

М. П. Розводюк, Д. П. Проценко, В. С. Бомбик, О. А. Жуков

---

# Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора.

## Курсове проектування



Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет

**Розрахунок і проектування трифазного си-  
лового масляного трансформатора.  
Курсове проектування**

**Електронний навчальний посібник  
комбінованого (локального та мережного) використання**

Вінниця  
ВНТУ  
2023

УДК 621.313(075)

P65

Автори:

**М. П. Розводюк, Д. П. Проценко, В. С. Бомбик, О. А. Жуков**

Рекомендовано до видання Вченою радою Вінницького національного технічного університету Міністерства освіти і науки України (Протокол № 5 від 29.12.2022 р.)

*Рецензенти:*

**В. О. Комар**, доктор технічних наук, професор

**М. Й. Бурбело**, доктор технічних наук, професор

**О. П. Чорний**, доктор технічних наук, професор

**P65** **Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора.** Курсове проектування : електронний навчальний посібник комбінованого (локального та мережного) використання [Електронний ресурс] / [Розводюк М. П., Проценко Д. П., Бомбик В. С., Жуков О. А.]. – Вінниця : ВНТУ, 2023. – 149 с.

В навчальному посібнику викладено послідовність розрахунку і проектування силового трифазного масляного трансформатора. Наведено вихідні дані та завдання для курсового проектування, а також приклад розрахунку в математичному пакеті прикладних програм MathCAD. Навчальний посібник рекомендовано для студентів, що навчаються за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

**УДК 621.313(075)**

© ВНТУ, 2023

---

**ЗМІСТ**

ВСТУП .....	5
ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ .....	7
1 ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА .....	9
1.1 Розрахунок основних електричних величин .....	9
1.2 Активна частина трансформатора .....	10
1.3 Вартість активної частини трансформатора.....	16
1.4 Втрати і струм холостого ходу .....	20
1.5 Середня густина струму в обмотках .....	27
1.6 Механічні напруженості у проводі обмоток .....	27
1.7 Послідовність визначення оптимального варіанта.....	27
1.8 Результати розрахунку ORTR.....	29
2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК.....	32
2.1 Вибір типу обмоток.....	32
2.2 Розрахунок обмотки низької напруги .....	33
2.2.1 Двошарова циліндрична обмотка .....	34
2.2.2 Гвинтова обмотка .....	40
2.2.3 Багатошарова циліндрична обмотка.....	44
2.2.4 Неперервна спіральна котушкова обмотка .....	47
2.3 Розрахунок обмотки високої напруги .....	52
2.3.1 Багатошарова циліндрична обмотка високої напруги.....	53
2.3.2 Неперервна спіральна котушкова обмотка високої напруги .....	55
3 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ.....	59
3.1 Втрати короткого замикання.....	59
3.2 Напруга короткого замикання .....	61
4 МЕХАНІЧНІ СИЛИ І НАПРУГИ В ОБМОТКАХ .....	64
5 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ .....	68
5.1 Маса магнітної системи.....	68
5.2 Втрати холостого ходу.....	69
5.3 Струм холостого ходу.....	70
6 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА .....	72
6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом .....	72
6.2 Вибір і розрахунок системи охолодження.....	74
6.3 Розрахунок поверхні охолодження .....	77

6.3.1 Розрахунок поверхні охолодження бака з гладкими стінами.....	77
6.3.2 Розрахунок поверхні охолодження бака з трубами .....	77
6.3.3 Розрахунок поверхні охолодження бака з навісними радіаторами.....	78
6.4 Визначення фактичних перегрівів.....	80
7 КОНСТРУКТИВНІ ПОКАЗНИКИ ТРАНСФОРМАТОРА .....	81
8 КОНСТРУЮВАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА.....	83
8.1 Конструктивна схема трансформатора .....	83
8.2 Магнітопровід.....	86
8.3 Перемикачі регулювальних відгалужень.....	91
8.4 Бак з візком .....	95
8.5 Вводи .....	100
8.6 Відводи .....	102
8.7 Охолоджувальний пристрій .....	105
8.8 Розширювач .....	107
8.9 Допоміжна арматура .....	111
8.10 Контрольні та захисні пристрої .....	114
Література .....	117
Додаток А Завдання на проектування.....	119
Додаток Б Приклад розрахунку у ППП MathCad .....	121
Додаток В Розрахунок оптимального варіанта виконання трансформатора в ORTR.....	144
Додаток Г Приклад кресленика .....	149

## ВСТУП

Навчальний посібник призначений для надання допомоги під час курсового проектування з дисципліни «Електричні машини», зокрема для закріплення теоретичних знань з розділу «Трансформатори».

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 кількістю 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 самі трансформатори припадає і основна частина втрат енергії, що оплачуються за найвищою ціною.

З огляду на вищесказане, одним з найважливіших завдань проектування силових трансформаторів нині 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 переважно за рахунок застосування холоднокатаної рулонної електротехнічної сталі з поліпшеними магнітними властивостями – низькими і особливо низькими питомими втратами та питомою намагнічувальною потужністю. За останні 30–40 років втрати холостого ходу вдалося знизити майже вдвічі.

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

В курсовому проектуванні пропонується більш детально ознайомитися з основними етапами проектування силового трифазного масляного трансформатора: попередній розрахунок, розрахунок оптимального варіанта трансформатора, зокрема вибір типів обмоток, розрахунок обмоток низької та високої напруг, механічних сил і напруг в обмотках та тепловий розрахунок трансформатора. Передбачається порівняння значень параметрів

спроєктованого трансформатора зі значеннями параметрів серійного силового трансформатора.

Кожному студенту запропоновано здійснити розрахунок і проектування силового трифазного масляного трансформатора згідно з індивідуальним завданням (додаток А) та заданим варіантом з використанням наведеної в посібнику методики.

Для полегшення розрахунків у додатку В наведено приклад попереднього розрахунку трансформатора в програмі ORTR. Розрахунок оптимального варіанта трансформатора в математичному пакеті прикладних програм (ППП) MathCAD наведено додатку Б.

За результатами виконаного курсового проекту передбачається його захист. Для успішного захисту пропонується переглянути теоретичні відомості з розділів електричних машин, наприклад, у матеріалах [1–5].

## ЗАВДАННЯ НА ПРОЕКТУВАННЯ

Студентам пропонується спроектувати окремий трифазний силовий масляний трансформатор із стандартними параметрами, які б задовольняли вимоги ДСТУ 2105-92 (ГОСТ 11920-93) [6].

*Вихідні дані для проектування:*

- 1) номінальна повна потужність  $S_n$ , (кВ·А);
- 2) номінальні лінійні напруги обмоток низької (НН) та високої (ВН) напруги  $U_{1лн}$ ,  $U_{2лн}$ , (кВ);
- 3) втрати холостого ходу  $P_0$ , короткого замикання  $P_k$ , Вт;
- 4) струм холостого ходу  $i_0$ , %;
- 5) напруга короткого замикання  $u_k$ , %;
- 6) схема та група з'єднання обмоток (чисельник – схема обмотки ВН, знаменник – обмотки НН);
- 7) матеріал проводу обмоток (мідь або алюміній).

Усі трансформатори розраховуються на промислову частоту  $f = 50$  (Гц), тривалий режим роботи, зовнішнє установлення і мають мати пристрої для перемикання регульовальних відгалужень обмотки ВН без збудження трансформатора (ПБЗ). Діапазон регулювання напруги  $\pm 2 \times 2,5\%$  від  $U_n$ .

**Примітки:**

1. Варіанти завдань на проектування видає викладач.
2. В наведених далі розрахункових формулах усі величини, які відносяться до обмотки НН, мають індекс 1, а до обмотки ВН – індекс 2.
3. У всіх розрахункових виразах величини, наведені у завданні, мають вказану розмірність. Розмірність повторно введених параметрів вказується додатково. Всі лінійні розміри потрібно підставляти в сантиметрах, крім розмірів поперечного перерізу проводу, які використовуються під час обчислень в міліметрах.

Склад проекту.

Як об'єкт для курсового проектування взято трифазний силовий масляний трансформатор потужністю 25...16000 кВА включно і 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 та графічну частини. До записки необхідно додати результат розрахунку трансформатора в програмі ORTR.

Графічна частина містить один аркуш кресленника формату А1. На аркуші наводять загальний вигляд трансформатора в трьох проекціях з необхідними розрізами та перерізами, які дозволяють показати його основні вузли. За неможливості показати деякі пристрої на основних проекціях необхідно зробити додаткові виносні розміри та перерізи. Специфікацію виробів під час учбового проектування бажано розміщувати в правому куті



відповідного кресленника над основною назвою. У разі відсутності місця на кресленнику її можна виконати на окремих стандартних листах.

Студенти заочного відділення виконують тільки кресленники загального вигляду трансформатора.

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

## 1 ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

Під час навчального курсового проектування перед студентами ставиться задача розрахувати оптимальний варіант трансформатора, який має параметри, вказані в проектному завданні. Оптимальним вважається трансформатор, який матиме мінімальну вартість, що визначається переважно вартістю його активних матеріалів (активної частини) – електротехнічної сталі і проводу обмоток.

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

### 1.1 Розрахунок основних електричних величин

Номінальні лінійні струми трансформатора, А:

$$I_{1(2)лн} = \frac{S_n}{\sqrt{3} \cdot U_{1(2)лн}}, \quad (1.1)$$

Номінальні фазні струми та напруги обмоток (розраховуються для обмоток НН та ВН, відповідно):

- за з'єднання обмоток в зірку Y:

$$\begin{cases} I_{\phi н} = I_{лн}, \\ U_{\phi н} = \frac{U_{лн}}{\sqrt{3}}. \end{cases} \quad (1.2)$$

- за з'єднання обмотки в трикутник Δ:

$$\begin{cases} I_{\phi н} = \frac{I_{лн}}{\sqrt{3}}, \\ U_{\phi н} = U_{лн}. \end{cases} \quad (1.3)$$

Активна і реактивна складові заданої напруги короткого замикання, %:

$$u_a = \frac{P_k}{10 \cdot S_n}, \quad (1.4)$$

$$u_p = \sqrt{u_k^2 + u_a^2}. \quad (1.5)$$

Значення  $P_k$  підставляється в Вт, а номінальної потужності трансформатора, відповідно до виданого завдання, – у кВА.

В нормальних довготривалих режимах до обмоток трансформатора прикладено номінальні напруги. В аварійних режимах (у разі короткого замикання і обриву ліній) або за їх включення і відключення 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 випробується після виготовлення трансформатора на підвищену (випробувальну) напругу, значення якої для відповідної обмотки можна знайти з табл. 1.1 [6]:

Таблиця 1.1 – Випробувальна напруга для кожної обмотки трансформатора

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

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

## 1.2 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 найбільш широке застосування як найдешевша у виготовленні. Її конструкція (рис. 1.1) складається з трьох стержнів і двох ярем, розташованих 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 [7]. Зі зменшенням товщини листів зменшуються втрати від вихрових струмів, але збільшується трудомісткість 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.

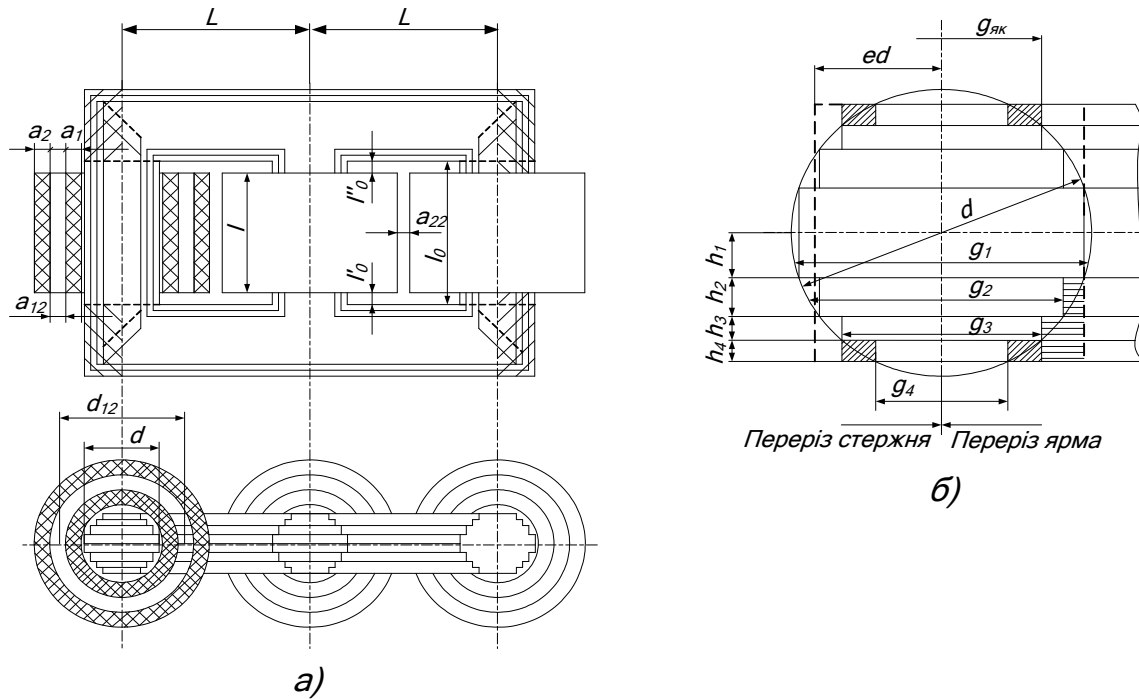


Рисунок 1.1 – Основні розміри трансформатора

Пластини стержнів і ярем укладаються так, що між ними утворюється стик (повітряний проміжок). В процесі укладки (шихтовки) пластин стики попереднього шару мають перекриватись цілими пластинами наступного шару, що дозволяє зменшити вплив повітряних проміжків на шляхи основного магнітного потоку. Якщо площина стику знаходиться під кутом  $90^\circ$  до напрямку магнітного потоку, то такий стик називається прямим, якщо кут менше  $90^\circ$ , то стик буде косим. У випадку прямих стиків отримуються найменші відходи в процесі розкрою сталі і трудоемність виготовлення магнітопроводу, але найбільші втрати і струм холостого ходу. Це пояснюється тим, що в цьому випадку об'єм сталі, де потік не збігається з напрямком прокатки, отримується найбільшим. Більш докладно це питання описано в [8]. На рис. 1.1, а) в середньому стержні показано прямі стики, в двох крайніх – косі.

