними

розмірами, щоб не зменшувати переріз активної сталі і не збільшувати зазор між стержнем та внутрішньою обмоткою більше допустимого ізоляційного проміжку.

В сучасних трансформаторах застосовуються безшпилькові конструкції магнітопроводу, в яких при діаметрах стержнів більше 220 мм їх фіксація здійснюється за допомогою бандажів, що встановлюються на стержні через 120...150 мм один від одного. Застосовується два види бандажів: металевий та з ізоляційного матеріалу. Металевий бандаж є вузькою сталеву стрічкою, що охоплює стержень, під яку кладеться ізоляція з електрокартону. Кінці стрічки мають бути ізольовані один від одного, щоб уникнути утворення короткозамкнутого витка з великим струмом. Це значно ускладнює конструкцію бандажа. Простішим і надійнішим є бандаж із спеціальної бандажної склострічки ЛСБ-Т товщиною 0,2 мм і шириною 20 мм, просоченої розчином епоксидної смоли. Звичайно бандаж складається з 20...25 витків стрічки, тобто його товщина становить 4...5 мм. Бандаж накладається на заздалегідь спресований на складальному стенді стержень. Кінець стрічки бандажа приклеюється до бандажа місцевим нагрівом паяльником до 120...130 °С, коли лак швидко полімеризується, надійно закріплюючи стрічку. Після складання магнітопроводу проводять запечення склобандажів їх нагрівом до температури полімеризації лаку (85...100 °С) у спеціальних печах.

Фіксувальні елементи ярем знаходяться поза обмотками, тому до них не висуваються особливі вимоги щодо їхніх розмірів.

Рівномірне опресовування ярем досягається за рахунок установа спеціальних ярмових балок – верхніх і нижніх, стягнених однією або двома шпильками з кожної сторони балок. Стягання здійснюється гайками. У безшпилькових конструкціях магнітопроводів шпильки для стягання ярма проходять поза ярмом. Як ярмова балка звичайно використовується швелер, висота якого береться дещо більшою за ширину крайнього пакета ярма. Швелери виготовляються зі сталі за ГОСТ 535-2005 [8] і мають стандартні розміри.

У трансформаторах III і IV габаритів ярмові балки посилюються спеціальними сталевими кутиками і пластинами, привареними до швелерів. У всіх трансформаторах до верхніх ярмових балок приварюються пластини для піднімання активної частини трансформатора за допомогою лебідки та кронштейни для кріплення активної частини в баку.

В трансформаторах I і II габаритів встановлюється по одній шпильці з кожної сторони балок, а III і IV габаритів – по дві. У трансформаторах IV габариту застосовується додаткове стягання ярем сталевими напівбандажами, що виготовляються у вигляді сталевих гнутих шпильок з ізольованими від ярма стрічками з електрокартону. Для запобігання

утворення короткозамкнутого витка навколо ярма одна шпилька ізолюється від ярмової балки текстолітовою втулкою. Упорами для гайок і шайб є сталеві пластини, приварені в кутках балок. На кожне ярмо ставлять по два напівбандажі по осях вікон між середнім і крайніми стержнями.

Верхні і нижні ярмові балки зв'язуються між собою в трансформаторах I і II габаритів вертикальними шпильками, а в трансформаторах III і IV габаритів – пресувальними замковими пластинами. Шпильки ізолюються від обмоток бакелітовими трубками. Трубки марки ТБ випускаються згідно з ГОСТ 8726-88 [9] з внутрішніми діаметрами від 10 до 80 мм (числа, кратні 2 або 5), товщиною стінок 2, 4, 6, 8 мм і довжиною до 500 мм.

Прес-пластини виготовляються з немагнітної сталі, укладаються у всіх стержнях замість крайніх пакетів. Під пластину кладеться прокладка з електрокартону завтовшки 1,5...2,0 мм. На кінцях пластин приварені сталеві шпильки, що входять у відповідні отвори ярмових балок. Замкові пластини застосовуються для розвантаження активної сталі магнітопроводу від дії механічних сил при короткому замиканні (к.з.), а також при підніманні активної частини трансформатора. Для рівномірного розподілу навантажень по всіх трьох стержнях і замкових пластинах застосовують пристрій з клином, за допомогою якого вибирається зазор між шипом замкової пластини і опорною шпилькою, привареною до ярмової балки. Для запобігання випадання клину його фіксують стопорною пластиною і стопорним гвинтом.

Для зменшення втрат на вихрові струми в ярмовій балці її потрібно ізолювати від активної сталі ярма. У трансформаторах I і II габаритів ізоляцією служить пластина з електрокартону завтовшки 1,5 мм, що прокладається між балкою і крайнім пакетом ярма. У трансформаторах III і IV габаритів ярмові балки ізолюються прокладками з електрокартону, що укладаються під прес-пластини по всій їх довжині.

Крім того, ізоляційні пластини з наклепаними до них вертикальними планками встановлюються уздовж всіх ярмових балок в проміжках між прес-пластинами сусідніх стержнів і кріпляться до балок болтами з гайками і шайбами. Пластини і планки виготовляються з електрокартону. Товщина пластин – 2 мм, товщина планок дорівнює товщині прес-пластини. У проміжках між планками утворюються канали для проходження масла, що сприяє кращому охолодженню сталі ярма.

Всередині бака між обмотками і заземленими частинами існує електричне поле, яке створює невеликий потенціал в сталі магнітопроводу і в сталевих деталях його кріплення. При цьому між окремими металевими частинами і баком існує різниця потенціалів, що призводить до

додаткового шуму при роботі трансформатора, можливості виникнення електричної дуги. Тому магнітопровід і всі сталеві деталі його кріплення мають бути заземлені, щоб всі вони мали однаковий потенціал. Заземлення магнітопроводу здійснюється мідною луженою стрічкою $0,3 \times 40$ мм. Заземлювальну шину закладають між листами ярма на відстані близько 10 мм від його краю, а другий кінець кріплять болтами до верхньої ярмової балки. Однієї стрічки достатньо для заземлення верхніх і нижніх ярмових балок, які електрично пов'язані між собою та з баком.

Після установаження обмоток на стержні вони мають бути спресовані в осьовому напрямі. В трансформаторах I і II габаритів це здійснюється вертикальними шпильками. При закручуванні гайок відбувається невелике переміщення ярмових балок в осьовому напрямі обмоток, що і приводить до їх фіксації. Діаметр шпильок в трансформаторах потужністю до 250 кВА включно становить 12 мм, а в трансформаторах 400...630 кВА – 16 мм.

Обмотки трансформатора мають бути ізольовані від ярем і для них має бути створена рівна опорна поверхня. У трансформаторах I і II габаритів для цього використовуються дерев'яні (букові) бруси (по чотири бруси з кожної сторони обмоток) між ярмовими балками і торцями обмоток.

У трансформаторах III і IV габаритів осьове стягання обмоток здійснюється чотирма нажимними гвинтами, які вкручуються у втулки, приварені до нижніх полиць верхніх ярмових балок. Зусилля стиснення шпильок через сталеву опору передається на сталеве нажимне кільце і обидві обмотки. Ширина кільця дорівнює сумарному радіальному розміру обох обмоток, що забезпечує їхнє одночасне пресування. Товщина кільця – 30...40 мм. Нажимне кільце повинно мати розріз в одному місці для запобігання утворенню короткозамкнутого витка навколо стержня. Нажимні гвинти мають бути ізольовані від кільця текстолітовими опорними пластинами, оскільки за їх відсутності може відбуватися замикання кільця через дві сусідні шпильки і ярмову балку. Контргайка забезпечує фіксацію гвинта.

Між нажимним кільцем і обмоткою укладається ярмова ізоляція, що складається з ряду електрокартонних деталей. Така ж ізоляція встановлюється і з нижньої сторони обмотки.

Іноді замість сталевих розрізних кільць застосовують кільце з склотекстоліту. В цьому випадку його можна робити нерозрізним, крім того, відпадає потреба в додаткових текстолітових опорних пластинах.

4.3 Перемикачі регулювальних відгалужень

Перемикачі слугують для зміни числа витків обмотки ВН і забезпечують тим самим регулювання напруги на виводах НН трансформаторів. Перемикання з одного регулювального відгалуження на інше здійснюється без збудження трансформатора (ПБЗ), тобто він має бути відключений як з боку ВН, так і з боку НН, що обумовлено вимогами безпечної роботи обслуговуючого персоналу. Тому контактна система перемикачів не розраховується на розрив струму навантаження і не має дугогасильних пристроїв.

Будь-який перемикач має такі основні вузли:

- а) нерухому контактну систему, з'єднану з регулювальними відгалуженнями обмотки ВН;
- б) рухому контактну систему, що забезпечує перехід з одного відгалуження на інше;
- в) механізм переміщення рухомих контрактів.

У сучасних трансформаторах перемикачі розташовуються всередині бака і кріпляться до елементів активної частини, привод перемикачів розташовується на кришці бака.

Конструкція перемикача залежить від схеми з'єднання обмотки ВН, місця розташування в ній регулювальних витків, від напруги і потужності трансформатора. В трансформаторах, які розраховуються в курсовому проекті, застосовуються трифазні перемикачі рейкового типу на напругу від 6 до 35 кВ і струм до 160 А включно та однофазні перемикачі барабанного типу на ті ж напруги і струм понад 160 А

Трифазний нульовий перемикач типу ПТО 6-35/65 (рис. 4.4) призначений для вмикання в коло обмотки, з'єднаної за схемою з'єднання «зірка» Y , регулювальні відгалуження якої розташовуються в кінці кожної фази (в нейтралі зірки). Таку схему регулювання мають трансформатори з багатошаровою циліндричною обмоткою на стороні ВН з напругами від 6 до 35 кВ і номінальним фазним струмом до 65 А включно.

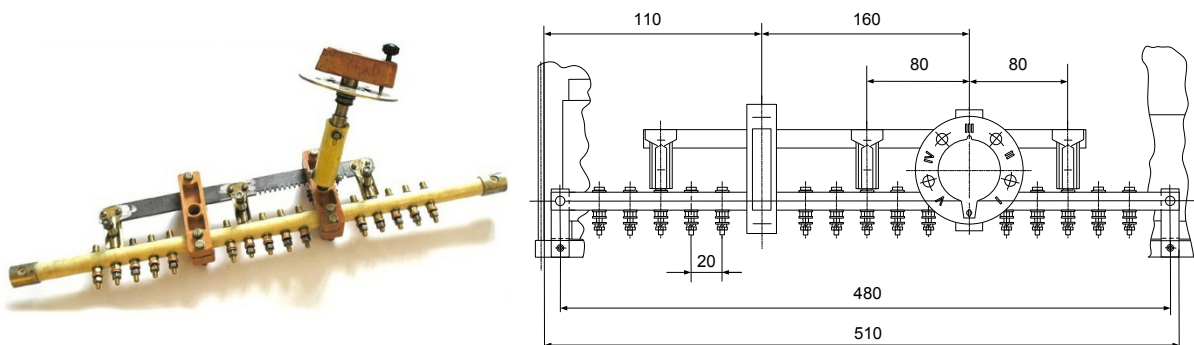


Рисунок 4.4 – Перемикач типу ПТО-6-35/65

Нерухома контактна система перемикача змонтована на паперово-бакелітовій трубці марки ТБ згідно з ГОСТ 8726-88 [9], в якій закріплені нерухомі контакти з латуні згідно з ГОСТ 2060-2006 [10]. Кріплення контактів забезпечується гайками і шайбами. Бакелітові трубки випускаються з внутрішніми діаметрами від 6 до 115 мм і з товщиною стінок 2, 4, 6, 8 мм.