Оскільки обмотки силових трансформаторів мають мати форму циліндра, то для максимального заповнення їх внутрішнього перерізу стержні також мають мати круглий переріз. Але для отримання такого перерізу необхідно мати велику кількість типорозмірів пластин, тому дійсний переріз стержня являє собою багатоступінчасту фігуру, вписану в коло діаметром  $d$  (рис. 1.1, б), який називається діаметром стержня. Кожен ступінь утворюється набором пластин однакової ширини, наприклад перший пакет – набирається із пластин шириною  $g_1$ , інший –  $g_2$  і т. д. Товщина цих пакетів (на одну половину перерізу) позначається відповідно  $h_1$ ,  $h_2$  і т. д.

Переріз ярма переважно 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. За невеликих значень діаметра стержня ширина останнього пакета ярма береться такою, що дорівнює ширині попереднього (передостаннього) пакета. Наприклад, на рис. 1.1, б) останній пакет стержня має ширину пластин  $g_4$ , а ярма –  $g_{як} = g_3$ . Внаслідок цього загальний переріз ярма збільшується, порівняно з перерізом стержня, на величину заштрихованих ділянок (рис. 1.1, б). За великих значень діаметра стержня ширина пластин двох або трьох крайніх пакетів ярма береться такою, що дорівнює ширині попереднього пакета, а всі інші пакети – такі самі, як і в стержні.

З метою уніфікації розмірів пластин та найбільш економічного розкрою сталі дотримуються стандарту [7], 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 нормалізовано розміри пакетів стержнів і ярм  $g_1 \times h_1$ ,  $g_2 \times h_2$  і т. д., та кількість ступенів в їх перерізі. Розміри цих пакетів для вказаних значень діаметрів наведено в табл. 1.1. Там також вказано площі перерізів ступінчастих фігур стержнів  $P_{фс}$  і ярм  $P_{фя}$ , ширину крайнього пакета ярма  $q_{як}$  і коефіцієнт  $K_{кр}$  заповнення площі круга діаметром  $d$  площею ступінчастої фігури стержня.

$$K_{кр} = \frac{P_{фс}}{(\pi \cdot d^2) / 4}. \quad (1.6)$$

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

Наприклад, за  $d = 40$  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 саму 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  $K_я = \frac{P_{фя}}{P_{фс}}$ , 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  $P_{фя}$  неповністю заповнені чистою сталлю, а частина їх припадає на ізоляцію. Це враховується коефіцієнтом заповнення сталлю площі ступінчастої фігури:

$$K_3 = \frac{P_c}{P_{\phi c}} = \frac{P_y}{P_{\phi y}}, \quad (1.7)$$

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

Для сталі з довжиною листів 0,35 мм  $K_3 = 0,97$ , а для листів 0,3 мм  $K_3 = 0,96$ . В попередньому розрахунку, коли ще невідома выбрана товщина листів, потрібно брати  $K_3 = 0,965$ .

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 мають 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 мають бути витримані мінімально допустимі ізоляційні відстані  $a_{01}$ ,  $a_{12}$ ,  $l_0'$ ,  $l_0''$ ,  $a_{22}$  (див. рис. 1.1, а), значення яких визначаються напругами випробування відповідних обмоток  $U_{вин}$  (табл. 1.2).

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

За заданих значень потужності, номінальних і випробувальних напруг обмоток попередньо з достатньо високим ступенем точності можуть бути визначені усі ізоляційні відстані і радіальні розміри обмоток.

Середній діаметр двох обмоток (середній діаметр каналу розсіювання)  $d_{12}$  достатньо жорстко зв'язаний з діаметром стержня і цей зв'язок залежить переважно від потужності трансформатора. Звідси, за відомої 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  $l$ :

$$d^3 \cdot l = 6,8 \cdot 10^4 \cdot \frac{S_n \cdot a \cdot a_p \cdot K_p}{f \cdot B_c^2 \cdot K_c^2 \cdot u_p}, \quad (1.8)$$

де  $a = d_{12} / d$ ;

$a_p$  – приведена ширина каналу розсіювання, ( $a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{2}$ );

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

$B_c$  – робоча індукція в стержні;

$K_c$  – коефіцієнт заповнення сталлю площі круга з діаметром  $d$ ,

$$K_c = K_{кр} \cdot K_3.$$

Всі інші величини, що входять в (1.8), відомі з викладеного раніше і є постійними.

Таблиця 1.2 – Типорозміри магнітопроводів силових трансформаторів

$d$ , см	$P_{фс}$ , см <sup>2</sup>	$P_{фя}$ , см <sup>2</sup>	$g_{як}$ , 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	7,5×1,4	6,5×0,9	5,5×0,6	4,0×0,5	—	—	—	—
9	56,7	58,2	5,5	0,891	8,5×1,5	7,5×0,9	6,5×0,6	5,5×0,4	4,0×0,5	—	—	—
10	72	73,2	5,5	0,917	9,5×1,6	8,5×1,0	7,5×0,7	6,5×0,5	5,5×0,4	4,0×0,4	—	—
11	86,2	89,7	6,5	0,905	10,5×1,6	9,5×1,1	8,5×0,7	7,5×0,6	6,5×0,4	4,0×0,7	—	—
12,5	112,3	115,3	6,5	0,915	12×1,8	10,5×1,6	9,5×0,6	8,5×0,6	6,5×0,7	4,0×0,6	—	—
14	141,5	144	6,5	0,919	13,5×1,9	12×1,7	10,5×1,0	8,5×0,9	6,5×0,7	4,0×0,5	—	—
16	183,5	188,3	8,5	0,913	15,5×2,0	13,5×1,9	12×1,0	10,5×0,7	8,5×0,7	5,5×0,7	—	—
18	232,8	237,6	9,5	0,915	17,5×2,1	15,5×2,5	13,5×1,3	12×0,8	9,5×0,9	6,5×0,8	—	—
20	288,4	296,2	12	0,918	19,5×2,2	17,5×2,6	15,5×1,5	13,5×1,1	12×0,6	10,5×0,5	7,5×0,7	—
22	353	360,5	12	0,929	21,5×2,3	19,5×2,8	17,5×1,5	15,5×1,2	13,5×0,9	12×0,5	10,5×0,4	7,5×0,7
24	419,3	425,6	13,5	0,927	23×3,4	21,5×1,9	19,5×1,7	17,5×1,2	15,5×0,9	13,5×0,8	12×0,5	9,5×0,6
26	490,6	507,1	15,5	0,924	25×3,5	23×2,5	21,5×1,3	19,5×1,3	17,5×1,0	15,5×0,8	12×0,9	10,5×0,6
28	570,9	591,1	17,5	0,927	27×3,7	25×2,6	23×1,7	21,5×0,9	19,5×1,1	17,5×0,9	13,5×1,3	10,5×0,7
30	657,2	657,2	17,5	0,93	29,5×2,8	27×3,7	25×1,8	23×1,9	21,5×1,8	17,5×1,8	13,5×1,2	10,5×0,6
32	746,2	762,4	19,5	0,928	$\frac{31,0 \times 4,0}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{29,5 \times 2,2}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{27 \times 2,4}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{25 \times 1,4}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{23 \times 1,1}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{21,5 \times 0,7}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{19,5 \times 0,8}{13,0 \times 0,5}$	$\frac{15,5 \times 1,2}{13,0 \times 0,5}$
34	844,8	860,8	19,5	0,931	$\frac{32,5 \times 5,0}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{31 \times 1,9}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{29,5 \times 1,5}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{27 \times 1,9}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{25 \times 1,2}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{23 \times 1,0}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{19,5 \times 1,4}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{15,5 \times 1,1}{13,5 \times 0,6}$

Продовження таблиці 1.2

d, см	П <sub>фс</sub> , см <sup>2</sup>	П <sub>фя</sub> , см <sup>2</sup>	g <sub>як</sub> , см	K <sub>кр</sub>	Розміри пакетів стержня							
					$\frac{g_1 \times h_1}{g_9 \times h_9}$	$\frac{g_2 \times h_2}{g_{10} \times h_{10}}$	$\frac{g_3 \times h_3}{g_{11} \times h_{11}}$	$\frac{g_4 \times h_4}{g_{12} \times h_{12}}$	$\frac{g_5 \times h_5}{g_{13} \times h_{13}}$	$\frac{g_6 \times h_6}{g_{14} \times h_{14}}$	$\frac{g_7 \times h_7}{g_{15} \times h_{15}}$	$\frac{g_8 \times h_8}{g_{16} \times h_{16}}$
36	929,2	944,8	19,5	0,913	$\frac{35 \times 4,2}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{32,5 \times 3,5}{}$	$\frac{29,5 \times 2,6}{}$	$\frac{27 \times 1,6}{}$	$\frac{25 \times 1,0}{}$	$\frac{23 \times 0,9}{}$	$\frac{19,5 \times 1,3}{}$	$\frac{15,5 \times 0,9}{}$
38	1035,8	1063,4	21,5	0,913	$\frac{36,8 \times 4,7}{13,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 2,7}{}$	$\frac{32,5 \times 2,4}{}$	$\frac{31 \times 1,2}{}$	$\frac{29,5 \times 1,0}{}$	$\frac{25 \times 2,3}{}$	$\frac{21,5 \times 1,3}{}$	$\frac{15,5 \times 1,5}{}$
40	1155,6	1167,6	21,5	0,920	$\frac{39,5 \times 5,4}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 2,4}{17,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 1,8}{15,5 \times 0,4}$	$\frac{32,5 \times 2}{}$	$\frac{29,5 \times 1,9}{}$	$\frac{27 \times 1,2}{}$	$\frac{25,5 \times 0,9}{}$	$\frac{21,5 \times 1,2}{}$
42	1282,9	1315	25	0,926	$\frac{41 \times 4,6}{21,5 \times 1,2}$	$\frac{39,5 \times 3,8}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 1,7}{15,5 \times 0,9}$	$\frac{35 \times 1,5}{}$	$\frac{32,5 \times 1,7}{}$	$\frac{29,5 \times 1,6}{}$	$\frac{27 \times 1,2}{}$	$\frac{25 \times 0,7}{}$
45	1479,2	1500,2	25	0,930	$\frac{44 \times 4,7}{29,5 \times 0,7}$	$\frac{42,5 \times 2,7}{27 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,9}{25 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 2,3}{23 \times 0,6}$	$\frac{36,8 \times 1,9}{19,5 \times 0,6}$	$\frac{35 \times 1,2}{17,5 \times 0,8}$	$\frac{32,5 \times 1,4}{}$	$\frac{31 \times 0,8}{}$
48	1689	1718,8	27	0,933	$\frac{46,5 \times 5,9}{31 \times 0,7}$	$\frac{44 \times 3,7}{29,5 \times 0,6}$	$\frac{42,5 \times 1,5}{27 \times 0,9}$	$\frac{41 \times 1,4}{25 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 1,8}{21,5 \times 0,9}$	$\frac{36,8 \times 1,0}{17,5 \times 0,9}$	$\frac{35 \times 1,0}{}$	$\frac{32,5 \times 1,2}{}$
50	1816,4	1843,9	27	0,925	$\frac{48,5 \times 6,1}{32,5 \times 1,2}$	$\frac{46,5 \times 3,1}{29,5 \times 1,2}$	$\frac{44 \times 2,7}{27 \times 0,9}$	$\frac{42,5 \times 1,3}{25 \times 0,6}$	$\frac{41 \times 1,1}{21,5 \times 0,9}$	$\frac{38,5 \times 1,6}{17,5 \times 0,8}$	$\frac{36,8 \times 1,0}{}$	$\frac{35 \times 0,2}{}$
53	2044	2077,8	29,5	0,927	$\frac{52 \times 5,1}{36,8 \times 0,8}$	$\frac{50,5 \times 2,9}{35 \times 0,9}$	$\frac{48,5 \times 2,7}{32,5 \times 1,0}$	$\frac{46,5 \times 2}{29,5 \times 1,1}$	$\frac{44 \times 2,1}{27 \times 0,8}$	$\frac{42,5 \times 1,0}{29 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,0}{19,5 \times 0,8}$	$\frac{38,5 \times 1,4}{}$
56	2286,2	2316,7	29,5	0,928	$\frac{54 \times 7,4}{36,8 \times 0,8}$	$\frac{52 \times 3,0}{35 \times 0,7}$	$\frac{50,5 \times 1,7}{32,5 \times 1,0}$	$\frac{48,5 \times 1,9}{29,5 \times 1,0}$	$\frac{46,5 \times 1,6}{27 \times 0,7}$	$\frac{44 \times 1,7}{23 \times 1,0}$	$\frac{41 \times 1,8}{19,5 \times 0,7}$	$\frac{38,5 \times 1,2}{}$
60	2639,4	2690,9	32,5	0,934	$\frac{58 \times 7,7}{41 \times 1,5}$	$\frac{56 \times 3,1}{38,5 \times 0,7}$	$\frac{54 \times 2,2}{36,8 \times 0,7}$	$\frac{52 \times 2,0}{35 \times 0,6}$	$\frac{50,5 \times 1,2}{32,5 \times 0,9}$	$\frac{48,5 \times 1,4}{29,5 \times 0,9}$	$\frac{46,5 \times 1,9}{25 \times 1,1}$	$\frac{44 \times 1,5}{19,5 \times 1,1}$



За заданої номінальної потужності і заданих напруг обмоток значення  $a$ ,  $a_p$ ,  $K_p$ ,  $B_c$ ,  $K_c$  залишаються практично постійними, внаслідок чого праву частину (1.8) можна назвати трансформаторною сталою  $C_m$ .

Тоді основні розміри трансформатора можна пов'язати співвідношенням

$$l = \frac{C_m}{d^3}, \quad (1.9)$$

Звідси, кожний трансформатор можна спроектувати на різних значеннях діаметра стержня, отримуючи в цьому випадку різні висоти обмоток. Водночас будуть змінюватись співвідношення між витратами сталі магнітопроводу і проводу обмоток та вартість активної частини. За деякого значенні  $d$  ця вартість буде мінімальною, Саме цей варіант і потрібно вибирати 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 потрібно брати з табл. 1.3.