Рухома контактна система складається зі сталеві рейки і мідних контактів, які разом утворюють нульову точку зірки на стороні ВН трансформатора. Рухомі контакти кріпляться до рейки болтами, гайками і шайбами. Необхідний натиск контактів забезпечується пружиною, що надівається на гвинт між регулювальними шайбами. Рейка переміщається в двох тримачах, розташованих між фазами перемикача, які виконують роль напрямних. Кожен тримач складається з двох однакових пластмасових кришок, стягнутих гвинтами, гайками і шайбами. Між кришками кладуться шайби, кількість яких визначається з умови вільного руху рейки (без тертя об кришки тримачів).

Механізм переміщення рухомих контактів включає зубчасте колесо, надіте на вал і входить в зачеплення із зубцями рейки. При повороті колеса відбувається переміщення рейки з контактами.

Таблиця 4.2 – Основні розміри перемикача ПТО 6-35/65

Розміри мм					
$U_{ВН}$, кВ	L	L_1	a	H	h
6 ÷ 10	510	480	175	165	143
20	610	580	225	255	233
35	610	580	225	395	373

Перемикач трифазний рейковий типу ПТР 6-35/160 (рис. 4.5) на струм 160 А призначений для вмикання в коло обмотки ВН, що складається з двох однакових півобмоток, що з'єднуються послідовно через перемикач. Зазвичай перемикачі такого типу застосовуються в неперервній котушечній обмотці, регулювальні відгалуження в якій розташовані в місці розриву, тобто всередині її висоти.

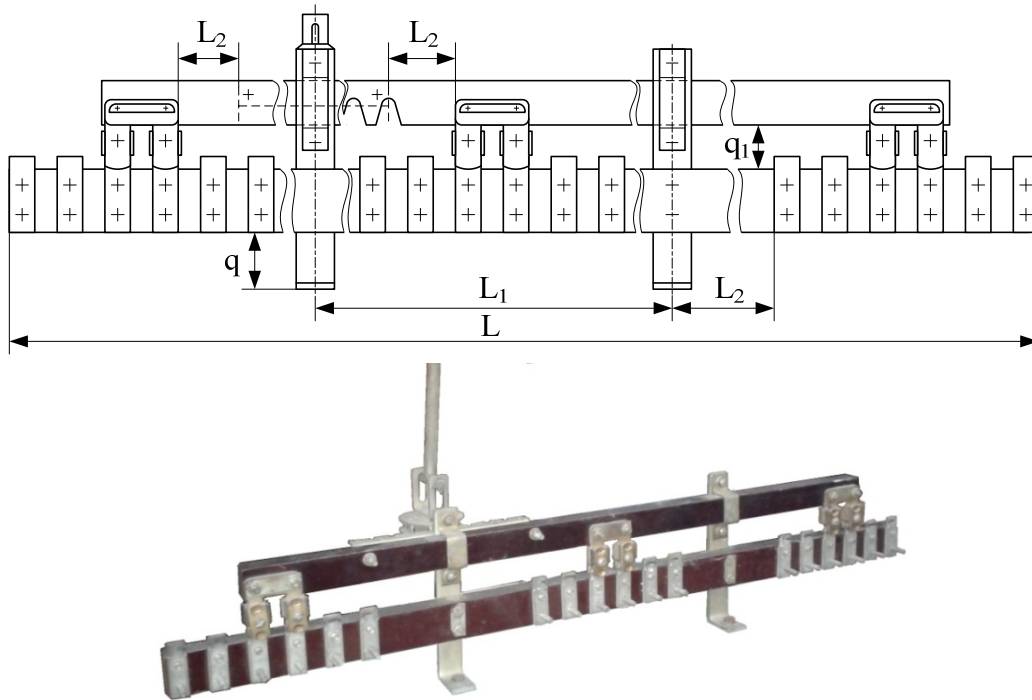


Рисунок 4.5 – Перемикач типу ПТР 6-35/160.

Нерухома контактна система перемикача змонтована на ізоляційній рейці з листового гетинаксу (ГОСТ 2718-74 [11]), до якої за допомогою болтів, гайок і шайб прикріплені нерухомі контакти з шинної міді (ГОСТ 434-78 [12]). Болти фіксуються від розкручування загальною стопорною пластиною. Провідники від регулювальних відгалужень обмотки приєднуються до болтів.

Рейка кріпиться до двох сталевих кронштейнів, які болтами прикріплюються до кутиків, приварених до однієї з верхніх ярмових балок.

Рухомі контакти ламельного типу складено на мідних П-подібних пластинах, закріплених на рухомій рейці з листового гетинаксу. Як напрямні для рухомої рейки використовуються сталеві скоби, закріплені за допомогою гвинтів на кронштейнах. Зусилля натиску контактів забезпечується пружиною.

Механізм переміщення рухомих контактів включає барабан, вал якого повертається у втулці, ввареній в кутик, який приварений до кронштейна. Вал барабана фіксується за допомогою стопорної шайби. До рухомої рейки кріпиться болтами, гайками і шайбами зубчаста сталевая рейка, виконана з кутика. Зубці цієї рейки входять в зачеплення з штифтами барабана, забезпечуючи при повороті останнього переміщення рухомих контактів. На болти між рейками надягають дистанційні втулки.

Привод перемикача розташовується на кришці бака і містить вал, що проходить усередині втулки, ущільненої прокладкою з маслоупорної гуми. Стискання останньої здійснюється гайкою, яка одночасно закріплює і покажчик положення перемикача. Ущільнення вала проводиться сальником, тиск на який регулюється гайкою через проміжні конусні втулки. Зверху на вал надягається пластмасовий ковпак, закріплений на ньому гвинтом з шайбою. Фіксація положення перемикача здійснюється фіксатором, угвинчуванням в гайку, яка закладається в ковпак при його пресуванні.

Таблиця 4.3 – Основні розміри перемикача ПТР 6 ÷ 35/160

Розміри, мм							
U _{ВН} , кВ	L ₂	L ₁	q	q ₁	L	h	Н
6 ÷ 10	55	320	50	50	818	186	з загального вигляду
20	85	380	78	78	938	234	
35	124	458	10	10	1094	291	

Вал привода штифтом з'єднується зі скобою штанги, нижній кінець якої аналогічно зв'язаний зі скобою барабана. Струмоведучі частини перемикача мають бути ізольовані від землі і між фазами на половину номінальної напруги, оскільки регульовальні відгалуження знаходяться всередині обмотки. Внаслідок цього габарити перемикача ПТР виходять більшими, ніж перемикача ПТО.

Перемикач однофазний барабанний типу П-6 (рис. 4.6) застосовується у неперервних обмотках ВН при струмах, що перевищують 160 А. При цьому кожна фаза має свій перемикач з окремим приводом. Вали перемикачів ізоляційними штангами з'єднані з приводами, розміщеними на кришці бака.

Нерухома контактна система перемикача змонтована на двох дисках з листового гетинаксу, в кожний з яких запресовано по сім паперово-бакелітових втулок (шість по колу і одна – в центрі диска).

У втулки, розташовані по колу, вставляються контактні стержні з латуні (ГОСТ 2060-2006 [10]). В латунні стержні вкручуються кабельні наконечники. До наконечників за допомогою паяння приєднуються кінці регульовальних відгалужень. При великому струмі наконечники можуть вкручуватися в обидва кінці контактних стержнів.



Рисунок 4.6 – Однофазний перемикач типу П-6.

Гетинаксові диски мають по три вирізи, розташовані під кутом 120° , в які входять виступи верхнього і нижнього коротких паперово-бакелітових циліндрів. Диски з контактами і короткими циліндрами розміщені всередині довгого бакелітового циліндра.

Бакелітові циліндри за допомогою шпильок і гайок з текстоліту (ГОСТ 5385-74 [13]) кріпляться до двох вертикальних букових рейок. Кінці рейок болтами прикріплюються до горизонтальних букових планок, які фіксуються болтами до полиць верхньої і нижньої ярмових балок.

Довгий циліндр має вікно шириною 145 мм, обернене до стінки бака на висоті проміжку між гетинаксовими дисками для огляду контактів перемикача. У робочому положенні вікно закрите рухомим зовнішнім циліндром.

Рухома контактна система складається на осі сталевого кривошипного вала. Вона складається з ряду кільцевих контактів, кожний з яких містить латунне кільце та спіральну сталеву пружину, що забезпечує натиск в місці контакту. Пружина забезпечує також фіксацію положення кільця відносно двох нерухомих контактів. Кількість кілець вибирається залежно від номінального струму обмотки з розрахунку 60 А на одне кільце, але не менше трьох.

Привод перемикача розташований на кришці бака і складається з прохідного вала та фланця. Фланець кріпиться трьома шпильками, ввареними в кришку бака, і затягується гайками та шайбами. Ущільнення фланця здійснюється прокладкою з маслоупорної гуми.

Вал привода ущільнюється сальником. Зверху на вал надягається литий ковпак з чавуну або з алюмінієвого сплаву. Фіксація ковпака на валу забезпечується штифтом. Положення контактів перемикача фіксується гвинтом.

4.4 Бак з візком

Бак трансформатора (рис. 4.7) є резервуаром, звареним з листової сталі. У плані бак має овальну форму, що повторює форму активної частини. До стінки знизу приварюється дно бака, а зверху – рама, до якої кріпиться кришка трансформатора (див. рис. 4.1). Ці чотири основні деталі є в баках всіх трансформаторів, а їх розміри, залежні від потужності останніх, наведено табл. 4.4 (все розміри подано в міліметрах).

Основні розміри бака – довжина L_b , висота H і ширина B – визначаються з розрахунку трансформатора (3.143–3.145).



Рисунок 4.7 – Бак трансформатора з радіаторами

У трансформаторах потужністю 400 кВА і більше стінки посилюються вертикальними ребрами жорсткості з швелерів, які дозволяють зменшити товщину стінок та вагу бака. У трансформаторах потужністю 400...630 кВА використовується швелер № 6, 8; 1000...1600 кВА – № 8; 2500...4000 кВА – № 10; 6300..10000 кВА – № 12; 16000 кВА – № 14.

Таблиця 4.4 – Розміри бака трансформатора, мм

Потужність, кВА	25... 100	160... 630	1000... 1600	2500... 4000	6300	10000	16000
Товщина стінки b	2	3	4	5	6	8	10
Товщина дна c	4	4...6	6...8	10	10	12	14
Виступ дна, a	16	16	20	25	25	25	25
Верхня рама, $d \times e$	5×35	6×40	10×65	12×75	12×75	14×90	12×90
Товщина кришки	3...4	6...8	8...10	10	12	14	16

У трансформаторах III і IV габаритів верхня рама додатково підсилюється кутиками, привареними до рами і стінки бака. Відстань між кутиками має бути близько 300 мм, а їх товщина – 8...12 мм.

До верхньої рами і до стінки бака приварюються чотири підйомних гака (по два з кожної сторони бака) для підйому трансформатора за допомогою крана (рис. 4.8). Гаки встановлюються по кінцях прямолінійної частини стінок бака або на початку її закруглень. Конфігурація гаків та їх розміри показано табл. 4.5. Орієнтовні маси трансформаторів в складеному вигляді наведено в табл. 4.5.

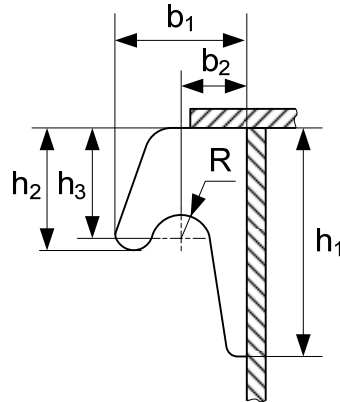


Рисунок 4.8 – Підйомний гак бака трансформатора

Баки трансформаторів потужністю 25 і 40 кВА мають гладкі стінки, в трансформаторах потужністю 63 і 100 кВА на прямолінійних частинах бічних стінок бака вварюються труби (в один ряд), а в трансформаторах потужністю 160 кВА і більше на стінках бака розміщуються знімні радіатори, які кріпляться до фланців на стінках. Відстань між осями фланців має відповідати вибраному типу радіатора.

Крім того, до стінки бака приварюють:

- а) фланець крана зливу масла;

- б) скоби кріплення активної частини (4 шт.);
- в) штуцер для крана відбору проби масла;
- г) бобишку болта заземлення;
- д) кронштейн кріплення термосигналізатора.

До верхньої рами по всьому її периметру приварюється сталевий дріт, що служить упором для гумової прокладки під кришкою бака. В дно баку вварюється втулка під пробку для спуску залишків масла.

Знизу до дна бака приварюється візок з котками для пересування трансформатора. Конструкції візків залежать від габаритів та потужності трансформаторів.

Таблиця 4.5 – Розміри підйомних гаків

Маса трансформатора	Розміри підйомного крюка, мм							
	h_1	h_2	h_3	b_1	b_2	b_3	R	t
до 2,4	90	49	40	20	50	80	12,5	12
до 4,0	105	54	45	25	65	95	12,5	12
до 7,0	125	65	56	25	65	99	16,0	20
до 12,0	150	75	66	25	70	104	16,0	20
до 20,0	200	81	72	25	80	120	22,0	36
до 32,0	400	200	170	40	110	155	22,0	40

Таблиця 4.6 – Маси трансформаторів в зібраному вигляді

$S_n / U_{ВН}$	Маса, т	$S_n / U_{ВН}$	Маса, т	$S_n / U_{ВН}$	Маса, т
25 / 10	0,38	160 / 35	1,7	1000 / 35	6,0
40 / 10	0,485	250 / 35	2,0	1600 / 35	7,1
63 / 10	0,6	400 / 35	2,7	2500 / 35	9,6
100 / 10	0,72	630 / 35	3,5	4000 / 35	13,2
160 / 10	1,1	1000 / 10	5,0	6300 / 35	17,4
250 / 10	1,425	1600 / 10	7,0	10000 / 35	21,8
400 / 10	1,9	2500 / 10	8,0	16000 / 35	31,3
630 / 10	3,0	4000 / 10	13,2		
100 / 35	1,3	6300 / 10	17,3		

У трансформаторах потужністю 25...63 кВА до дна бака приварюються дві поперечні пластини товщиною 6...8 мм і шириною 80...100 мм. Рами візка мають розміщуватися так, щоб трансформатор міг пересуватися як в поздовжньому (паралельно великій осі бака), так і в поперечному напрямках по шляхах із стандартною колією шириною 660 мм для трансформаторів

потужністю 100...630 кВА, 1070 мм для трансформаторів з потужністю від 1000 до 1600 кВА включно і 1524 мм для трансформаторів з $S_n = 2500...16000$ кВА.

У трансформаторах потужністю 100...630 кВА рама візка складається з двох швелерів (№ 8), приварених до дна бака так, щоб відстань між їх осями (серединами катків) дорівнювала стандартній колії $K = 660$ мм. Каток з віссю розміщений в сталевій обоймі (рис. 4.9), яка болтами з шайбами кріпиться до швелера. У місці розміщення болта швелер посилюється привареною до нього пластиною. Вісь від випадання оберігається шплінтами.

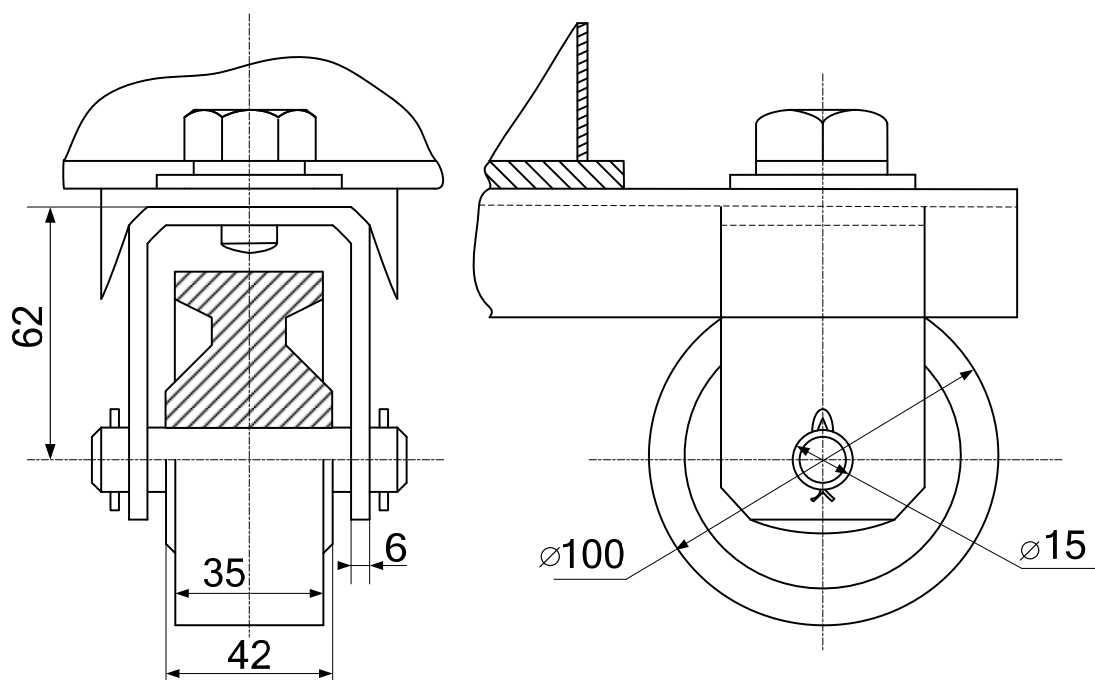


Рисунок 4.9 – Каток трансформатора потужністю 250 кВА

У трансформаторах потужністю 1000...1600 кВА рама візка складається з двох швелерів (№ 8), верхні полиці яких приварюються до дна бака. Кожен швелер посилюється сталевими пластинами, привареними до торців їхніх полиць. Вісь катка від випадання фіксується в рамі шплінтами. На осі між швелерами рами знаходяться каток та дві втулки, які обмежують переміщення катка вздовж осі. Опорами осі катка при русі в поперечному напрямі слугують сталеві пластини, приварені до швелерів.

У розглянутих трансформаторах застосовуються гладкі катки, відлиті з чавуну марки СЧ 18-36 і призначені для пересування по закладених у фундамент швелерах або двотаврових балках.

У трансформаторах потужністю 2500...16000 кВА рама візка складається з двох швелерів (№ 10), приварених торцями полиць до дна бака. По кінцях швелерів до них приварюється сталева опорна плита. Каток розміщується в спеціальній поворотній каретці, звареній із сталевих пластин (рис. 4.10).

Для повороту каретки на 90° піднімають трансформатор на домкратах, вигвинчують болти, повертають каретку, а потім знову закріплюють її болтами. У поворотних каретках використовуються сталеві катки з ребордою із сталі 55 (ГОСТ 977-88 [14]), призначені для пересування по рейках. Стандартна колія для цих трансформаторів $K = 1524$ мм.

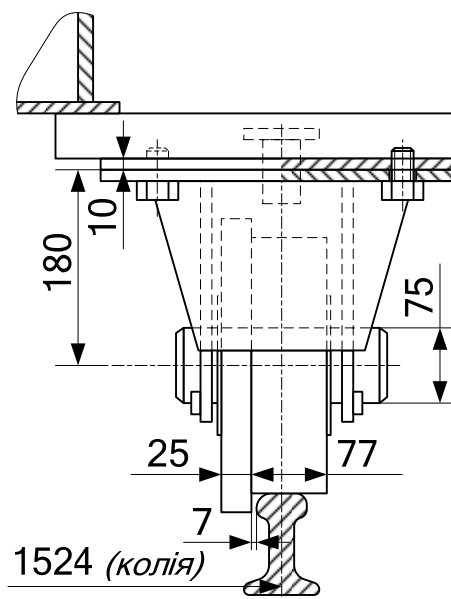


Рисунок 4.10 – Каток трансформатора потужністю 2500 кВА

4.5 Вводи

Для приєднання обмоток трансформатора до електричної мережі застосовуються вводи, що встановлюються на кришці бака. Основні деталі введів – струмоведучий стержень та фарфоровий ізолятор. Ізолятор відокремлює струмоведучу частину від кришки і вставляється нижньою частиною в отвір кришки.

Таким чином, вводи мають зовнішню частину, що контактує з навколишнім повітрям, і внутрішню, що занурена в масло. Крім того, вводи мають допоміжні деталі для кріплення їх до кришки і приєднання струмоведучого стержня до електричної мережі.

У сучасних трансформаторах напругою до 35 кВ включно застосовуються знімні вводи, що дозволяють легко замінити ізолятор вводу без зняття кришки з бака і вийняти внутрішню частину.

Серія знімних вводів розроблена для напруг 0,5; 1; 3; 10; 20 і 35 кВ. На рис. 4.11 зображено вводи різних напруг.