Таблиця 1.3 – Рекомендовані значення нормалізованих діаметрів стержнів магнітопроводів трансформаторів, см

$S_n$ , 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

### 1.3 Вартість активної частини трансформатора

Загальний вираз для вартості активної частини має такий вигляд:

$$C_{ac} = K_{cm} \cdot K_{omx} \cdot C_{cm} \cdot G_{cm} + K_o \cdot C_o \cdot K_{ip} \cdot G_o, \quad (1.10)$$

де  $G_{cm}$  – маса сталі магнітопроводу, ( $G_{cm} = G_c + G_y$ );

$G_c$  – маса сталі стержнів, ( $G_c = \frac{A_1}{d} + A_2 \cdot d^2$ );

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

$G_o$  – маса проводу обмоток, ( $G_o = \frac{c_1}{d^2}$ ).

Як видно з наведених виразів,  $G_{cm}$ ,  $G_c$ ,  $G_y$ ,  $G_o$ , і  $G_{ac}$  – змінні величини, які залежать від  $d$ .

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

$$A_l = C_m \cdot B_s, \quad (1.11)$$

при чому:

$$B_s = 0,018 \cdot K_c, \quad (1.12)$$

$$K_c = K_{kp} \cdot K_3, \quad (1.13)$$

$$K_{kp} = \frac{1}{8} \cdot (K_{kp1} + K_{kp2} + \dots + K_{kp8}), \quad (1.14)$$

де  $K_{kp1}$ ,  $K_{kp2}$ , ... – значення коефіцієнтів (див. табл. 1.2) для рекомендованих в табл. 1.3 нормалізованих діаметрів перерізу стержня магнітопроводу трансформатора заданої потужності.

Коефіцієнт  $a$ , що входить в (1.8), для трансформаторів з мідними обмотками потужністю до 630 кВА включно за напруг обмотки ВН 3, 6 і 10 кВ необхідно брати 1,36, а за напруг 20 і 35 кВ – 1,38...1,4; за потужності 1000...6300 кВА та напруг 6 і 10 кВ – 1,38, а за напруг 20 і 35 кВ – 1,4; за потужності 10000 кВА і більше та напруги обмотки ВН 35 кВ – 1,4; для трансформаторів з алюмінієвими обмотками рекомендовані значення  $a$  збільшуються в **1,06** раза.

Радіальні розміри обмоток:

$$\frac{a_1 + a_2}{3} = 0,76 \cdot K_s \sqrt[4]{S_n}, \quad (1.15)$$

де  $K_s$  – коефіцієнт, який для мідних обмоток попередньо може бути знайденим з табл. 1.4.

Таблиця 1.4 – Наближені діапазони значень коефіцієнта  $K_s$

$S_n$ , 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 радіа-

льні 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  $S_n = 160$  кВА, а  $K_{smin} = 0,58$  –  $S_n = 630$  кВА). Розрахунок виконується для усього діапазону  $K_s = 0,58...0,65$  з кроком  $\Delta K_s = 3...7$ :

$$\Delta K_s = \frac{K_{smax} - K_{smin}}{5}, \quad (1.16)$$

$$\Delta K_s = \frac{0,65 - 0,58}{5} = 0,014.$$

Як початковий оптимальний варіант потрібно брати таке значення  $K_s$ , яке найближче до заданої потужності  $S_n$ ; наприклад, якщо  $S_n = 400$  кВА, то  $K_{sonm} \approx 0,61$ .

Коефіцієнт Роговського в попередньому розрахунку необхідно 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  $S_n = 25...100$  кВА – 1,55...1,6 Тл;
- для  $S_n = 160$  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. 1.5.

Таблиця 1.5 – Ізоляційні відстані між обмотками; обмотками та магнітопроводом

$S_n$ , кВА	$U_{вин}$ НН, кВ	$a_{01}$ , см	$S_n$ , кВА	$U_{вин}$ ВН, кВ	$a_{12}$ , см	$a_{22}$ , см	$l'_0$ , 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	$\geq 630$	45	2,0	1,8	5,0
2500...6300	18;25;35	1,75	$\geq 630$	55	2,0	2,0	5,0
$\geq 630$	45	2,0	63...630	85	2,7(3,0)	2,0	7,5
$\geq 630$	55	2,3	1000...6300	85	2,7(3,0)	3,0	7,5
			$\geq 10000$	85	3,0	3,0	8,0

**Примітки.**

1. В трансформаторах потужністю 400...630 кВА за  $U_{винНН} = 5$  кВ  $a_{01} = 1,5$  см вибирається у випадку застосування на стороні НН гвинтової

обмотки. Ця обмотка використовується на стороні НН у випадку струмів, більших 600 А у разі алюмінієвого проводу і 800 А – у разі мідного.

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

3. В трансформаторах потужністю:

- до 1000 кВА брати  $l''_0 = l'_0$ ;
- 1000...6300 кВА –  $l''_0 = l'_0 + 4,5$ ;
- більше 6300 кВА –  $l''_0 = l'_0 + 6$ .

Середня ізоляційна відстань між обмотками та магнітопроводом по висоті:

$$l_0 = \frac{l'_0 + l''_0}{2}. \quad (1.17)$$

Під час введення даних для визначення оптимального варіанта з допомогою програми розрахунку параметрів трансформатора потрібно встановлювати значення  $N_0 = 2460$  для мідних обмоток, а для алюмінієвих –  $N_0 = 1200$ .

Значення коефіцієнта додаткових втрат  $K_\delta$  в попередньому розрахунку можна взяти з табл. 1.6.

Таблиця 1.6 – Коефіцієнти додаткових втрат в попередньому розрахунку

$S_n$ , кВА	25...100	160...630	1000...6300	10000...16000
$K_\delta$	1,03	1,04...1,08	1,1...1,11	1,11...1,15

Коефіцієнт  $K_{\text{отх}} = 1,055$  враховує вартість відходів в процесі розкороу 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  $K_o$ ,  $C_o$ ,  $K_{ct}$ ,  $C_{ct}$  знаходять з табл. 1.7.

Внаслідок обчислення введених за допомогою ORTR даних знаходять оптимальний варіант трансформатора для декількох вибраних значень коефіцієнта  $K_s$  і для заданих марок сталей та товщин 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 у випадку короткого замикання не мають перевищувати допустимих значень).

### 1.4 Втрати і струм холостого ходу

Для знайденого значення оптимального діаметра для кожного значення  $K_s$  і для кожної марки сталі програма ORTR має розрахувати втрати й струм холостого ходу трансформатора.

Коефіцієнти перерахунку вартості елементів активної частини наведено в табл. 1.7.

Таблиця 1.7 – Коефіцієнти перерахунку вартості елементів активної частини

$S_n$ , кВА	$U_{2лн}$ , кВ	Мідний провід марки ПБ		Алюмінієвий 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	
		$C_o$ , г/кг	$K_o$	$C_o$ , г/кг	$K_o$	$C_{cm}$ , г/кг	$K_{cm}$	$C_{cm}$ , г/кг	$K_{cm}$	$C_{cm}$ , г/кг	$K_{cm}$	$C_{cm}$ , г/кг	$K_{cm}$
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.**  $C_o$  і  $C_{cm}$  – вартість 1 кг відповідно обмотувального проводу і трансформаторної сталі;  $K_o$  – коефіцієнт, який враховує вартість виготовлення обмоток з урахуванням вартості ізоляційних матеріалів;  $J = 1...4$  – шифр марок сталей у програмі розрахунку;  $K_{cm}$  – коефіцієнт, який враховує вартість виготовлення магнітопроводу, включно й вартість закріплювальних та інших матеріалів.

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

$$P_0 = K_{n0} \cdot \left( P_c \cdot (G_c + 0,5 \cdot K_{yn} \cdot G_y) + P_y \cdot (G_y + 0,5 \cdot K_{yn} \cdot G_c) \right), \quad (1.18)$$

$$Q_0 = Q_5 + Q_6, \quad (1.19)$$

де

$$Q_5 = K_{m0} \cdot \left( q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y + 0,5 \cdot K_{yn} \cdot K_{mnl} \cdot G_y \cdot (q_c + q_y) \right),$$

$$Q_6 = K'_{\text{мд}} \cdot P_c \cdot (n'_3 q'_3 + n''_3 q''_3),$$

$$i_0 = \frac{Q_0}{10S_n}. \quad (1.20)$$

Принцип розрахунку  $P_0$  і  $Q_0$  полягає у такому: для кожної марки сталі за різних значень 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 за одного значення потоку у них будуть відрізнятися індукції, внаслідок чого  $P_0$  і  $Q_0$  розраховуються окремо для стержнів і ярем. У місцях стиків (зазорів) між листками потік проходить по повітрю, в процесі проходження витрачається реактивна потужність (складова  $Q_6$ ), для розрахунку якої також задаються питомі намагнічувальні потужності, що припадають на одиницю площі зазору (ВА/см<sup>2</sup>). Перемножуючи їх на загальну площу зазорів і їх кількість, можна отримати значення  $Q_6$ .

Величини, що входять в (1.18) – (1.20), 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. Значення  $P_c$  і  $q_c$  визначають згідно з вибраним раніше значенням 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 [6]. У вихідних даних до розрахунку в програмі ORTR кожний варіант зашифровано змінною  $T$ . Закладається розрахунок трьох варіантів стиків:

- а)  $T=1$  – усі стики прямі ( $n''_3 = 7$ ,  $n'_3 = 0$ );
- б) )  $T=2$  – прямі стики в середньому стержні ( $n''_3 = 3$ ) і косі – у двох крайніх ( $n'_3 = 4$ );
- в)  $T=3$  – усі стики косі ( $n'_3 = 6$ ,  $n''_3 = 0$ ).

Розрахунок починається з першого варіанта як найпростішого у виробництві.

Для кожної марки сталі в табл.1.8 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, за  $B_c = 1,56$  Тл та в зоні косих стиків

$$B_c = 1,56 / \sqrt{2} \approx 1,1 \text{ Тл,}$$

відповідно індукція в ярмі становитиме:

$$B_{\text{я}} = B_{\text{с}} / K_{\text{я}} = 1,56 / 1,015 \approx 1,54 \text{ Тл.}$$

Зразок вибору потужностей для вказаних значень індукції наведено в табл. 1.8.

Таблиця 1.8 – Визначення втрат та намагнічувальних потужностей

Параметр вибору	Потужності	Тип сталі			
		$J = 1$	$J = 2$	$J = 3$	$J = 4$
$B_{\text{с}}$	$P_{\text{с}}, \text{Вт/кг}$	1,207	1,150	1,150	1,074
$B_{\text{с}}$	$q_{\text{с}}, \text{ВА/кг}$	1,575	1,447	1,511	1,383
$B_{\text{с}} / \sqrt{2}$	$q_{\text{с}}', \text{ВА/см}^2$	0,220	0,200	0,220	0,200
$B_{\text{с}}$	$q_{\text{с}}'', \text{ВА/см}^2$	2,070	1,680	2,070	1,680
$B_{\text{я}}$	$P_{\text{я}}, \text{Вт/кг}$	1,168	1,110	1,110	1,038
$B_{\text{я}}$	$q_{\text{я}}, \text{ВА/кг}$	1,486	1,376	1,431	1,321

Питомі втрати і намагнічувальні потужності сталі трансформатора наведено в табл. 1.9.

В кутових частинах магнітопроводу у місцях стиків стержнів і ярем (всього їх шість) магнітний потік направлений під кутом до напрямку прокатки сталі, що викликає збільшення втрат і намагнічувальної потужності. Ця обставина враховується коефіцієнтами  $K_{\text{yn}}$  і  $K_{\text{ym}}$  (табл. 1.10).

Таблиця 1.9 – Питомі втрати і намагнічувальні потужності сталі трансформатора

B, Тл	$P_c (P_\alpha)$ , Вт/кг			$q_c (q_\alpha)$ , ВА/кг				$q_\Sigma$ , ВА/см <sup>2</sup>		$P_\Sigma$ , Вт/см <sup>2</sup>
	3404 0,35мм	3404; 0,3 мм 3405; 0,35 мм	3405 0,3 мм	3404 0,35 мм	3405 0,35 мм	3404 0,3 мм	3405 0,3 мм	3404	3405	
	J=1	J=2;3	J=4	J=1	J=2	J=3	J=4	Шихтовка по 2 пластини		
0,8	0,32	0,300	0,280	0,375	0,366	0,371	0,362	0,028	0,028	0,0215
1,0	0,475	0,45	0,425	0,548	0,533	0,540	0,525	0,100	0,090	0,0345
1,1	0,575	0,544	0,513	0,650	0,632	0,640	0,624	0,220	0,200	0,0416
1,2	0,675	0,635	0,610	0,752	0,732	0,742	0,722	0,400	0,370	0,0515
1,22	0,697	0,659	0,631	0,782	0,758	0,768	0,748	0,468	0,416	0,0536
1,24	0,719	0,683	0,652	0,811	0,783	0,793	0,773	0,536	0,462	0,0557
1,26	0,741	0,707	0,673	0,841	0,809	0,819	0,779	0,604	0,508	0,0578
1,28	0,763	0,731	0,694	0,870	0,834	0,844	0,824	0,672	0,554	0,0589
1,30	0,785	0,755	0,715	0,900	0,860	0,810	0,850	0,740	0,600	0,0620
1,32	0,814	0,779	0,739	0,932	0,892	0,904	0,880	0,820	0,664	0,0642
1,34	0,843	0,803	0,763	0,964	0,924	0,938	0,910	0,900	0,728	0,0664
1,36	0,872	0,827	0,787	0,996	0,956	0,972	0,940	0,980	0,792	0,0686
1,38	0,901	0,851	0,811	1,028	0,988	1,006	0,910	1,060	0,856	0,0708
1,40	0,930	0,875	0,835	1,060	1,020	1,040	1,000	1,140	0,920	0,0730
1,42	0,964	0,906	0,860	1,114	1,065	1,089	1,041	1,244	1,012	0,0754
1,44	0,998	0,937	0,889	1,168	1,110	1,139	1,082	1,348	1,104	0,0778
1,46	1,032	0,968	0,916	1,222	1,156	1,188	1,123	1,452	1,196	0,0802
1,48	1,066	0,999	0,943	1,276	1,210	1,238	1,161	1,556	1,288	0,0826
1,50	1,100	1,030	0,970	1,330	1,246	1,289	1,205	1,660	1,380	0,0850