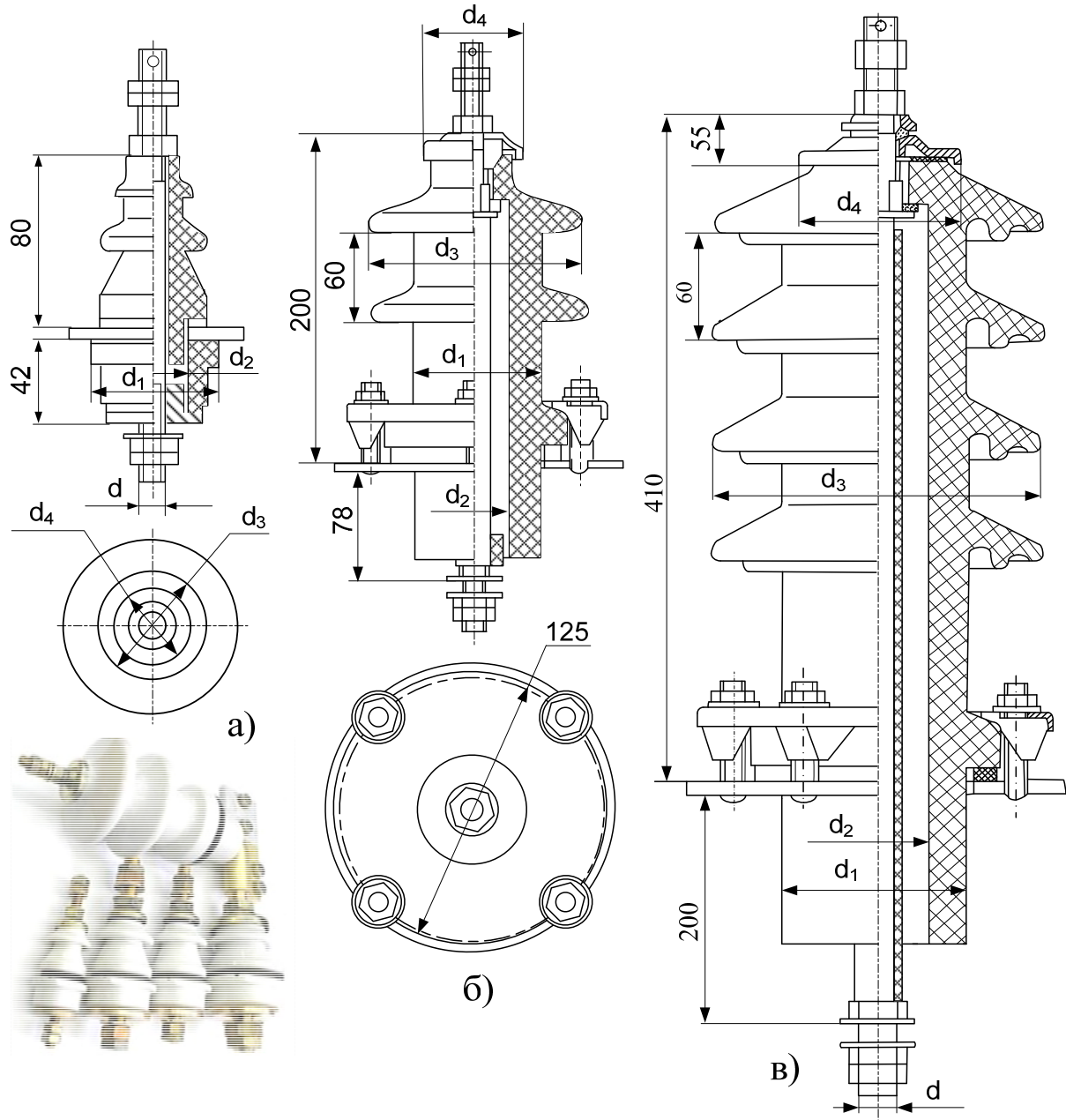


Рисунок 4.11 – Вводи трансформаторів
а) до 1 кВ; б) 6 ÷ 10 кВ; в) 20 ÷ 35 кВ.

При заливанні масла в трансформатор верхня гайка вводу послаблюється, тим самим даючи можливість виходу повітря з внутрішньої порожнини ізолятора. Гайка затягується як тільки рівень масла досягає верхньої кромки ізолятора.

Ізолятори на 6 і 10 кВ мають дві тарілки, а на 3 кВ – одну. Відповідно зменшується і загальна висота вводу.

Вводи на напругу 35 кВ (рис. 4.11, в) мають конструкцію, аналогічну вводам на 6...10 кВ, тільки ізолятор забезпечується чотирма тарілками, що утворюють довший шлях для поверхневого розряду. Вводи на 20 кВ мають тільки три тарілки.

Під верхній ковпак кладеться гумова прокладка, а струмоведуча шпилька ущільнюється гумовим кільцем, що затискається між ковпаком і проміжною втулкою. Струмоведуча шпилька цих вводів додатково ізолюється бакелітовою трубкою.

Якщо струм вводу будь-якої напруги дорівнює або більший 1600 А, то на верхній частині струмоведучої шпильки замість гайок закріплюють мідний контактний наконечник. У нижній частині він має втулку з різьбою, що має з одного боку поздовжній розріз. Після закручування втулки вона затискається на шпильці двома болтами і гайками.

Верхня (контактна) частина наконечника слугує для приєднання до неї проводів електричної мережі. Нижня частина струмоведучої шпильки при великих струмах має забезпечувати приєднання відводів від обмотки.

Вводи на струми до 630 А включно встановлюються безпосередньо на кришці бака. Вводи на 1000 А і вище встановлюють на плитах з маломагнітної сталі, привареної до кришки бака або на алюмінієвих плитах, закріплених на кришці болтами. При цьому в кришці бака під плитою робиться виріз. Застосування плит викликане підвищенням нагрівом сталевих кришки вихровими струмами.

Заміна пошкодженого ізолятора вводу проводиться в такій послідовності. Зливається масло з розширювача і бака, так щоб його рівень не перевищував рівня кришки. Відгвинчуються гайки з верхньої частини струмоведучої шпильки і знімається верхній ковпак. Щоб шпилька не впала всередину бака її підтримують дротом, протягнутим в отвір у верхній частині шпильки. Відкручують гайки і знімають ізолятор з шпильки.

Установлення іншого ізолятора проводиться в зворотній послідовності.

Основні розміри вводів на різні напруги і струми наведені табл. 4.7.

Вводи масляних трансформаторів мають розташовуватися на кришці так, щоб коли дивитися з боку вводів ВН, була дотримана така послідовність (зліва направо):

$$\text{ВН: } 0 - A - B - C; \quad \text{НН: } 0 - a - b - c.$$

Мінімальні відстані в повітрі між струмоведучими частинами (ковпаками) вводів, а також струмоведучими і заземленими частинами

трансформаторів мають становити: при напрузі введів 3 кВ – 60 мм; 6 кВ – 80 мм; 10 кВ – 110 мм; 15 кВ – 150 мм; 20 кВ – 180 мм; 35 кВ – 300 мм.

Таблиця 4.7 – Розміри введів трансформаторів

Напруга, кВ	Струм, А	Розміри, мм				
		d	d ₁	d ₂	d ₃	d ₄
до 1 (рис. 4.11, а)	100	M8	60	28	50	44
	250	M12	60	28	50	44
	400	M16	85	45	70	52
	630	M20	85	45	70	52
	1000	M27×1.5	110	56	90	76
	1600	M33×2	125	70	105	80
	2000	M42×3	125	70	105	80
3, 6, 10 (рис. 4.11, б)	250	M12	65	30	130	52
	400	M16	84	44	140	62
	630	M20	84	44	140	62
	1000	M27×1,5	104	60	155	98
	1600	M33×2	126	82	185	114
	2000	M42×3	126	82	185	114
20, 35 (рис. 4.11, в)	400	M16	104	54	205	98
	630	M20	104	54	205	98
	1000	M27×1,5	104	54	206	98
	1600	M33×2	126	76	240	114

4.6 Відводи

Відводами називаються провідники, за допомогою яких обмотки окремих фаз з'єднуються між собою з метою утворення заданої схеми (Y або Δ). Початки фаз з'єднуються зі стержнями введів, а регульовальні відгалуження обмоток ВН – з нерухомими контактами перемикачів.

Конструкція відводів залежить від типу обмоток, сили струму в них і схеми їх з'єднання. Відводи звичайно розміщують в площині, паралельній великій осі трансформатора, між стінками бака і обмотками: з однієї сторони активної частини – відводи обмотки НН, з іншої – обмотки ВН.

Для виконання відводів застосовуються такі типи провідників:

а) круглий провід (табл. 4.8) , який можна порівняно легко згинати і надавати відводам будь-яку форму. Застосовується такий спосіб виконання відводів у трансформаторах I і II габаритів при напрузі обмоток до 1 кВ;

б) шини прямокутного перерізу з розмірами, вказаними в табл. 4.8. Застосовуються при напрузі обмоток до 1 кВ, якщо перерізу круглого провідника недостатньо;

в) круглий провід перерахованих вище діаметрів, ізолюваний паперово-бакелітовими трубками із товщиною стінки 2 або 4 мм. Застосовується в трансформаторах I–III габаритів при напругах обмоток 3...35 кВ;

г) гнучкий провід з паперовою ізоляцією завтовшки 3, 6 або 8 мм на сторону, сплетений з тонких (діаметром 0,57 мм) провідників. Застосовується в трансформаторах IV габариту при напругах 6...35 кВ.

Допустимий струм у відводах залежить від їх перерізу і товщини ізоляції на одну сторону δ , значення допустимого струму для різних варіантів відводів наведено в табл. 4.8.

Всі відводи розраховуються на фазний струм (крім лінійних відводів схеми з'єднання Δ).

Таблиця 4.8 – Допустимий струм для провідників відводів

Круглий провідник, мм ²				Шини		Гнучкий провідник			
d, мм	$\delta = 0$	$\delta = 2$ мм	$\delta = 4$ мм	a×b, мм	Струм, А	d, мм	$\delta = 3$ мм	$\delta = 6$ мм	$\delta = 8$ мм
2,44	22,5	22,5	22,5	2,83×30	400	5,8	80	–	–
3,05	35	35	35	4,4×25	525	7,7	125	125	125
4,1	63	63	63	4,4×30	630	10,2	250	220	207
4,8	87	87	87	4,5×40	860	14,3	410	336	304
5,5	115	115	115	5×40	955	18,1	568	460	430
6,5	167	160	149	5×50	1200	23	793	637	596
8,0	241	217	194	4,5×60	1290	26,2	931	745	–
10	377	295	261	5×60	1440	29,8	1153	–	–
12	543	380	333	6×60	1720				
				5×80	1920				
				6×80	2300				
				5×100	1400				

Лінійні відводи з круглих провідників приєднуються до введів безпосередньо, а з прямокутних шин і гнучких кабелів – через компенсатор. Компенсатор складається з декількох складених разом тонких мідних стрічок товщиною 0,3 мм. З одного кінця стрічки компенсатора спаюються між собою і з шиною або кабелем відводу, а з іншого кінця стрічки також спаюються між собою, в них виконується отвір

для шпильки вводу. В середній частині компенсатора стрічки не спаяні, завдяки чому забезпечується їх гнучкість. Приєднують компенсатор до вводу, згинаючи його дугою, чим забезпечується компенсація неточності підгонки довжини шини відводу. Ширина стрічки компенсатора становить 30...80 мм.

Розташування відводів для різних варіантів обмоток ВН та НН наведено на рис. 4.12.

Рейки і планки (зображені штриховою лінією на рис. 4.12) для кріплення відведень виготовляються з бука і повинні мати розміри поперечного перерізу від 20×20 до 30×30 мм в трансформаторах I...III габаритів і від 50×60 до 60×100 мм в трансформаторах IV габариту.

Між дерев'яними планками кріплення відводів і стінкою бака має дотримуватися зазор, величина якого в трансформаторах I габариту приблизно дорівнює 15 мм, II габариту – 20 мм, III габариту – 25 мм і IV габариту – 40 мм.