Продовження таблиці 1.9

В, Тл	$P_c (P_я), \text{Вт/кг}$			$q_c (q_я), \text{ВА/кг}$				$q_з, \text{ВА/см}^2$		$P_з, \text{Вт/см}^2$
	3404 0,35мм	3404; 0,3 мм 3405; 0,35 мм	3405 0,3 мм	3404 0,35 мм	3405 0,35 мм	3404 0,3 мм	3405 0,3 мм	3404 $J=1; 3$	3405 $J=2; 4$	
	$J=1$	$J=2;3$	$J=4$	$J=1$	$J=2$	$J=3$	$J=4$	Шихтовка по 2 пластини		
1,52	1,134	1,070	1,004	1,408	1,311	1,360	1,263	1,796	1,476	0,0878
1,54	1,168	1,110	1,038	1,486	1,376	1,431	1,321	1,932	1,572	0,0906
1,56	1,207	1,150	1,074	1,575	1,447	1,511	1,383	2,070	1,680	0,0934
1,58	1,251	1,190	1,112	1,675	1,524	1,600	1,449	2,210	1,800	0,0962
1,60	1,295	1,230	1,150	1,775	1,602	1,688	1,526	2,350	1,920	0,0990
1,62	1,353	1,278	1,194	1,958	1,748	1,850	1,645	2,510	2,048	0,1017
1,64	1,411	1,326	1,238	2,131	1,894	2,012	1,775	2,670	2,176	0,1044
1,66	1,472	1,380	1,288	2,556	2,123	2,289	1,956	2,860	2,316	0,1071
1,68	1,536	1,440	1,344	3,028	2,435	2,681	2,188	3,080	2,468	0,1098
1,70	1,600	1,500	1,400	3,400	2,747	3,073	2,420	3,300	2,700	0,1125
1,72	1,672	1,560	1,460	4,480	3,547	4,013	3,080	3,540	2,852	0,1155
1,74	1,744	1,620	1,520	5,560	4,347	4,953	3,740	3,780	3,084	0,1185
1,76	1,824	1,692	1,588	7,180	5,551	6,364	4,736	4,080	3,300	0,1215
1,78	1,912	1,776	1,664	9,340	7,161	8,247	6,068	4,440	3,500	0,1245
1,80	2,000	1,860	1,740	11,500	8,770	10,130	7,400	4,800	3,700	0,1275

Таблиця 1.10 – Значення коефіцієнта збільшення втрат в стиках  $K_{yn}$

Значення $K_{yn}$ 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	<b>J = 1</b> (3404; 0,35 мм)
13,13	10,45	8,75	<b>J = 2</b> (3405; 0,35 мм)
13,13	10,45	8,75	<b>J = 3</b> (3404; 0,3 мм)
13,52	10,64	8,85	<b>J = 4</b> (3405; 0,3 мм)

Значення  $K_{yn}$  залежать від індукції  $B_c$  і типу стиків та для всіх марок сталей ( $J = 1..4$ ) можуть бути визначені за графіком на рис. 1.2, а) (вибирається за значенням магнітної індукції, найбільш наближеним до того, яке вказано на графіку).

Коефіцієнт  $K_{m,пл}$ , що враховує збільшення намагнічувальної потужності у кутах магнітної системи, залежить від індукції  $B_c$  і від ширини пластин другого пакета  $g_2$  (табл. 1.2). Його значення можна знайти за графіком на рис. 1.2, б).

У попередньому розрахунку, коли оптимальний діаметр стержня ще невідомий, величину  $g_2$  знаходять у табл. 1.2 для четвертого діаметра  $d_4$ , вказаного в табл. 1.3.

Коефіцієнт  $K_{нд}$  враховує збільшення втрат за рахунок різки листів сталі, зняття з них заусенець і пресування магнітної системи для пластин, які піддаються відпаленню після їх механічної обробки, внаслідок цих самих причин збільшується намагнічувальна потужність трансформатора, що враховується коефіцієнтами  $K_{md}$  та  $K'_{md}$ . Значення вказаних коефіцієнтів вибираються з табл. 1.11.

Таблиця 1.11 – Коефіцієнти збільшення втрат під час оброблення листів сталі

$S_n$ , кВА	до 250	400 – 630	1000 – 6300	$\geq 10000$
$K_{нд}$	1,12	1,13	1,15	1,2
$K_{md}$	1,27	1,27	1,28	1,38
$K'_{md}$	1,06	1,06	1,07	1,15

Для розрахованого оптимального діаметра мають виконуватись такі умови:

$$\begin{cases} P_0 \leq 1,075 \cdot P_{0зад} ; \\ i_0 \leq 1,15 \cdot i_{0зад} , \end{cases} \quad (1.21)$$

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

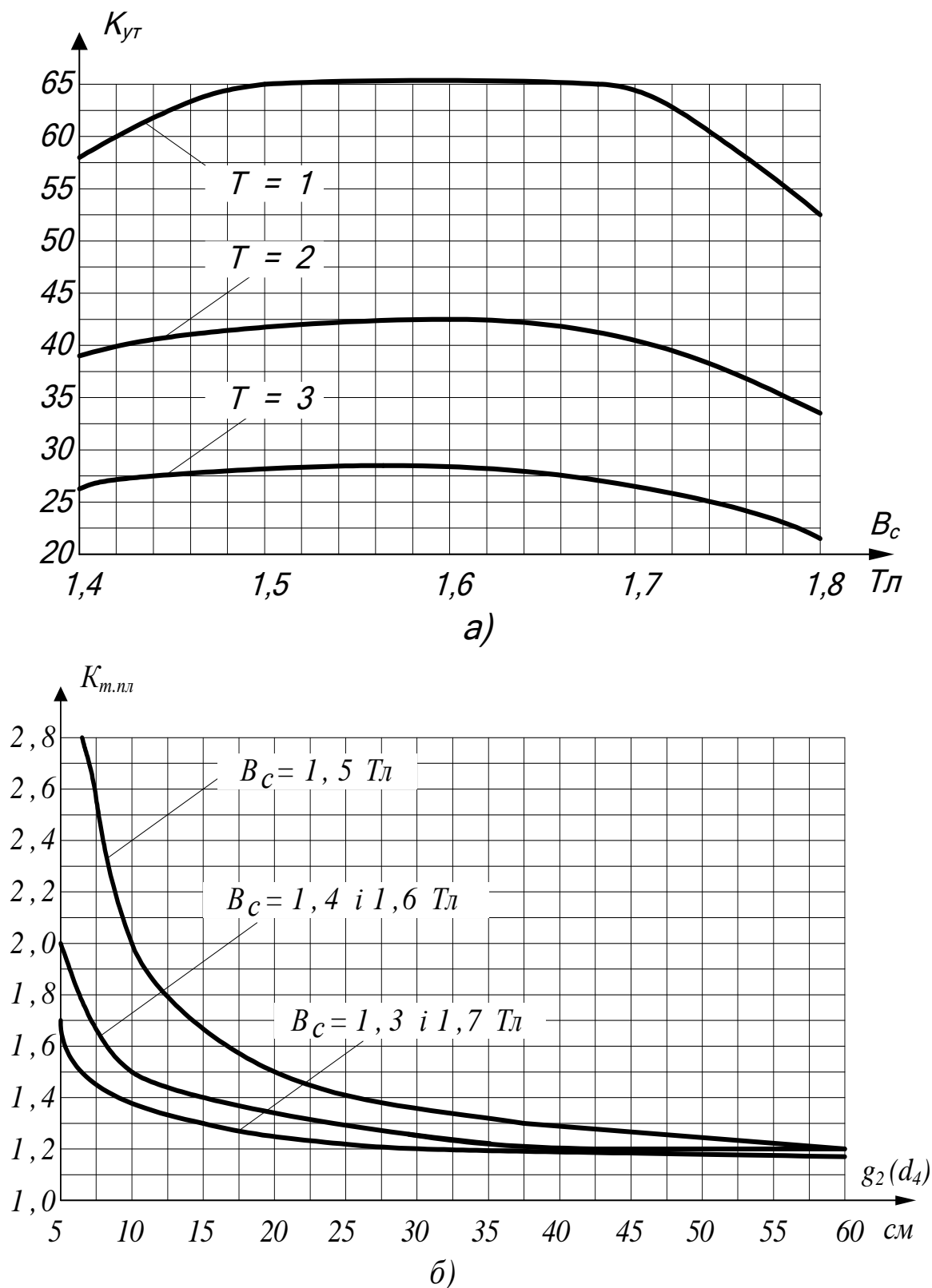


Рисунок 1.2 – Діаграми коефіцієнтів  $K_{ут}$  та  $K_{м.пл}$   
врахування збільшення втрат в сталі

### 1.5 Середня густина струму в обмотках

Розрахована для оптимального варіанту густина струму не має перевищувати допустиму, тобто

$$\Delta_{cp} \leq \Delta_{cp.\dot{d}on} \quad (1.22)$$

Для мідних обмоток  $\Delta_{cp.\dot{d}on} = 4,5 \text{ А/мм}^2$ , а для алюмінієвих  $\Delta_{cp.\dot{d}on} = 2,7 \text{ А/мм}^2$ . Коефіцієнт, що враховує умови приведення допустимих втрат короткого замикання до середнього розміру обмоток, обумовлених діаметром стержня  $d$ , вибирається таким, що дорівнює  $K_A = 0,645$  для мідних та  $K_A = 0,28$  для алюмінієвих обмоток.

### 1.6 Механічні напруженості у проводі обмоток

Обмотки трансформатора мають витримувати механічні сили, що виникають в них під час короткого замикання. У попередньому розрахунку враховуються тільки радіальні сили. Від цих сил у проводі обмоток виникають механічні напруги, які можна розрахувати таким чином:

$$\sigma_p = K_\sigma \cdot M \cdot d^3, \quad (1.23)$$

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, Н·м.

Для оптимального варіанта має виконуватись умова:

$$\sigma_p \leq \sigma_{p.\dot{d}on}, \quad (1.24)$$

де  $\sigma_{p.\dot{d}on} = 60 \text{ МПа}$  – для мідного проводу і  $\sigma_{p.\dot{d}on} = 25 \text{ МПа}$  – для алюмінієвого.

### 1.7 Послідовність визначення оптимального варіанту

Для визначення розрахункового варіанта трансформатора з оптимальними густиною струму, діаметром стержнів магнітопроводу та висотою обмотки використовується прикладна програма під назвою ORTR (рис. 1.3).

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.

Прізвище, ім'я та група студента

Сн	Рк	Uк	Рo	іo	F	Uка	Uкр	Вс
					50			
а	а01	а12	а22	L0	Ks	KSmin	KSmax	DKs
Кс	d1	d2	d3	d4	d5	d6	d7	d8
Кр	Кя	Кд	No	Кip	Кo	Со	Котх	Клд
0.95	1.015						1.055	
Ктд	Ктд'	Ктпл	Kdel	Ksig	Dcd		Spd	
					x10(-5)			

	J=1	J=2	J=3	J=4		T=1	T=2	T=3	
Сст					Вс	J=1	12.74	10.18	8.58
Кст					Вс*Кя	J=2	13.13	10.45	8.75
Рс					Вс	J=3	13.13	10.45	8.75
Ря					Вс*Кя	J=4	13.52	10.64	8.85
Qс					Вс / √2	Кут			
Qя					Вс				
Qz'									
Qz''									

Розрахунок

© VNTU EMSAPT (levitskiy@vntu.edu.ua)

Рисунок 1.3 – Інтерфейс прикладної програми ORTR

Першим етапом проектування є підготовка даних до введення в програму ORTR та отримання вихідних даних до подальшого розрахунку. Підготовка даних до введення в програму попереднього розрахунку полягає в заповненні таблиці, яка має форму, наведену в табл. 1.12.

Рекомендації щодо заповнення даних в прикладній програмі ORTR наведено в додатку В.

Складені вихідні дані підлягають перевірці керівником курсового проекту. Після затвердження даних їх потрібно ввести в прикладній програмі ORTR та натиснути кнопку «Розрахунок». Буде сформований txt-файл у тій самій директорії, де знаходиться програма ORTR. Зауважимо, що під час введення чисел потрібно використовувати крапку, а не кому.

Таблиця 1.12 – Дані розрахунку трансформатора в ORTR

Прізвище, ім'я, по-батькові, група, варіант завдання								
$S_{ном},$ кВА	$P_{к},$ ВТ	$u_{к},$ %	$P_0,$ ВТ	$i_0,$ %	$u_{ка},$ %	$u_{кp},$ %	$B_c,$ ТЛ	
$a$	$a_{01}$	$a_{12}$	$a_{22}$	$I_0$	$K_s$	$K_{smin}$	$K_{smax}$	$\Delta K_s$
$K_c$	$d_1,$ см	$d_2,$ см	$d_3,$ см	$d_4,$ см	$d_5,$ см	$d_6,$ см	$d_7,$ см	$d_8,$ см
$K_p$	$K_{я}$	$K_{\delta}$	$N_0$	$K_{ip}$	$K_o$	$C_o$	$K_{omx}$	$K_{нд}$
$K_{m\delta}$	$K'_{m\delta}$	$K_{m.пл}$	$K_{\Delta}$	$K_{\sigma}$	$\Delta_{cp.\delta on}$	$\sigma_{p.\delta on}$		
/-/	$J = 1$	$J = 2$	$J = 3$	$J = 4$				
$C_{cm}$								
$K_{cm}$								
$P_c$								
$P_{я}$								
$Q_c$								
$Q_{я}$								
$q'_z$								
$q''_z$								
/-/	$T = 1$	$T = 2$	$T = 3$					
$K_{yn}$ ( $J=1$ )								
$K_{yn}$ ( $J=2$ )								
$K_{yn}$ ( $J=3$ )								
$K_{yn}$ ( $J=4$ )								
$K_{yn}$								

### 1.8 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:

$$K_s = 0,554$$

Марка сталі  $J = 1$  3404  $\delta = 0.35$  мм

Тип стиків  $T = 3$  прямих - 0, косих - 6  
 Діаметр стержня  $D = 34$  см  
 Довжина обмотки  $L = 61,48$  см  
 Густина струму  $\Delta = 3,482$  А/мм<sup>2</sup>  
 $A_5=10,045$ ;  $A_6=5,348$ ;  $P_4=808,956$ ;  $U_3=29,392$ ;  
 $L=63,59$ ;  $G_1=1406,81$ ;  $G_2=1943,871$ ;  $G_3=175,238$ ;  
 $G=3350,681$ ;  $G_0=1035,591$ ;  $C=5915,635$ ;  $P_0=6060,935$ ;  
 $Q_0=21056,14$ ;  $F_0=0,526$ ;  $W=49,299$

Результати друкуються для діапазону  $K_s$  від  $K_{smin}$  до  $K_{smax}$  з кроком  $\Delta K_s$ . Для подальшого розрахунку потрібно вибрати варіант для такого значення  $K_s$ , яке відповідає заданій потужності трансформатора, матеріалу обмоток, для чого потрібно скористатись табл. 1.13.