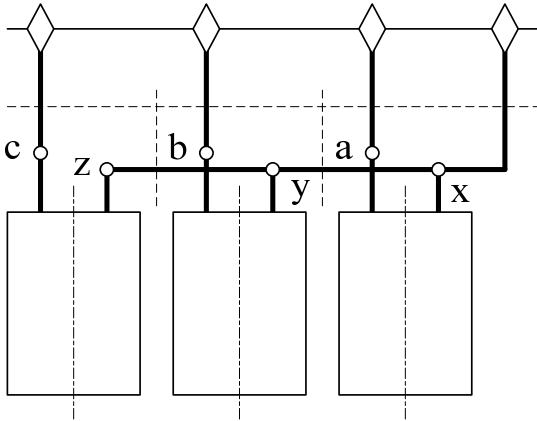
Відводи обмоток ВН розташовуються в ряд вздовж бака з однієї зі сторін активної частини. На стороні ВН зазвичай застосовуються багат шарова циліндрова обмотка з круглого проводу і неперервна спіральна з прямокутного проводу. Початки, кінці фаз і регулювальні відгалуження багат шарової обмотки виводяться з верхньої частини обмотки, причому регулювальні відгалуження мають приєднуватися до нерухомих контактів перемикача типу ПТО (див. рис. 4.4).

У безперервній обмотці регулювальні відгалуження розміщуються у середині висоти обмоток, через це у них має бути додаткове кріплення горизонтальною рейкою на рівні верхнього торця обмоток. Принцип кріплення верхньої частини відводів такий самий, як і в попередній обмотці. У разі застосування перемикачів барабанного типу (див. рис. 4.6) регулювальні відводи приєднуються до них без додаткового кріплення.

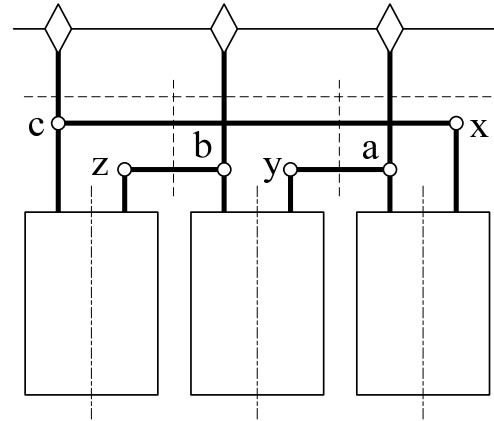
Кінці обмоток з відводами, відводи між собою з'єднуються за допомогою паяння твердим мідно-фосфорним припоєм (ГОСТ 4515-93 [15]), Зачищені кінці провідників або шин затискаються між вугільними електродами щипців для електропаяння. При включенні струму електроди швидко розжарюються і нагрівають місце спаю до 700...750 °С. Припой у вигляді прутків розплавляється і заповнює місце спаю.

Олов'яно-свинцевий припой (ГОСТ 21930-76 [16]) застосовується лише для запаювання кінців гнучкого кабелю в латунні контактні наконечники перемикачів барабанного типу і при виготовленні компенсаторів. Мідно-фосфорний припой має більшу механічну міцність, теплостійкість і менший електричний опір порівняно з олов'яно-свинцевим.

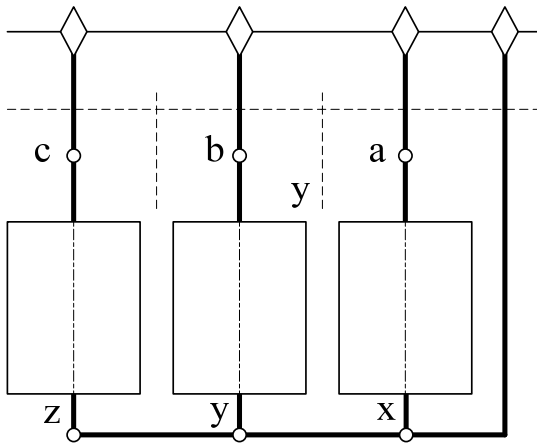
Кінці регулювальних відводів з нерухомими контактами перемикачів рейкового типу з'єднуються за допомогою болтових з'єднань.



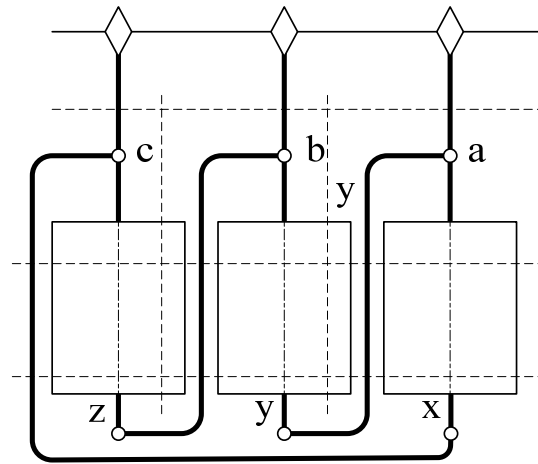
Відводи циліндричної обмотки НН зі схемою з'єднання Y з нулем



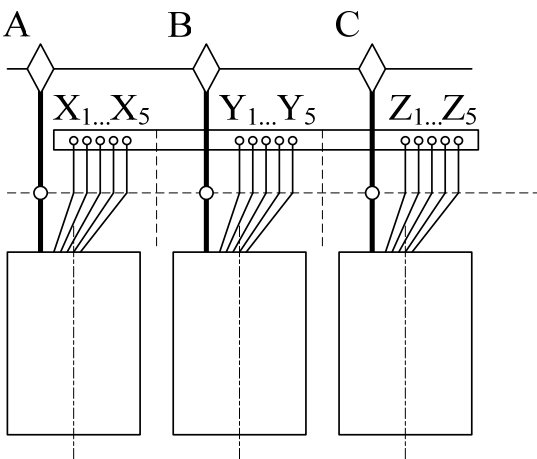
Відводи циліндричної обмотки НН зі схемою з'єднання Δ



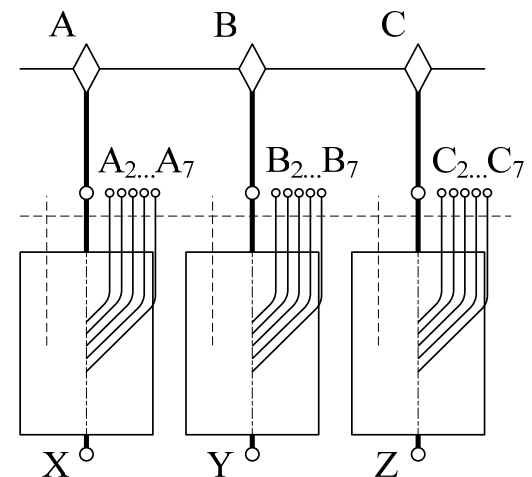
Відводи гвинтової обмотки НН зі схемою з'єднання Y з нулем



Відводи гвинтової обмотки НН зі схемою з'єднання Δ



Відводи циліндричної обмотки ВН



Відводи гвинтової обмотки ВН

Рисунок 4.12 – Конструкції відводів обмоток низької та високої напруги

При конструюванні відводів потрібно дотримуватися необхідних ізоляційних відстаней між струмоведучими і заземленими частинами, тому конструювання відводів необхідно пов'язувати з розташуванням вводів на кришці бака і перемикача, оскільки він визначає положення його привода на кришці. Остаточні внутрішні розміри бака встановлюються після конструювання відводів.

4.7 Охолоджувальні пристрої

Охолодження масляних трансформаторів здійснюється за рахунок природної конвективної циркуляції масла. У трансформаторах малої потужності 25...40 кВА для відведення тепла досить власної поверхні бака. При потужності 63...100 кВА потрібне невелике додаткове збільшення поверхні охолодження бака, яке досягається установленням невеликої кількості труб (один ряд), причому звичайно тільки на прямолінійній ділянці стінок бака. У трансформаторах потужністю 160 кВА і вище відведення тепла з їхньої зовнішньої поверхні здійснюється шляхом установлення знімних радіаторів, зварених з труб.

У проєктованих трансформаторах застосовуються одинарні радіатори з овальних і круглих труб та подвійні – з круглих.

Одинарні радіатори з овальними трубами застосовуються в трансформаторах потужністю 160...1000 кВА. Один або декілька радіаторів кожного трансформатора мають вбудований в нього фільтр для неперервного очищення масла в процесі його роботи. Радіатор складається з двадцяти овальних труб, зварених нижніми кінцями в збірну коробку–колектор, а верхніми – в дно корпусу фільтра (в радіаторах з фільтром) або в такий же колектор (в радіаторі без фільтра). У корпус фільтра встановлюється касета, заповнена силікагелем марки КСК (ГОСТ 3956-76 [17]), призначеним для поглинання з масла продуктів його старіння. Маса силікагелю в одному вбудованому фільтрі становить близько 6...6,5 кг. Кількість радіаторів з фільтром вибирають з умови, щоб повна вага силікагелю у фільтрах становила близько 1,0% маси масла трансформатора.

Подвійні радіатори з круглими трубами застосовуються в трансформаторах потужністю 2500...16000 кВА. Вони складаються з 64 круглих труб діаметром 51 мм (4 ряди по 16 труб). Кінці труб зварюються в стінки колекторів з листової сталі:

На верхньому і нижньому колекторах розташовуються пробка для випуску повітря, скоба для підйому та кутник для з'єднання радіаторів між собою. Труби обох рядів скріпляються між собою за допомогою кутників, приварених до них і стягнутих болтами і гайками. В дно верхнього та

нижнього колекторів вварюються патрубки, до яких приварені фланці для кріплення до відповідних патрубків, розташованих на стінці бака.

У трансформаторах потужністю 10000 кВА і вище для збільшення тепловіддачі від радіаторів застосовується їх додатковий обдув за допомогою вентиляторів, що встановлюються вертикально по два на кожен радіатор, два вертикальних електродвигуни з вентилятором на валу розташовані в міжтрубному просторі радіатора. Вентилятори засмоктують повітря знизу і направляють його конусом розсіювання вгору. При цьому інтенсивно обдувається найбільш нагріта верхня частина поверхні труб. Потужність двигунів становить 250 Вт, частота обертання 1450 об/хв. Двигуни встановлюються на кронштейнах, прикріплених до стінки бака. Відстань від осі нижнього патрубка радіатора до опорної поверхні кронштейна (фланця електродвигуна) дорівнює 670 мм при відстані між верхнім та нижнім фланцями радіатора по осях $A = 1800 \dots 2685$ мм; 870 мм при $A = 3000$ і 3250 мм; 1170 мм при $A = 3750$ і 4000 мм та 1270 мм при $A = 4250$ мм.

У трансформаторах потужністю 1600...2500 кВА застосовується одинарний радіатор з круглими трубами, що є половиною подвійного. У цьому радіаторі патрубки з фланцями вварюються в центр стінки верхнього та нижнього колекторів. Вся решта деталей такі ж, як в подвійному радіаторі.

4.8 Розширювач

Розширювачем є сталевий циліндричний ємність, що встановлюється над кришкою трансформатора і сполучена трубопроводом з баком. Об'єм розширювача має становити близько 10% об'єму масла в баку.

У сучасних трансформаторах застосовуються розширювачі з нормалізованими значеннями внутрішніх діаметрів D , довжин циліндрів L , товщини його стінок S і діаметрів сполучних трубопроводів d_1 (рис. 4.13), які наведені в табл. 4.9.