Таблиця 1.13 – Значення оптимального коефіцієнта  $K_s$

$S_n$ , кВА	<i>Al</i>		<i>Cu</i>	
	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

В тому разі, якщо табличне значення  $K_s$  для трансформатора відрізняється від розрахункових, бажано брати варіант зі значенням  $K_s$  найближчим більшим до табличного. Крім цього, необхідно перевіряти умови (1.21) – (1.24).

Додаткові результати розрахунку, що надаються у вигляді зашифрованих змінних:

$A_5$  – сума осьових розмірів обмоток ВН і НН, см –  $(a_1 + a_2)$ ;

$A_6$  – ширина каналу розсіювання між обмотками ВН і НН, см –  $a_p$ ;

$P_4$  – переріз стержня, см<sup>2</sup> –  $P_c$ ;

$U_3$  – напруга одного витка, В –  $u_6$ ;

- 
- $L$  – відстань між стержнями, см;  
 $G1$  – маса стержнів, кг –  $G_c$ ;  
 $G2$  – маса ярем, кг –  $G_{я}$ ;  
 $G3$  – 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 –  $Q_0$ ;  
 $W$  – механічна напруженість в обмотках при короткому замиканні,  
МПа –  $\sigma_p$ .



## 2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК

Перевірочний розрахунок виконується для знайденого за допомогою математичного пакета прикладних програм MathCad оптимального діаметра стержня  $d_{onm}$  (далі просто  $d$ ) і відповідних йому висоти обмоток  $l$ , марки сталі  $J_{onm}$ , типу стиків  $T_{onm}$  і середньої густини струму  $\Delta_{cp}$ . Усі інші величини уточнюються в процесі розрахунку, але вони не мають суттєво відрізнятися від відповідних величин, знайдених у попередньому розрахунку за допомогою ORTR.

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

### 2.1 Вибір типу обмоток

Тип обмотки може бути вибраний за її номінальним значенням 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 за фазного струму до 800 А для мідного проводу і до 600 А – для алюмінієвого проводу та за напруг 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 у разі короткого замикання. Це обумовило її застосування на стороні НН 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 за напруг 10...35 кВ включно. Вона може використовуватись тільки у разі з'єднання обмотки ВН в зірку та за струму у ній до 65 А, що обмежується використанням для регулювання напруги перемикачем. На стороні НН ця обмотка може застосовуватись за напруг 3 кВ і більше та струму 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 та порівняння їх між собою;

г) *неперервна спіральна (катушкова) 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, якщо фазний струм перевищує 65 А за будь-якої схе-

ми її з'єднання і за напруг 3 кВ і більше. На стороні НН вона застосовується в трансформаторах потужністю більше 1000 кВА і за напруг 3, 6 і 10 кВ.

## 2.2 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 самих груп. Обмотка може складатись з одної, двох чи декількох десятків котушок.

Активний переріз стержня магнітопроводу:

$$P_c = P_{\phi c} \cdot K_3, \quad (2.1)$$

де  $P_{\phi c}$  – площа ступінчастої фігури стержня, відповідна діаметру  $d$  і визначається з табл. 1.2, см<sup>2</sup>;

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

Напруга (ЕРС) одного витка:

$$u_e = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c \cdot 10^{-4}, \quad (2.2)$$

де  $B_c$  – робоча індукція у стержні, Тл;

Число витків обмотки НН:

$$w_1 = \frac{U_{1\phi н} \cdot 10^3}{u_e}. \quad (2.3)$$

Розраховане значення  $w_1$  округлюється до найближчого цілого числа. Потрібний переріз витка, мм<sup>2</sup>:

$$P_{1mp} = \frac{I_{1\phi н}}{\Delta_{1дон}}, \quad (2.4)$$

де  $\Delta_{1дон}$  – густина струму в обмотці НН, за якої будуть забезпечені задані у ній втрати за допустимого нагрівання ( $\Delta_{1дон} = 1,05 \cdot \Delta_{ср}$ , А/мм<sup>2</sup>).

Подальший розрахунок залежить від типу обраної обмотки, але для будь-якого типу у ній потрібно точно дотримати число витків  $w_1$ , а підібраний із стандартних проводів переріз витка та, відповідно, густина струму  $\Delta_1$  можуть відрізнятись від потрібних не більше ніж на  $\pm 5\%$ .

### 2.2.1 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. 2.1 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 самому 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. 2.1 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 їхній 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 для роботи трансформатора.

Кожний провідник має власну ізоляцію, одностороння товщина якої позначається  $\delta$  (рис. 2.1). Тоді осьовий і радіальний розміри проводів з урахуванням двосторонньої товщини ізоляції будуть:

$$\begin{cases} b' = b + 2\delta, \\ a' = a + 2\delta. \end{cases} \quad (2.5)$$

На рис. 2.1 показано виток, що складається з одного провідника. У цьому випадку висота витка  $h_{el} = b'$ . Справа зображено витки, що складаються з двох паралельних провідників ( $h_{el} = 2b'$ ), причому зверху показано розташування провідників у витку у разі намотки «навзнаки» ( $b' > a'$ ), а знизу – у випадку намотки «на ребро» ( $b' < a'$ ). Намотка «на ребро» допускається за умови  $1,3 < b'/a' < 3$ .

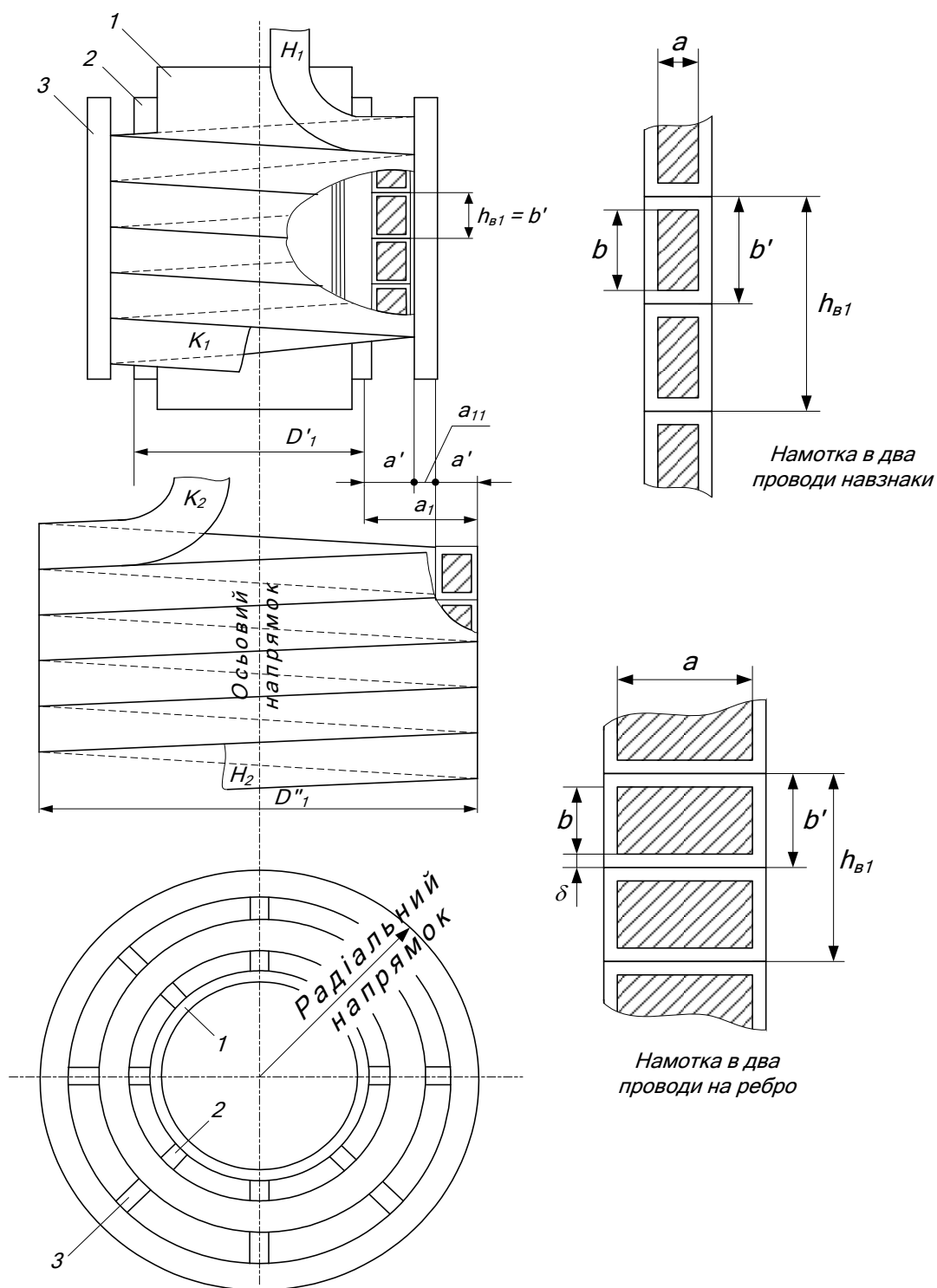


Рисунок 2.1 – Двошарова циліндрична обмотка

Для виготовлення обмотки застосовують мідний і алюмінієвий обмотувальні проводи марок ПБ і АПБ, які ізолювані стрічками кабельного паперу класу нагрівостійкості А ( $\theta_{дон} = 105^\circ\text{C}$ ) і відповідають вимогам ГОСТ 16512-80.

Розміри стандартних проводів наведено в табл. 2.1. У верхньому рядку

таблиці дано розміри в міліметрах одної сторони прямокутника, а у лівому і правому крайніх стовпцях – другої. На перетині розмірів сторін вказано поперечний переріз ( $\text{мм}^2$ ). Мідний провід має усі розміри, наведені в таблиці, за виключенням двох останніх рядків (17 і 18 мм). Алюмінієвий провід – усі розміри, подані в 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:

$$w_{u1} = \frac{w_1}{2}. \quad (2.6)$$

Потрібна висота витка для отримання обмотки висотою  $l$ , мм,

$$h_{\epsilon 1mp} = \frac{10 \cdot l}{w_{u1} + 1}. \quad (2.7)$$

В загальному випадку виток може складатись з  $n_{\epsilon l}$  паралельних проводів. Розрахунок потрібно починати з  $n_{\epsilon l} = 1$  як найпростішого варіанта обмотки. Якщо в цьому випадку не вдається підібрати один стандартний провід потрібної висоти та перерізу, то переходять до варіанта  $n_{\epsilon l} = 2$  і т. д.

Необхідний переріз обмотувального проводу становитиме:

$$\Pi_{np.mp} = \frac{\Pi_{1mp}}{n_{\epsilon l}}. \quad (2.8)$$


Необхідна висота проводу з ізоляцією:

$$b'_{mp} = \frac{h_{\epsilon 1mp}}{n_{\epsilon l}}, \quad (2.9)$$

Необхідна висота проводу без ізоляції:

$$b_{mp} = b'_{mp} - 2\delta. \quad (2.10)$$

Таблиця 2.1 – Розміри прямокутних обмотувальних 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	—	29,3	—	—	—	—
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	—	32,9	—	36,6	—	—
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	—	37,4	—	41,6	—	46,7
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	—	41,9	—	46,6	—	52,1
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	—	46,8	—	52,1	—	58,5
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	—	52,2	—	58,1	—	65,2
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	—	58,5	—	65,1	—	73,1
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	—	66,6	—	74,1	—	83,1
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	—	75,6	—	84,1	—	94,3
18	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	53,1	55,8	59,4	63	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9

Наприклад, нехай для мідної обмотки  $\Pi_{lmp} = 136 \text{ мм}^2$ ,  $h_{\epsilon lmp} = 18,3 \text{ мм}$ . За  $n_{\epsilon l} = 1$  маємо  $b_{mp} = 18,3 / 1 - 0,5 = 17,8 \text{ мм}$ . З табл. 2.1 видно, що стандартний мідний провід з таким розміром однієї сторони відсутній, тому переходимо до варіанта  $n_{\epsilon l} = 2$ :  $b_{mp} = 18,3/2 - 0,5 = 8,65 \text{ мм}$ . Найближчий до потрібного стандартний провід має осьовий розмір  $b_{mp} = 8,5 \text{ мм}$ . Найбільший можливий переріз цього проводу за  $a = 5,6 \text{ мм}$  становить  $\Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2$ . Для отримання  $\Pi_{lmp} = 136 \text{ мм}^2$  необхідно мати  $n_{\epsilon l} = 136 / 46,7 = 2,91$  проводів, водночас можна вкласти в цю висоту витка  $h_{\epsilon lmp}$  тільки два проводи висотою  $8,5 \text{ мм}$ . Відповідно, цей варіант не підходить, тому переходимо до наступного: за  $n_{\epsilon l} = 3$ ,  $b_{mp} = 18,3 / 3 - 0,5 = 5,6 \text{ мм}$ . Стандартний провід з таким розміром сторони існує (останнє значення верхнього рядка табл. 2.1) –  $b = b_{mp} = 5,6 \text{ мм}$ .

Потрібний переріз одного проводу за умови  $n_{\epsilon l} = 3$  проводів.

$$\Pi_{np,mp} = \frac{136}{3} = 45,3 \text{ мм}^2.$$

Якщо  $b = 5,6 \text{ мм}$ , то є провід з перерізами  $43,9$  та  $46,7 \text{ мм}^2$ . Необхідно вибрати найближчий до потрібного перерізу, але оскільки в такому випадку  $45,3$  лежить точно посередині між  $43,9$  та  $46,7$ , то вибираємо  $\Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2$ , щоб отримати менші густини струмів та значення втрат 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  $a/b = 8,5/5,6 = 1,52$ . Таким чином, остаточно вибираємо три паралельні проводи з розмірами  $b = 5,6 \text{ мм}$ ,  $a = 8,5 \text{ мм}$  та  $\Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2$ .

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

$$\text{провід ПБ (АПБ)} \quad n_{\epsilon l} \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \cdot \frac{8,5 \times 5,6}{9,0 \times 6,1}; \quad \Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2.$$

Враховуючи погіршену тепловіддачу у випадку намотки *на ребро*, має виконуватись умова:

– для міді:

$$a \leq \frac{7,5 \cdot q_{дон}}{107 \cdot \Delta_1^2}; \quad (2.11)$$

– для алюмінію:

$$a \leq \frac{7,5 \cdot q_{дон}}{172 \cdot \Delta_1^2}, \quad (2.12)$$

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

Дійсні значення висоти витка (мм) та його перерізу (мм<sup>2</sup>):

$$\begin{cases} h_{\text{e1}} = n_{\text{e1}} \cdot b', \\ \Pi_1 = n_{\text{e1}} \cdot \Pi_{\text{np}}. \end{cases} \quad (2.13)$$

Дійсна висота обмотки, см:

$$l_1 = 0,1 \cdot h_{\text{e1}} \cdot (w_{\text{ш1}} + 1) + 1, \quad (2.14)$$

де 1 (см) враховує технологічний допуск під час виготовлення обмотки.

Дійсна густина струму в обмотці, А/мм<sup>2</sup>:

$$\Delta_1 = \frac{I_{1\text{фн}}}{\Pi_1}. \quad (2.15)$$

Дійсна висота  $l_1$  та густина струму  $\Delta_1$  обмотки не мають відрізнятися від попередніх значень  $l$  (з розрахунку ORTR) та  $\Delta_{1\text{доп}}$  більше, ніж на  $\pm 5 \%$ .

В пояснювальній записці необхідно розрахувати та вказати величину цього відхилення.

$$\begin{cases} \delta_l = \frac{l - l_1}{l} \cdot 100\%, \\ \delta_{\Delta} = \frac{\Delta_{1\text{доп}} - \Delta_1}{\Delta_{1\text{доп}}} \cdot 100\%. \end{cases} \quad (2.16)$$

Радіальний розмір обмотки (див. рис. 2.1), см:

$$a_1 = 0,2 \cdot a' + a_{11}, \quad (2.17)$$

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

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

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}, \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (2.18)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки (всіх фаз), намотаної на рейки (обидва шари охолоджуються з обох сторін), м<sup>2</sup>:

$$\Pi_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot (D''_1 + D'_1) \cdot l_1 \cdot 10^{-4}, \quad (2.19)$$



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

### 2.2.2 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. 2.2). Всі паралельні проводи мають мати однакові розміри і намотування їх виконується навзаки, 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, утвореним прокладками із електрокартону, розташованими між ними в місцях розташування рейок.

У випадку більшої 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 за струму вище 2000...2500 А).

Оскільки паралельні проводи гвинтової обмотки мають різну довжину (внутрішні коротші зовнішніх), то їх опори також будуть різними, що являється 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 переключення (транспозиції) проводів внутрішніх у зовнішні і навпаки. З цією метою в процесі намотування обмотки розміщують у різних положеннях з таким розрахунком, щоб повна довжина всіх проводів була однаковою і кожен з них у сумі займав однакове положення відносно поля розсіювання трансформатора.

Так, в одноходовій обмотці робляться дві групові і одна загальна транспозиції. У разі групових транспозицій, які виконуються через  $\frac{1}{4}$  та  $\frac{3}{4}$  загальної кількості витків, половина внутрішніх проводів (два із чотирьох на рис. 2.2) міняються місцями з іншою половиною зовнішніх. У випадку загальної транспозиції, яка виконується всередині обмотки, кожен 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. Для  $n$  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. 2.2 показано приклад такої транспозиції для випадку 8-ми проводів (по чотири проводи у кожному з обходів). Під час кож-

ної транспозиції виконується кругове переміщення проводів у межах обох ходів. Після виконання всіх транспозицій проводи мають зайняти вихідне положення.

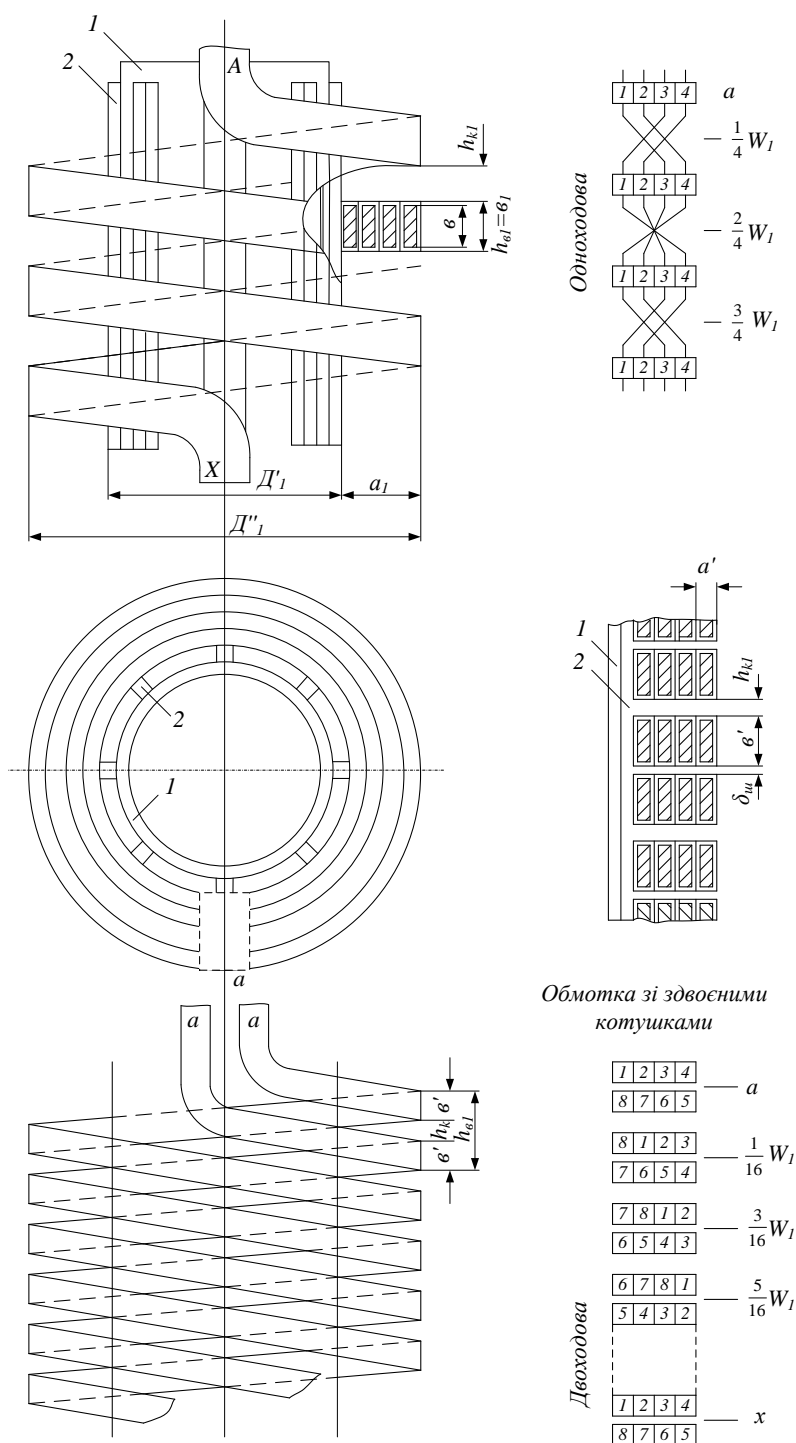


Рисунок 2.2 – Гвинтова обмотка

Розрахунок обмотки виконується у такій послідовності.  
Визначається потрібна висота витка для одноходової обмотки, мм:

$$h_{\epsilon 1mp} = \frac{10 \cdot l}{w_l + 4} - h_{\kappa 1}, \quad (2.20)$$

Для дво- та чотириходової обмотки, мм:

$$h_{\epsilon 1mp} = \frac{10 \cdot l}{w_l + 1} - h_{\kappa 1}, \quad (2.21)$$

де  $h_{\kappa 1} = 4 \dots 5$  мм – висота масляного каналу між котушками.

Спочатку розраховується  $h_{\epsilon 1mp}$  для одноходової обмотки. Якщо її значення буде меншим 16,5 мм для алюмінієвого проводу, то далі розраховується саме ця обмотка, а якщо більшим – розраховують  $h_{\epsilon 1mp}$  за (2.21). Якщо  $16,5 \text{ мм} \leq h_{\epsilon 1mp} \leq 38 \text{ мм}$  для міді і  $18,5 \text{ мм} \leq h_{\epsilon 1mp} \leq 42 \text{ мм}$  для алюмінію, то обмотка буде двоходовою, а якщо  $h_{\epsilon 1mp} > 38$  (42) мм – необхідно розраховувати чотириходову обмотку.

Потрібна висота проводу з ізоляцією (рис. 2.2), мм:

– для одноходової обмотки:

$$b'_{mp} = h_{\epsilon 1mp}; \quad (2.22)$$

– для двоходової обмотки:

$$b'_{mp} = 0,5(h_{\epsilon 1mp} - h_{\kappa 1}); \quad (2.23)$$

– для чотириходової обмотки:

$$b'_{mp} = 0,25(h_{\epsilon 1mp} - 3h_{\kappa 1}); \quad (2.24)$$

Потрібна висота проводу без ізоляції, мм:

$$b_{mp} = b'_{mp} - 0,5. \quad (2.25)$$

За табл. 2.1 підбирається стандартний провід з висотою  $b \approx b_{mp}$ .

Необхідний сумарний радіальний розмір всіх проводів, мм:

$$a_{\Sigma mp} = \frac{\Pi_{1mp}}{b}. \quad (2.26)$$

За тією самою таблицею 2.1 вибирається стандартний радіальний розмір одного проводу  $a$ , який має бути меншим його висоти  $b$ . Після цього обчислюється потрібна кількість паралельних проводів обмотки:

$$n_{\epsilon 1} = \frac{a_{\Sigma mp}}{a}. \quad (2.27)$$

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

– в одноходовій обмотці кількість паралельних проводів  $n_{\epsilon 1}$  має бути цілим числом або близьким до нього, в останньому випадку  $n_{\epsilon 1}$  округлю-

ється до найближчого цілого числа;

– у двоходовій обмотці  $n_{e1}$  має бути цілим та парним числом або округлюватися до нього;

– в чотириходовій обмотці  $n_{e1}$  має бути цілим і кратним 4 або заокруглюватися до нього.

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

Дійсні перерізи витка ( $\text{мм}^2$ ) та густина струму,  $\text{А/мм}^2$ :

$$\begin{cases} \Pi_1 = n_{e1} \cdot \Pi_{np}; \\ \Delta_1 = \frac{I_{1\phi n}}{\Pi_1}. \end{cases} \quad (2.28)$$

Для розрахованого перерізу проводу має виконуватися умова:

$$0,95 \cdot \Delta_{\text{доп}} \leq \Delta_1 \leq 1,05 \cdot \Delta_{\text{доп}}. \quad (2.29)$$

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

– для міді:

$$b \leq \frac{10 \cdot q_{\text{доп}}}{107 \cdot \Delta_1^2}; \quad (2.30)$$

— для алюмінію:

$$b \leq \frac{10 \cdot q_{\text{доп}}}{172 \cdot \Delta_1^2}, \quad (2.31)$$

де  $q_{\text{доп}}$  – допустима густина теплового потоку на поверхню обмотки (2.11, 2.12).

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

– для одноходової обмотки:

$$l_1 = 0,1 \cdot [b' \cdot (w_1 + 4) + k \cdot h_{\kappa 1} \cdot (w_1 + 3)]; \quad (2.32)$$

– двоходової обмотки:

$$l_1 = 0,1 \cdot [2b' \cdot (w_1 + 1) + k \cdot h_{\kappa 1} \cdot (2w_1 + 1)]; \quad (2.33)$$

– чотириходової обмотки:

$$l_1 = 0,1 \cdot [4b' \cdot (w_1 + 1) + k \cdot h_{\kappa 1} \cdot (4w_1 + 1)]; \quad (2.34)$$

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

Кінцева висота обмотки не може відрізнятись від її попереднього значення більше, ніж на  $\pm 5\%$ . Підгін під задану висоту може відбуватися змінною висоти каналу в заданих межах –  $h_{\kappa 1} = 4; 4,5; 5,0$  мм.

Радіальний розмір обмотки, см:

– одноходової:

$$a_1 = 0,1 \cdot n_{e1} \cdot a'; \quad (2.35)$$

– двоходової:

$$a_1 = \frac{0,1 \cdot a' \cdot n_{e1}}{2}; \quad (2.36)$$

- чотириходової:

$$a_1 = \frac{0,1 \cdot a' \cdot n_{e1}}{4}; \quad (2.37)$$

Внутрішній  $D'_1$  та зовнішній  $D''_1$  діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}, \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (2.38)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup>:

– для одноходової:

$$P_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^4; \quad (2.39)$$

– для двоходової:

$$P_{01} = 12 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^4; \quad (2.40)$$

-- для чотириходової:

$$P_{01} = 24 \cdot k \cdot \pi \cdot w_1 \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^4; \quad (2.41)$$

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

### 2.2.3 Багатошарова циліндрична обмотка

Ця обмотка намотується одним або двома паралельними проводами *круглого* перерізу або прямо на циліндр 1 (рис. 2.3, а), або на вертикальній рейці 2, розташованій між циліндром та витками обмотки.