Відповідно до розрахованого об'єму вибирається стандартний розширювач з найближчим значенням ємності. Розширювач розташовується уздовж вузької сторони бака трансформатора праворуч від нього, якщо дивитися з боку введів ВН.

Конструкція розширювача залежить від потужності трансформатора. У всіх випадках розширювач складається з циліндричного корпусу, звареного з листової сталі. Заднє дно розширювача приварюється до корпусу, а переднє дно кріпиться болтами з гайками і шайбами та є знімним. Ущільнення цього дна здійснюється гумовою прокладкою.

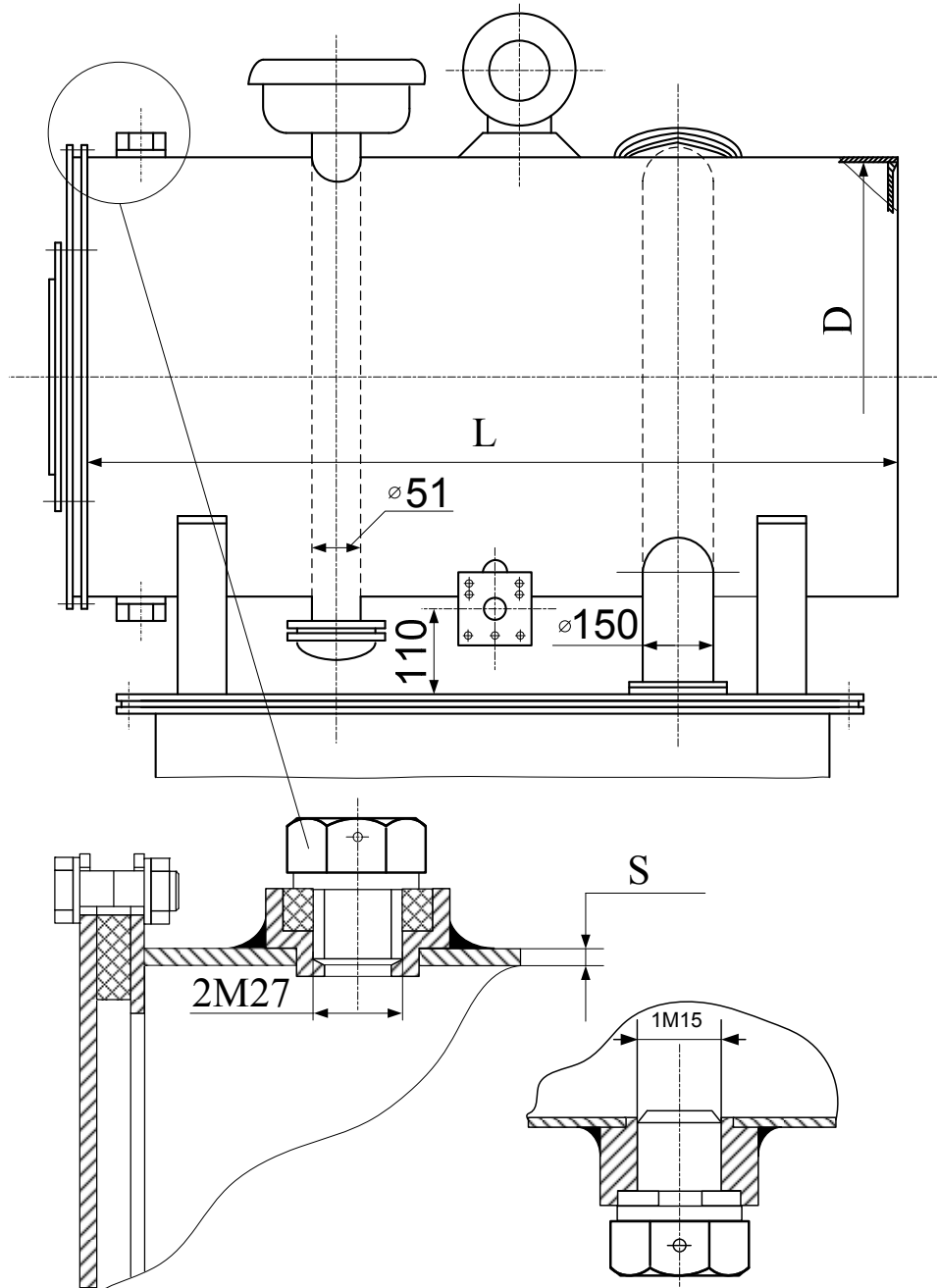


Рисунок 4.13 – Конструкція та розміри розширювача

До корпусу розширювача приварюються опорні пластини, які за допомогою болтів кріпляться до кришки трансформатора. У потужних трансформаторах (вище 1000 кВА) пластини приварюються до кутиків, а ті кріпляться до кришки.

Для підйому розширювача застосовують одне або два підйомних кільця, приварених до корпусу.

Для заливання масла в розширювач використовується пробка, ущільнена гумовою прокладкою. Аналогічна пробка з прокладкою слугує

для зливу залишків масла з розширювача. Основна частина масла заливається через маслопровід, що сполучає розширювач з баком. Цей маслопровід виконується зі спеціальним в'язком-відстійником, нижчим за нижню точку корпусу розширювача. Відстійник виконується для запобігання потраплянню вологи і сторонніх механічних домішок в бак.

Таблиця 4.9 – Технічні характеристики розширювачів

Розміри, мм				Об'єм розширювача, м ³	Маса масла, що заливається, кг
D	L	S	d ₁		
250	415	1,4	25	0,02	8
	510			0,025	11
	650			0,032	14
310	810	1,4	25	0,04	17
	660			0,05	21
	800			0,06	25
	1060			0,08	34
	1320			0,10	43
470	720	1,4	50	0,125	54
	920			0,16	69
	1150			0,20	86
	1440			0,25	107
	1870			0,32	138
690	1040	2,0	50	0,4	172
	1340			0,5	215
	1680			0,63	271
	2140			0,8	345
940	1420	3,0	80	1,0	427
	1800			1,25	534
	2310			1,6	683
	2820			2,0	854

У трансформаторах без газового реле (до 1000 кВА) трубопровід за допомогою привареного до нього фланця з'єднується прямо з кришкою бака, а у решті випадків – в його переріз ставиться газове реле.

З'єднання розширювача з атмосферою здійснюється через вбудований або виносний повітряосушувач (рис. 4.14).

Вбудований повітряосушувач складається з двох сталевих труб, вварених в корпус розширювача (внутрішня – зверху, зовнішня – знизу). До верхньої частини внутрішньої труби приварений патрубок, в який заливається трансформаторне масло. Внутрішній об'єм труби заповнений індикаторним силікагелем марки КСМ (крупний силікагель мілкопористий) з розміром зерен 3...7 мм (ГОСТ 3956-76 [17]), просочений розчинами хлористого кальцію і хлористого кобальту. Знизу

повітряосушувач закритий скляним ковпаком, закріплюваний фланцем і болтами з гайками. Ущільнення ковпака виконується за допомогою гумової манжети.

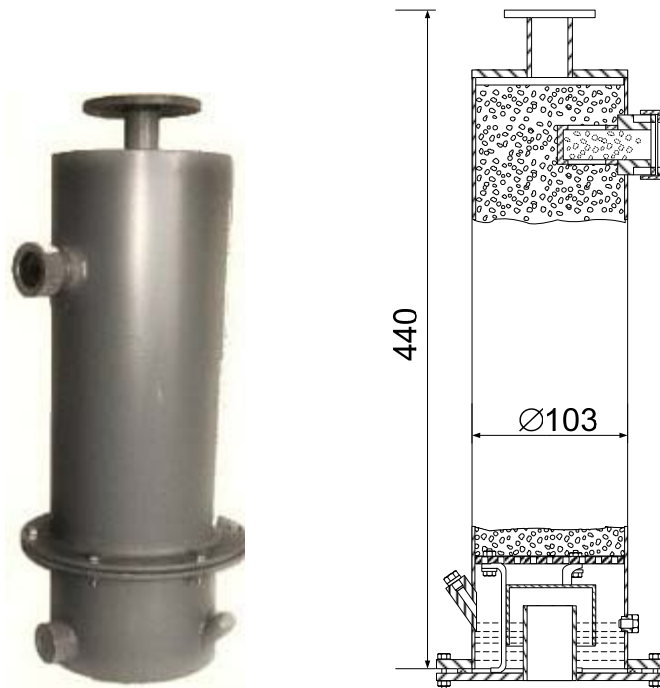


Рисунок 4.14 – Повітряосушувач

При пониженні рівня масла в розширювачі тиск повітря над ним стає нижчий атмосферного і воно засмоктується під ковпак. Патрубок, опущений в масло, змушує повітря проходити через нього, утворюючи так званий гідравлічний затвор. Залишивши в маслі пил та механічні домішки, повітря через отвори в кришці потрапляє всередину труби, де силікагель забирає з нього вологу. Потім через міжтрубний простір чисте і сухе повітря потрапляє всередину розширювача.

При підвищенні рівня масла в розширювачі повітря з нього витісняється в атмосферу, проходячи той самий шлях у зворотному напрямі.

У міру зволоження індикаторний силікагель змінює забарвлення з блакитного на рожевий колір, що фіксується через скляний ковпак.

У трансформаторах до 1600 кВА включно застосовується плоский маслопоказчик, що складається з плоского скла, яке затискається між гумовою прокладкою і фланцем за допомогою шпильок і гайок. Шпильки приварюються до дна бака. У трансформаторах потужністю 2500 кВА і вище застосовуються трубчасті маслопоказчики, основною частиною яких є скляна трубка, кінці якої затискаються і ущільнюються в двох колінах за допомогою фланця з болтами, гайками і шайбами та гумовою прокладкою.

Верхнє і нижнє коліна маслопоказчиків за допомогою болтів і гайок з'єднуються з фланцями патрубків, приварених до знімного дна розширювача. Між фланцями встановлюється гумова прокладка.

Нижнє коліно має спеціальний болт, за допомогою якого можна перекривати отвір в коліні і проводити очищення масломірного скла або його заміну.

На передньому торці розширювача робляться контрольні відмітки, відповідні рівню масла в ньому при максимальній температурі повітря $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$, нормальній $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$ і мінімальній $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Трансформатори потужністю 1000 кВА і вище повинні мати запобіжну (вихлопну) трубу, яка запобігає розриву бака при аварійному підвищенні в ньому тиску газів, що виділяються з масла при його надмірному нагріванні.

У трансформаторах 1000 і 1600 кВА труба є циліндром діаметром 150 мм, ввареним в корпус розширювача. З одного боку труба має фланець, за допомогою якого з'єднується з кришкою бака, а з протилежної сторони її вихід закривається скляною мембраною, ущільненою двома гумовими прокладками. Останні за допомогою болтів, гайок і шайб затискаються між фланцем і фланцем труби. Від випадкових пошкоджень мембрана оберігається тонким металевим ковпаком.

При нормальній роботі трансформатора кількість газів, що виділяються з масла, невелика, і вони потрапляють в розширювач через отвір у верхній частині труби. В аварійному режимі, якщо трансформатор з яких-небудь причин не відключився, тиск газів різко підвищується і вони вибивають скляну мембрану труби. Гази разом з маслом виходять через неї назовні, запобігаючи вибуху бака. Труба має бути встановлена з нахилом, щоб масло виливалося поблизу від трансформатора на землю.