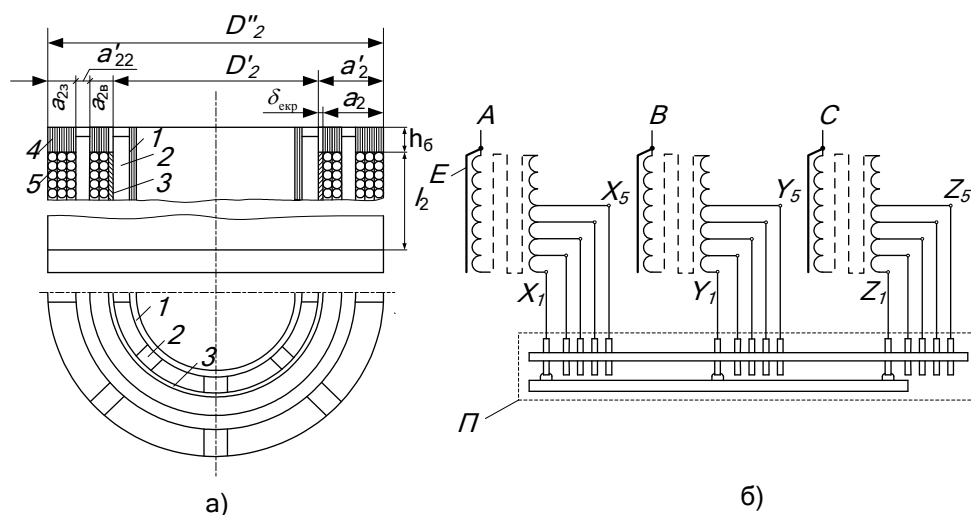


Рисунок 2.3 – Багатошарова циліндрична обмотка ВН  
(Е – екран, П – перемикач регулювальних відгалужень *анцапфа*)

Таблиця 2.2 – Діаметри та перерізи обмоткових проводів круглих перерізів

Діаметр проводу $d_{np}$ , мм	Переріз проводу $П_{np}$ , мм <sup>2</sup>	Діаметр проводу $d_{np}$ , мм	Переріз проводу $П_{np}$ , мм <sup>2</sup>	Діаметр проводу $d_{np}$ , мм	Переріз проводу $П_{np}$ , мм <sup>2</sup>
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

Розрахунок обмотки виконується в такій послідовності. *Висота обмотки вибирається такою, що дорівнює розрахунковій ( $l_1 = l$ )*. За потрібним перерізом витка  $П_{lmp}$  підбирається один ( $n_{el} = 1$ ) або два ( $n_{el} = 2$ ) стандартних круглих проводи з табл. 2.2. Вибрані розміри проводу записуються в такому вигляді:

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

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

Дійсні перерізи витка ( $\text{мм}^2$ ) та густина струму,  $\text{А/мм}^2$ :

$$\begin{cases} \Pi_1 = n_{\text{ел}} \cdot \Pi_{np}, \\ \Delta_1 = \frac{I_{1\phi n}}{\Pi_1}. \end{cases} \quad (2.42)$$

Дійсна густина струму може відрізнятись від  $\Delta_{1\text{дон}}$  не більше, ніж на  $\pm 5\%$ . У записці необхідно розрахувати це відхилення та вказати його значення (2.15).

Кількість витків у шарі:

$$w_{ш1} = \frac{l_1}{0,1 n_{\text{ел}} \cdot d'_{np}} - 1. \quad (2.43)$$

Кількість шарів обмотки:

$$n_{ш1} = \frac{w_1}{w_{ш1}}. \quad (2.44)$$

Отриману розрахункову кількість шарів заокруглити до більшого цілого числа.

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

$$a_1 = 0,1 \cdot d'_{np} \cdot n_{ш1} + 0,1 \delta_{ми} \cdot (n - 1) + a_{11}, \quad (2.45)$$

де  $\delta_{ми}$  – товщина міжшарової ізоляції, що вибирається з табл. 2.3 за робочою напругою двох шарів обмотки:  $U_{ми} = 2 \cdot w_{ш1} \cdot u_6$ ;

$a_{11}$  – ширина осьового каналу між внутрішньою  $a_{1в}$  та зовнішньою  $a_{1з}$  котушками, дорівнює 0,4...0,5 см у разі коли виконується умова  $l = l_1 < 30$  см; 0,5...0,6 см у разі виконання  $l_1 = 30...50$  см та 0,6...0,8 см у випадку, коли  $l_1 = 50...100$  см;  $h_6$  – висота бортика (рис. 2.3, а).

Таблиця 2.3 – Товщина між шарової ізоляції та висота бортика

$U_{ми}, \text{В}$	$\delta_{ми}, \text{мм}$	$h_6, \text{см}$
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

Кількість шарів внутрішньої котушки береться такою, що дорівнює половині загальної кількості шарів, округленою до більшого цілого числа:  
 $n_{u16} \approx 0,5 \cdot n_{u1}$ .

Радіальний розмір зовнішньої котушки, см:

$$a_1 = 0,1 \cdot (d'_{np} \cdot n_{u13} + \delta_{mu} \cdot (n_{u1} - 1)), \quad (2.46)$$

де  $n_{u13} = n_{u1} - n_{u16}$  – кількість шарів зовнішньої котушки.

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

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}; \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (2.47)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup>:

$$P_{01} = 3 \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot l_1 \cdot 10^{-4}, \quad (2.48)$$

де  $n = 2,0$  – кількість котушок в обмотці (внутрішня та зовнішня);

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

#### 2.2.4 Неперервна спіральна котушкова обмотка

Ця обмотка намотується одним або кількома (не більше п'яти) однаковими паралельними проводами прямокутного перерізу на вертикальні рейки 2 (рис. 2.4), розташовані між бакелітовим циліндром 1 та котушками обмотки.

На рис. 2.4 зображено обмотку, намотану по чотири витки в кожній котушці одним проводом, витки в котушці намотуються по спіралі один на оден, причому за звичайної намотки перший виток завжди знаходиться всередині, а останній – зовні.

Друга котушка намотується тим самим проводом і розташовується під першою та має бути з'єднана з нею послідовно. Між котушками має бути утворений канал  $h_k$ , розмір якого визначається сумою напруг двох котушок. За звичайної намотки 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.

Таким чином, кожний канал по висоті має збільшуватися на товщину проводу, внаслідок чого збільшиться і вся висота обмотки. Для усунення цього недоліку необхідно вилучити з'єднувальний провідник з каналу між котушками, здійснюючи перекладання 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 проводу, розвалюють її витки та здійснюють перекладання першого (внутрішнього) витка на місце останнього (зовнішнього), другого знизу – на місце другого зверху і т. д. Внаслідок такого перекладання початок котушки опиниться назовні, а кінець – всередині її за тих самих довжини проводу та розмірів котушки.



Потім провід перегинається (по ребру) і переходить по твірній циліндра в іншу котушку, котра намотується звичайним чином без перекладання. Витки третьої котушки знову перекладаються, внаслідок чого її початок опиняється назовні та перехід з другої в третю котушку здійснюється по зовнішній поверхні обмотки.

Таким чином, з'єднувальні провідники зникають з каналів між котушками, а їхню роль виконують внутрішні (ВП) та зовнішні (НП) переходи, здійснювані тим самим проводом (рис. 2.4, а).

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

На рис. 2.4, а) всі позначення дано для обмотки ВН, тобто мають індекс 2. Конструкція та принцип намотки обмоток НН та ВН однакові, тому цей рисунок відповідає і обмотці НН, лише головні геометричні розміри її будуть мати індекс 1.

Розрахунок обмотки здійснюється в такій послідовності.

З умови:

– для міді:

$$b = \frac{10 \cdot q_{don}}{107 \cdot \Delta_1^2}; \quad (2.49)$$

– для алюмінію:

$$b = \frac{10 \cdot q_{don}}{172 \cdot \Delta_1^2}, \quad (2.50)$$

де  $q_{don} = 1200 - 1400$  Вт/м<sup>2</sup> (2.30, 2.31), визначається гранично допустима висота проводу з врахуванням нормального тепловідводу з поверхні обмотки.

З табл. 2.1 підбирається стандартний провід з розміром,  $b$  меншим, але якомога ближчим до отриманого за (2.39) значення. Потім розраховують сумарний необхідний радіальний розмір проводу за вибраного осьового розміру, мм:

$$a_{\Sigma mp} = \frac{\Pi_{1mp}}{b}. \quad (2.51)$$

Розрахункова потрібна кількість паралельних провідників

$$n_{e1} = \frac{a_{\Sigma mp}}{a}, \quad (2.52)$$

де  $a$  – радіальний розмір стандартного проводу, що вибирається таким, щоб  $n_{e1}$  було цілим числом або якомога ближчим до цілого (не більшим 5). В останньому випадку значення  $n_{e1}$  заокруглюється до найближчого цілого. Крім того, має виконуватись умова  $a < b$ .

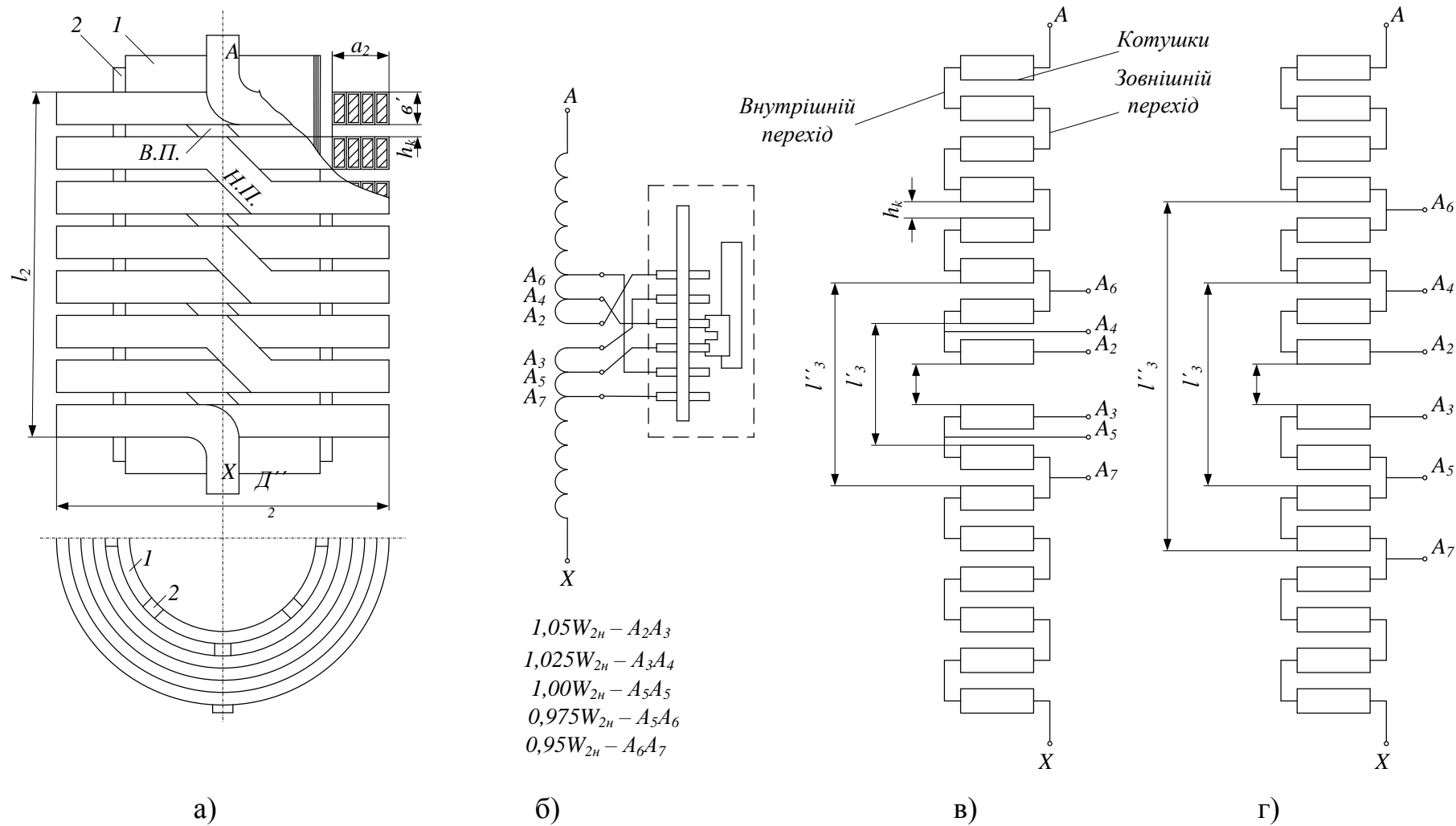


Рисунок 2.4 – Неперервна спіральна котушкова обмотка ВН

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

$$\text{провід ПБ (АПБ)} \quad n_{e1} \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \cdot \frac{5,6 \times 8,5}{6,1 \times 9,0}; \quad \Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2.$$

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

Дійсні перерізи витка (мм<sup>2</sup>) та густина струму, А/мм<sup>2</sup>:

$$\Pi_1 = n_{e1} \cdot \Pi_{np}, \quad (2.53)$$

$$\Delta_1 = \frac{I_{1\phi n}}{\Pi_1}. \quad (2.54)$$

Отримане значення густини струму не має відрізнятись від значення  $\Delta_{1\text{дон}}$  більше, ніж на  $\pm 5\%$ . Дійсне відхилення потрібно розрахувати та вказати в пояснювальній записці.

Кількість катушок обмотки:

$$n_{k1} = \frac{l + h_k}{0,1 \cdot b' + h_k}, \quad (2.55)$$

де  $h_k$  – висота каналу між катушками, значення якої вибирають кратним 0,05 см ( $h_k = 0,4 \dots 0,7$  см).

Отримане значення  $n_{k1}$  округлюють до ближчого більшого парного числа.

Середня кількість витків в катушці:

$$w_{k1cp} = \frac{w_1}{n_{k1}}. \quad (2.56)$$

Значення  $w_{k1cp}$  може вийти цілим або дробовим числом. Якщо воно ціле, то такі катушки легко виконуються технологічно і це означає, що така обмотка буде мати всі однакові катушки з кількістю витків  $w_{k1cp}$  кожна.

Якщо ж отримане значення  $w_{k1cp}$  – дробове число, то практичне виконання таких катушок залежить від дробової частини числа. Якщо обмотувальник достатньо просто може практично виконати цю дробову частину витка, тоді всі катушки також виконуються однаковими, але з дробовою кількістю витків. Практично легко виконуються такі дробові частини витків, знаменник дробу яких дорівнює кількості вертикальних рейок 2 (рис. 2.4, а), на які намотуються катушки обмотки. Відстань між двома сусідніми рейками – мінімальна дробова частина витка. Кількість цих рейок залежить від потужності трансформатора: за  $S_n \leq 100$  кВА їх кількість має дорівнювати 6; у разі потужностей  $S_n = 100 \dots 630$  кВА – 8 рейок; якщо  $S_n = 1000 \dots 1600$  кВА – 10 рейок; а у випадку  $S_n = 2500 \dots 16000$  кВА – 12–14 рейок.