У трансформаторах потужністю 2500 кВА і вище труба встановлюється окремо від розширювача. Труба такого ж діаметра, 150 мм, встановлюється під кутом 15° або $22,5^{\circ}$ до вертикалі. Верхній кінець труби також закритий скляною мембраною і повернений так, щоб масло виливалося поблизу від трансформатора. Внутрішня порожнина труби трубопроводами з'єднана з розширювачем для відведення з неї газів при нормальній роботі трансформатора.

4.9 Допоміжна арматура

Трансформатори необхідно комплектувати пристроями, що забезпечують їх нормальну експлуатацію. До допоміжної арматури трансформаторів відносяться фільтри неперервного очищення масла,

крани, вентиля або пробки для заливання, зливання і відбору проби масла, болт заземлення і ін.

Фільтри неперервного очищення масла застосовуються у трансформаторах потужністю 160 кВ·А і вище та поділяються на три типи:

1. Вбудовані в один з радіаторів (див. рис. 4.2, поз. 16);
2. Виносні фільтри термосифонного типу з масою силікагелю 4, 6 і 10 кг;
3. Окремі фільтри з масою силікагелю 50 і 100 кг.

Конструкція вбудованого в радіатор фільтра описана в розділі 3. Звичайно в трансформаторах може встановлюватися від одного до трьох вбудованих фільтрів.

Виносний фільтр з невеликою масою силікагелю (4, 6 і 10 кг) наведений на рис. 4.15.

Він складається зі зварного циліндричного корпусу, в дно якого вварений нижній трубопровід. Зверху корпус закритий знімною кришкою з ввареним в неї верхнім трубопроводом. Кришка кріпиться до фланця корпусу болтами і ущільнюється гумовою прокладкою. Всередину корпусу вставляється касета, заповнена силікагелем марки КСК. Кришка корпусу повинна мати пробку виходу повітря з фільтра при заливанні масла в трансформатор.

Внутрішній діаметр корпусу при масі силікагелю 4 і 6 кг – 180 мм, а при 10 кг – 200 мм. На трансформаторі може встановлюватися від одного до трьох фільтрів.

У трансформаторах потужністю до 1000 кВА включно рекомендується застосовувати вбудовані в радіатор фільтри, а при більшій потужності – виносні фільтри. Термосифонні фільтри на масу силікагелю 50 і 100 кг використовуються в трансформаторах V–VIII габаритів і в трансформаторах для курсового проектування не використовуються.

Для заливання і зливання масла застосовують пробки, плоскі крани і вентиля. Заливання масла в бак трансформаторів I габариту здійснюється через пробку, що встановлюється на розширювачі (див. рис. 4.13). Аналогічна пробка встановлюється в дні бака і служить для зливання з нього залишків масла (див. рис. 4.1, поз. 21).

У трансформаторах потужністю 160...6300 кВА для заливання масла в бак використовується плоский кран з умовним проходом 50 мм, а в трансформаторах більшої потужності – 80 мм.

Конструкція плоского крана наведена на рис. 4.16. Кран складається з плоского корпусу, в центрі якого є отвір діаметром 50 мм або 80 мм. Цей отвір може перекриватися плоскою заслінкою, що закріплена в верхній та нижній півсях за допомогою штифтів. Поворот заслінки на 90°

здійснюється Г-подібною рукояткою, що жорстко закріплена на верхній півосі. Положення заслінки вказується стрілкою на рукоятці і фіксується болтом. Верхня піввісь ущільнюється сальником з азбестового графітованого шнура (ГОСТ 1779-83 [18]), підтискання якою забезпечується гайкою через проміжну втулку.

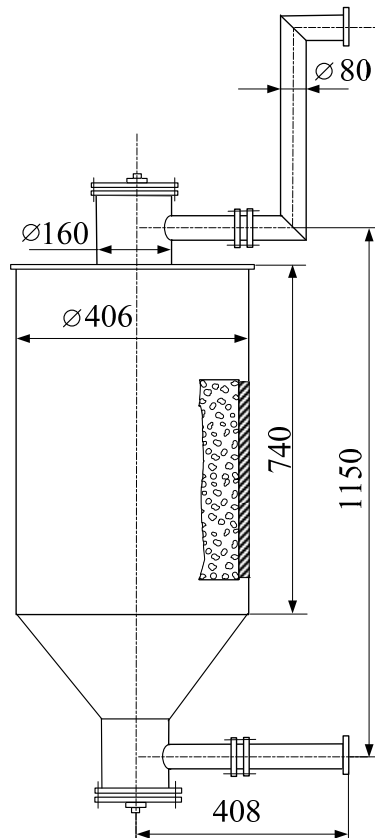


Рисунок 4.15 – Термосифонний фільтр неперервного очищення масла

Плоский кран для заливання масла в бак встановлюється на його кришці. Після заливання масла до рівня кришки кран закривається плоскою заглушкою, ущільненою гумовою прокладкою. Решта масла доливається в бак та розширювач через пробку розширювача.

Такий самий кран застосовується для зливання масла з баку і встановлюється в нижній частині стінки баку (див. рис. 4.1, 4.2, поз. 19). Крім того, плоскі крани ставляться в розрізах патрубків радіаторів, термосифонних фільтрів і газового реле, що дозволяє проводити демонтаж вказаних пристроїв та їх заміну без зливання основної частини масла.

Для заливання і зливання масла з баку можуть застосовуватися чавунні вентилі з умовними проходами 25, 50 або 80 мм з фланцевим кріпленням.

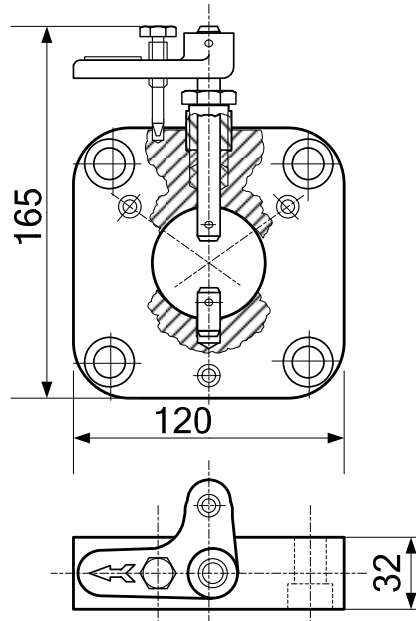


Рисунок 4.16 – Конструкція плоского крана

Вентиль має значно більші габаритні розміри порівняно з плоским краном. Однак вентиля надійніше перекривають шлях масла на відміну від заслонки плоского крана, через яку масло просочується при знятій заглушці. Через це вентиля з умовним проходом 25 мм рекомендується ставити в нижній частині стінки бака в трансформаторах I і II габаритів, а з проходом 50 мм – в трансформаторах потужністю 1000 і 1600 кВ·А.

У нижчій частині стінки баку ставиться кран для відбору проби масла з кульковим клапаном (рис. 4.17).

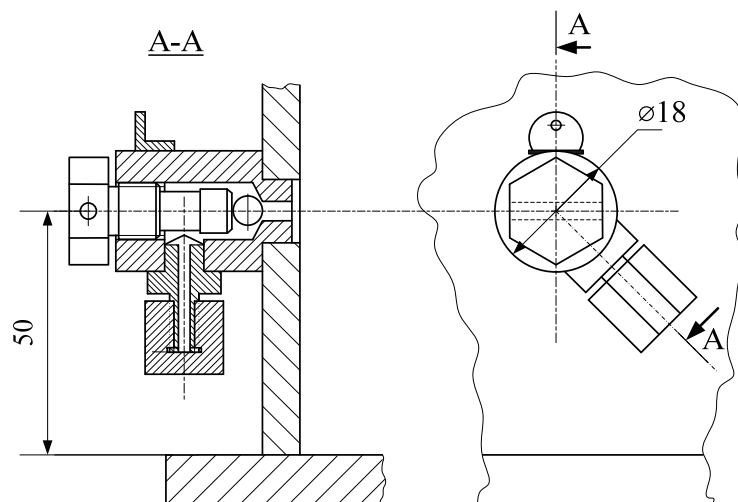


Рисунок 4.17 – Конструкція крана для відбору проб масла

Він складається з корпусу, ввареного в стінку бака, усередині якого просвердлено отвір, що закривається кулькою, кулька затискається болтом.

У бічну стінку корпусу крана вварена втулка, закрита гайкою і ущільнена прокладкою. Втулка служить для приєднання шланга.

4.10 Контрольні та захисні пристрої

До контрольних пристроїв відносяться прилади, які забезпечують неперервний контроль рівня масла в розширювачі, показчики температури масла у верхніх шарах бака, термометри та термосигналізатори.

Конструкції маслопоказчиків було розглянуто в підрозділі 4.8.

У трансформаторах потужністю до 630 кВА включно температура масла в баку вимірюється спиртовим скляним термометром (рис. 4.18, див. рис. 4.2, поз. 23). Нижня частина термометра поміщається в сталевій гільзі, привареній до фланця, який кріпиться до кришки бака двома шпильками і гайками. Ущільнюється фланець гумовою прокладкою, для зменшення температурного перепаду між гільзою і термометром її заповнюють трансформаторним маслом. Верхня частина термометра захищена сталевим циліндричним кожухом з поздовжнім прорізом, який кріпиться до гільзи трьома гвинтами. Термометр встановлюють з боку НН трансформатора біля краю кришки.

У трансформаторах потужністю 1000 кВА і більше температура масла вимірюється термосигналізатором (рис. 4.18).

Термосигналізатор типу ТСМ-100 є манометричним дистанційним термометром з електроконтактним пристроєм. До комплекту термосигналізатора входять термобалон, заповнений хлористим метилом, манометр зі шкалою, проградуєваною в °С, та капілярна трубка, захищена металевим екраном.

Термобалон поміщається в сталеву гільзу, яка заповнюється трансформаторним маслом, до гільзи приварюється фланець, аналогічний фланцю термометра. Кріплення термобалона в гільзі забезпечується штуцером, який закручується в гільзу. В середині штуцера проходить капілярна трубка.

Сигналізатор складається з корпусу, усередині якого змонтовані манометрична пружина, механізм переміщення стрілки та електроконтактний пристрій. На шкалі встановлюються додатково жовта і червона нерухомі стрілки-показчики. Вони встановлюються на певну температуру, наприклад, червона на гранично допустиму для трансформаторного масла, а жовта на 5...10 °С менше. Установлення цих стрілок на шкалі здійснюється гвинтами, закритими пробками. Контакти, що з'єднані зі стрілками, виведено на контактні затискачі, закриті гільзою. Капілярна трубка від термобалона через штуцер з'єднується з манометричною пружиною. До задньої стінки корпусу сигналізатора приварюються

бобишки, що призначені для кріплення приладу до пластини на стінці бака або до труб радіатора на рівні очей людини.

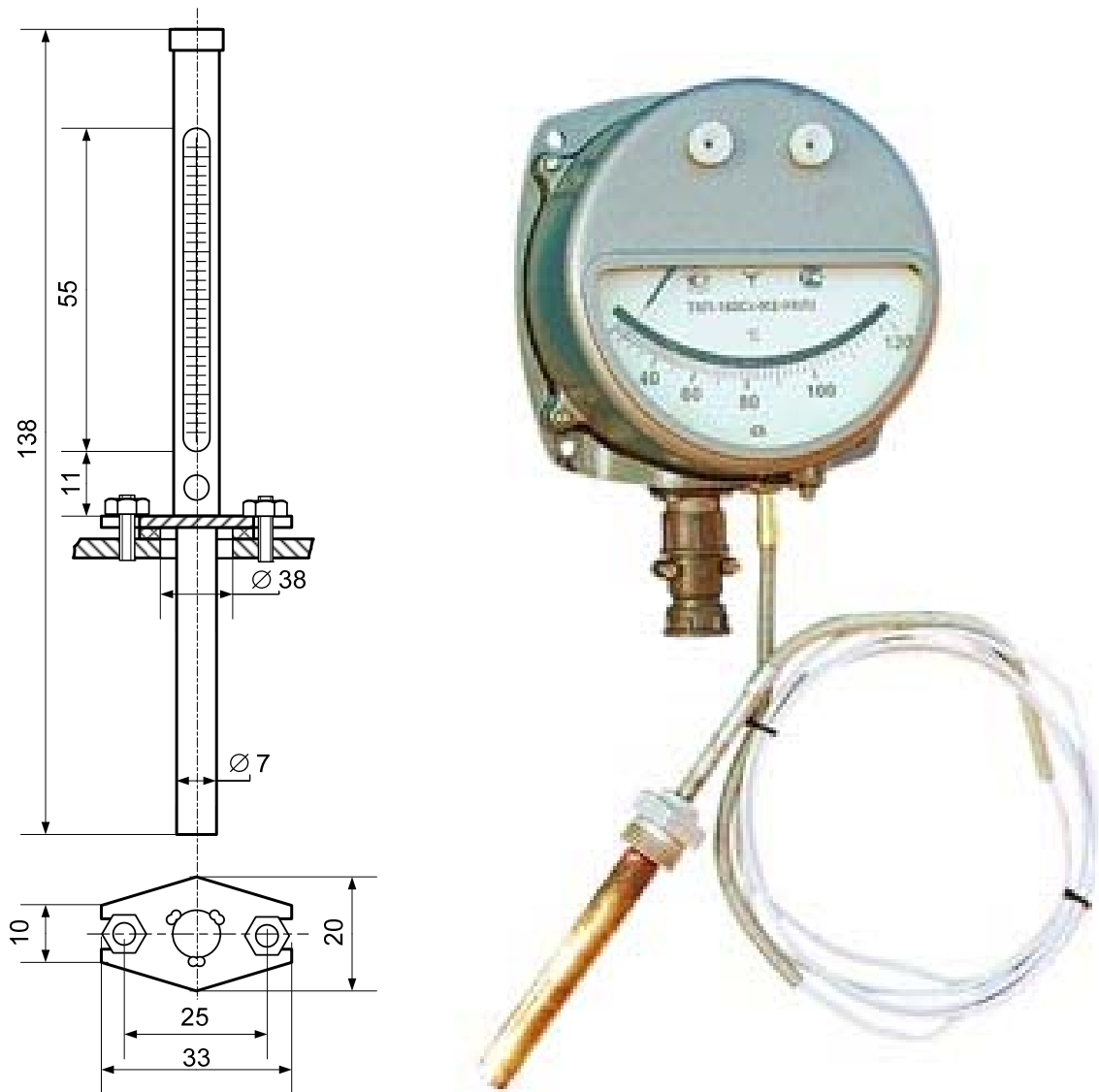


Рисунок 4.18 – Засоби для вимірювання температури масла трансформатора: термометр та термосигналізатор

При досягненні рухомою стрілкою стрілки-показчика жовтого кольору замикається сигнальний контакт, внаслідок чого подається світловий або звуковий сигнал про підхід температури масла до гранично допустимої. Якщо підвищення температури масла продовжується, то при досягненні рухомою стрілкою стрілки-показчика червоного кольору замикається наступний контакт, який подає сигнал в схему релейного захисту на відключення трансформатора.

Захисними пристроями трансформатора є запобіжна (вихлопна) труба, пробивний запобіжник і газове реле.

Пробивний запобіжник – розрядник призначений для запобігання підвищенню потенціалу на стороні НН трансформатора і приєднаної до обмотки НН незаземленої мережі при електричному пробі між обмотками ВН і НН (див. рис. 4.2, поз. 27). Запобіжником забезпечуються всі трансформатори з напругою обмотки НН 0,69 кВ, а з напругами 0,4 і 0,23 кВ – на вимогу замовника (в курсовому проекті всі трансформатори з вказаними напругами обмотки НН повинні мати запобіжники).

Пробивний запобіжник складається з фарфорових підставок і головки. Через центральний отвір підставки проходить контактна шпилька, що затискається двома гайками зверху і знизу. Між гайками затискається провід діаметром 5 мм, що з'єднує шпильку з одним із лінійних вводів обмотки НН, якщо вона з'єднана в трикутник, або з нульовим вводом, якщо обмотка з'єднується в зірку з виведеною нейтральною точкою.

При нормальному значенні напруги на обмотці НН електроди запобіжника розділені іскровим проміжком. При пробі між обмотками ВН і НН високий потенціал, що з'являється на нижньому електроді, викликає пробі іскрового проміжку по отворах слюдяної прокладки пробивного запобіжника, з'єднуючи обмотку НН із землею і запобігаючи появам високої напруги в мережі НН. Запобіжник витримує після пробі струм заземлення 200 А протягом 30 хв. Цей струм може викликати зварювання електродів, тому після спрацювання запобіжник має бути замінений новим.

Газове реле (рис. 4.19 та див. рис. 4.1, поз. 24) застосовується в трансформаторах потужністю 1000 кВА і вище та слугує для їх захисту від всіх видів внутрішніх пошкоджень, навіть від збільшення тиску газів, прискореного перетікання масла з бака в розширювач, а також від витоку масла з трансформатора і потрапляння повітря в бак. Трансформатори потужністю 400 і 630 кВА, призначені для живлення власних потреб станцій і підстанцій, також забезпечуються газовими реле.

Газове реле встановлюється в розрізі маслопроводу, що з'єднує розширювач з баком і кріпиться фланцевим з'єднанням.

Для того, щоб газове реле спрацювало своєчасно, потрібно щоб весь газ, який виділяється при пошкодженні трансформатора, потрапляв в корпус реле. Для цього трансформатор встановлюють на фундамент так, щоб один його край (зі сторони газового реле) був піднятий на кут $1 \dots 1,5^\circ$. Крім того, маслопровід разом з реле також повинен мати нахил на кут $2 \dots 4^\circ$ до горизонталі з підйомом у бік розширювача.



Рисунок 4.19 – Газове реле трансформаторів

Докладніший опис конструкції допоміжних пристроїв трансформаторів наведений в [3].

ЛІТЕРАТУРА

1. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови : ДСТУ 2105-92 (ГОСТ 11920-93) – [Чинний від 1993–07–01]. – К. : Держстандарт України, 1993. – 78 с. – (Національні стандарти України).
2. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия : ГОСТ 21427.1-83. – [Введ. 01–01–1984]. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).
3. Тихомиров П. М. Расчёт трансформаторов / Тихомиров П. М. – М. : Энергоатомиздат, 1986.
4. Павлов И. Ф. Расчёт трехфазных силовых трансформаторов с применением ЭВМ : метод. указ. к курс. проект. / Павлов И. Ф. – Винница : ВПИ, 1990.
5. Электротехнический справочник : в 4 т. / под ред. Герасимова В. Г. – М. : Изд-во МЭИ, 2004. – Т. 3. : Производство, передача и распределение электрической энергии. – 2007. – 963 с.
6. Провода обмоточные с эмалево-волокнистой, волокнистой, пластмассовой и пленочной изоляцией. Общие технические условия : ГОСТ 26606-85. – [Введ. 09–09–85]. – М. : Изд-во стандартов, 1985. – 28 с. – (Межгосударственный стандарт).
7. Пластина резиновая для трансформаторов. Технические условия : ГОСТ 12855-77. – [Введ. 01–01–79]. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).
8. Прокат сортовой и фасонный из стали углеродистой обыкновенного качества. Общие технические условия : ГОСТ 535-2005. – [Введ. 01–01–2008]. – М. : Изд-во стандартов, 2008. – 12 с. – (Межгосударственный стандарт).
9. Трубки электротехнические бумажно-бакелитовые. Технические условия : ГОСТ 8726-88. – [Введ. 01–01–1989]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
10. Прутки латунные. Технические условия: ГОСТ 2060-2006 – [Введ. 01–01–2008]. – М. : Изд-во стандартов, 2007. – 29 с. – (Межгосударственный стандарт).
11. Гетинакс электротехнический листовой. Технические условия : ГОСТ 2118-74. – [Введ. 01–01–1976]. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 23 с. – (Межгосударственный стандарт).
12. Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических цепей. Технические условия : ГОСТ 434-78. – [Введ. 01–01–1977]. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 20 с. – (Межгосударственный стандарт).

13. Стержни электротехнические текстолитовые круглые. Технические условия : ГОСТ 5385-74 – [Введ. 01–01–1976]. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 16 с. – (Межгосударственный стандарт).

14. Отливки стальные. Общие технические условия : ГОСТ 977-88. – [Введ. 01–01–1990]. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 35 с. – (Межгосударственный стандарт).

15. Сплавы медно-фосфористые. Технические условия : ГОСТ 4515-93. – [Введ. 01–01–1997]. – М. : Изд-во стандартов, 2000. – 10 с. – (Межгосударственный стандарт).

16. Припои оловянно-свинцовые. Технические условия : ГОСТ 21930-76. – [Введ. 01–01–1978]. – М. : Изд-во стандартов, 1989. – 20 с. – (Межгосударственный стандарт).

17. Силикагель технический. Технические условия : ГОСТ 3956-76. – [Введ. 01–01–1977]. – М. : Стандартиформ, 2008. – 12 с. – (Межгосударственный стандарт).

18. Шнуры асбестовые. Технические условия : ГОСТ 1779-83. – [Введ. 01–01–1985]. – М. : ИПК Изд-во стандартов, 2003. – 8 с. – (Межгосударственный стандарт).

Навчальне видання

**Левицький Сергій Михайлович
Бальзан Ігор Вікторович
Шевчук Юрій Володимирович**

**РОЗРАХУНОК І ПРОЕКТУВАННЯ ТРИФАЗНИХ
ТРАНСФОРМАТОРІВ
Курсове проектування**

Навчальний посібник

Рукопис оформлено В. Шевчуком

Редактор Т. Старічек

Оригінал-макет виготовлено О. Ткачуком

Підписано до друку 26.02.2018 р.
Формат 29,7×42¼. Папір офсетний.
Гарнітура Times New Roman.
Друк різнографічний. Ум. друк. арк. 7,53.
Наклад 50 (1-й запуск 1–20) пр. Зам. № 2018-050.

Видавець та виготовлювач
інформаційний редакційно-видавничий центр.
ВНТУ, ГНК, к. 114.
Хмельницьке шосе, 95,
м. Вінниця, 21021.
Тел. (0432) 65-18-06.
press.vntu.edu.ua;
E-mail: kivc.vntu@gmail.com.
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.