Нехай отримано значення  $w_{клср} = 5,4$  у випадку дванадцяти рейок. Обмотчик може легко відраховувати наступні дробові частини витків –  $1/12, 2/12, 3/12$  і т. д. В прикладі дробова частина  $w_{клср}$  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  $w_1$  має бути виконано точно. Для цього доводиться виконувати два типи котушок, що відрізняються кількістю витків в них. Ця відмінність не може перевищувати одного витка. В котушці з меншою кількістю витків між витками вкладаються смужки 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:

$$\begin{cases} n'_{к1} + n''_{к1} = n_{к1}, \\ n'_{к1} \cdot w'_{к1} + n''_{к1} \cdot w''_{к1} = w_1. \end{cases} \quad (2.57)$$

Значення  $w'_{к1}$  та  $w''_{к1}$  беруть такими, що дорівнюють ближчим цілим числам відповідно зліва та справа від значення  $w_{клср}$ . Для розглянутого прикладу з  $w_{клср} = 5,4$  витків це число знаходиться між 5 та 6, тому беремо  $w'_{к1} = 5$ , а  $w''_{к1} = 6$  (можна брати  $w'_{к1} = 5 \frac{4}{12}$ ;  $w''_{к1} = 5 \frac{5}{12}$ ). Тоді в системі (2.57) залишаються два невідомих  $n'_{к1}$  та  $n''_{к1}$ , які легко знаходяться.

Виразивши  $n''_{к1} = n_{к1} - n'_{к1}$  та підставивши його у друге рівняння системи (2.57), отримаємо:

$$n'_{к1} = \frac{w_1 - n_{к1} \cdot w''_{к1}}{w'_{к1} - w''_{к1}}, \quad (2.58)$$

Взявши  $n_{к1} = 40$  котушок та кількість витків обмотки:  $w_1 = 5,4 \cdot 40 = 216$  витків, знайдемо:

$$n'_{к1} = \frac{216 - 40 \cdot 6}{5 - 6} = 24 \text{ котушки};$$

$$n''_{к1} = 40 - 24 = 16 \text{ котушок.}$$

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:

$$l_1 = 0,1 \cdot b' \cdot n_{к1} + h_k (n_{к1} - 1). \quad (2.59)$$

Значення  $l_1$  бажано якомога ближче підігнати до початкової величини  $l$  (з ORTR), що можна здійснити зміною значення  $h_k$  в межах рекомендованого діапазону (2.55).

Радіальний розмір обмотки, см:

$$a_1 = 0,1 \cdot n_{e1} \cdot a' \cdot w_{к1cp}. \quad (2.60)$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_1 = d + 2 \cdot a_{01}; \\ D''_1 = D'_1 + 2 \cdot a_1. \end{cases} \quad (2.61)$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup>:

$$П_{01} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot n_{к1} \cdot (D'_1 + a_1) \cdot (a_1 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, \quad (2.62)$$

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

### 2.3 Розрахунок обмотки високої напруги

В процесі вибору та розрахунку обмотки ВН потрібно 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 має мати відгалуження, що відповідають (1,05; 1,025; 1,0; 0,975; 0,95) від номінальної напруги.

Кількість витків обмотки, що відповідає номінальній напрузі:

$$w_{2н} = w_1 \cdot \frac{U_{2фн}}{U_{1фн}}. \quad (2.63)$$

Кількість витків, що відповідає одному ступеню регулювання ( $0,025 \cdot U_n$ ):

$$w_p = 0,025 w_{2н}. \quad (2.64)$$

Значення  $w_{2н}$  та  $w_p$  округляють до найближчих цілих чисел.

Кількість витків, що відповідають регулювальним відгалуженням:

$$\begin{cases} 1,025 \cdot U_n \rightarrow w_{2н} + w_p; \\ 1,05 \cdot U_n \rightarrow w_{2н} + w_p; \\ 1,0 \cdot U_n \rightarrow w_{2н}; \\ 0,975 \cdot U_n \rightarrow w_{2н} - w_p; \\ 0,95 \cdot U_n \rightarrow w_{2н} - 2 \cdot w_p. \end{cases} \quad (2.65)$$

Потрібний переріз витка обмотки:

$$I_{2mp} = \frac{I_{2\phi n}}{\Delta_{2\phi n}}, \quad (2.66)$$

де  $\Delta_{2\phi n}$  – допустима густина струму в обмотці ВН, за якої будуть забезпечені задані в ній втрати у разі допустимого нагрівання, А/мм<sup>2</sup> ( $\Delta_{2\phi n} = 0,95 \Delta_{cp}$ ).

### 2.3.1 Багат шарова циліндрична обмотка високої напруги

Конструкція та технологія намотки цієї обмотки нічим не відрізняється від відповідної обмотки НН (див. п. 2.2.3 та рис. 2.3). На відміну від попередньої (обмотки НН) багат шарова циліндрична обмотка ВН має мати регульовальні відгалуження, розташовані в кінці кожної фази, тобто поблизу нульової точки зірки. 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 металічній рейці перемикача П (див. рис. 2.3, 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. 2.3, 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 екрану становить 3 мм.

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

За потрібним перерізом витка  $I_{2mp}$  підбираються один або два стандартних круглих проводи з табл. 2.2, вибрані дані проводу записуються за прикладом:

$$\text{провід ПЕЛБО } n_{e1} \cdot \frac{d_{np}}{d'_{np}} = 1 \cdot \frac{0,80}{0,84}; I_{np} = 0,503 \text{ мм}^2,$$

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

Дійсні перерізи витка (мм<sup>2</sup>) та густина струму, А/мм<sup>2</sup>:

$$\begin{cases} I_2 = n_{e2} \cdot I_{np}; \\ \Delta_2 = \frac{I_{2\phi n}}{I_2}. \end{cases} \quad (2.67)$$

Дійсна густина струму може відрізнятися від  $\Delta_{2\phi n}$  не більше, ніж на  $\pm 5\%$ . Розраховується відхилення за формулою (2.15). У випадку, якщо під

час розрахунку характеристик короткого замикання (п. 2.4) 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 5 %.

Кількість витків в одному шарі обмотки:

$$w_{ш2} = \frac{l_2}{0,1 \cdot n_{\epsilon 2} \cdot d'_{np}} - 1, \quad (2.68)$$

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:

$$n_{ш2} = \frac{w_{2н} + 2 \cdot w_p}{w_{ш2}}. \quad (2.69)$$

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 виводу відгалуджень. З огляду на це має витримуватись умова (2.70), яку під час розрахунку необхідно перевірити.

$$0,1 \cdot w_{2н} \leq 2 \cdot w_{ш2}. \quad (2.70)$$

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

$$a'_2 = 0,1 \cdot d'_{np} \cdot n_{ш2} + 0,1 \cdot \delta_{ми} \cdot (n_{ш2} - 1) + a'_{22} + \delta_{екр}, \quad (2.71)$$

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

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

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

Значення  $\delta_{ми}$  та  $a'_{22}$  визначаються за рекомендаціями, наведеними в п. 2.2.3, але для  $U_{ми} = 2 \cdot w_{ш2} \cdot u_6$ .

Кількість шарів внутрішньої обмотки береться такою, що дорівнює  $n_{ш2\epsilon} = 0,2 \dots 0,3 \cdot n_{ш2}$  (округляється до цілого числа). Відповідно число шарів зовнішньої котушки буде дорівнювати:

$$n_{ш2\epsilon} = n_{ш2} - n_{ш2\epsilon}. \quad (2.72)$$

Радіальний розмір зовнішньої котушки, см:

$$a_{2\epsilon} = 0,1 \cdot (d'_{np} \cdot n_{ш2\epsilon} + \delta_{ми} \cdot (n_{ш2\epsilon} - 1)). \quad (2.73)$$

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

$$\begin{cases} D'_2 = D''_1 + 2 \cdot a_{12}; \\ D''_2 = D'_2 + 2 \cdot a'_2, \end{cases} \quad (2.74)$$

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

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup>:

$$P_{02} = 3 \cdot n \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot l_2 \cdot 10^{-4}, \quad (2.75)$$

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 більш дешевий перший варіант. Якщо він не підійде за питомим тепловим потоком, необхідно перейти до другого варіанта.

### 2.3.2 Неперервна спіральна котушкова обмотка високої напруги

Конструкція та технологія намотки обмотки – такі самі, як і відповідної обмотки НН (див. п. 2.2.4 та рис. 2.4). В цій обмотці застосовується схема регулювання, зображена на рис.2.4, б), за якої 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 під час короткого замикання.

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

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

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

Під час впливів на обмотку хвилі атмосферної перенапруги перші (вхідні) та останні котушки витримують найбільші перенапруги. Для виключення можливості пробоя ці котушки мають мати посилену ізоляцію. В обмотках напругою 20 кВ посилену ізоляцію товщиною  $2 \cdot \delta_{noc} = 1,06$  мм мають мати дві котушки (одна перша та одна остання), а за напруги 35 кВ по дві котушки зверху та знизу – посилену ізоляцію товщиною  $2 \cdot \delta_{noc} = 1,5$  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:  $n_{pc} = 1$  (див. рис. 2.4, в) і дві котушки в регулювальному ступені:  $n_{pc} = 2$  (див. рис. 2.4, г). У першому випадку кількість витків в регулювальній котушці  $w_{kp} = w_p$ , а в іншому  $w_{kp} = 0,5 \cdot w_p$ . В загальному випадку кількість витків в регулювальній котушці обчислюється за виразом:

$$w_{kp} = \frac{w_p}{n_{pc}}. \quad (2.76)$$

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

Повна кількість котушок обмотки:

$$n_{к2} = \frac{w_{2н} + 2 \cdot w_p}{w_{kp}}. \quad (2.77)$$

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

Вибравши величини  $h_k$ ,  $h_{kp}$  та взявши розрахункову висоту обмотки ВН такою, що дорівнює висоті обмотки НН ( $l_2 = l_1$ ), визначається осевий розмір проводу, який дорівнює висоті котушки, мм:

$$b'_{mp} = 10 \cdot \frac{l_2 - h_k \cdot (n_{к2} - 2) - h_{kp}}{n_{к2}}, \quad (2.78)$$

$$b_{mp} = b'_{mp} - 2 \cdot \delta. \quad (2.79)$$

Знайдений розмір  $b_{mp}$  має задовольняти умову нормального тепловідводу (2.49, 2.50). За табл. 2.1 підбирають стандартний провід з розміром  $b$ , найближчим до  $b_{mp}$ , після чого розраховується сумарний необхідний радіальний розмір проводу:

$$a_{\Sigma mp} = \frac{\Pi_{2mp}}{b}. \quad (2.80)$$

Потім з цієї самої таблиці підбирають стандартний радіальний розмір проводу так, щоб кількість паралельних проводів в обмотці (2.68) була числом цілим або близьким до нього (в останньому випадку його значення округляється до цілого).

$$n_{\epsilon 2} = \frac{a_{\Sigma mp}}{a}. \quad (2.81)$$

Крім того,  $n_{\epsilon 2}$  має бути якомога меншим для дотримання умови  $a < b$ .

Розміри вибраного проводу записуються у вигляді

$$\text{провід ПБ (АПБ)} \quad n_{\epsilon 1} \cdot \frac{a \times b}{a' \times b'} = 3 \cdot \frac{5,6 \times 8,5}{6,1 \times 9,0}; \quad \Pi_{np} = 46,7 \text{ мм}^2.$$

Дійсні перерізи витка (мм<sup>2</sup>) та густина струму, А/мм<sup>2</sup>:

$$\Pi_2 = n_{\epsilon 2} \cdot \Pi_{np}, \quad (2.82)$$

$$\Delta_2 = \frac{I_{2\phi n}}{\Pi_2}. \quad (2.83)$$

Дійсна густина струму може відрізнятися від  $\Delta_{2\text{дон}}$  не більше, ніж на  $\pm 5\%$ . Дійсне відхилення потрібно обчислити та вказати в пояснювальній записці.

Фактична висота обмотки з врахуванням висоти вибраного проводу, см:

$$l_2 = 0,1 \cdot b' \cdot n_{\kappa 2} + h_{\kappa} \cdot (n_{\kappa 2} - 2) + h_{kp}. \quad (2.84)$$

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

В загальному випадку в обмотці ВН може бути  $n_p$  регулювальних котушок по  $w_{kp}$  витків у кожній,  $n_n$  котушок з посиленою ізоляцією по  $w_{kn}$  витків у кожній, а всі інші котушки називаються основними.

Кількість регулювальних котушок:

$$n_p = 4 \cdot n_{pc}. \quad (2.85)$$

Кількість котушок з посиленою ізоляцією  $n_n = 2$  або 4 залежно від величини  $U_{2\text{лн}}$ . Для отримання такого самого радіального розміру ці котушки мають мати на 1–2 витки менше, ніж основні та регулювальні, тобто

$$w_{kn} = w_{kp} - (1...2). \quad (2.86)$$

Тоді кількість основних котушок:

$$n_{2o} = n_{\kappa 2} - n_p - n_n. \quad (2.87)$$

Кількість витків в основних котушках:

$$w_{2o} = w_{2n} + 2 \cdot w_p - n_p \cdot w_{kp} - n_n \cdot w_{kn}. \quad (2.88)$$

Середня кількість витків в основних котушках:

$$w_{2\text{коср}} = \frac{w_{2o}}{n_{2o}}. \quad (2.89)$$

Якщо це число отримується цілим або дробовим, але з такою дробовою частиною, знаменник якої дорівнює кількості рейок на каркасі обмотки, то всі головні котушки можуть бути виконані однаковими. Якщо дробова ча-

стина така, яку неможливо практично виконати, то «розгін» витків необхідно проводити по двох типах основних катушок згідно з (2.57), тільки записаними для основних катушок обмотки ВН. Методика «розгону» така сама, як і для відповідної обмотки НН. В останньому випадку після вибору кількості витків всіх типів катушок має виконуватись рівняння:

$$w_{2н} + 2 \cdot w_p = n'_{2о} \cdot w'_{2ко} + n''_{2о} \cdot w''_{2ко} + n_p \cdot w_{кр} + n_n \cdot w_{кн}. \quad (2.90)$$

Радіальний розмір обмотки, см:

$$a_2 = 0,1 \cdot n_{\epsilon 2} \cdot a' \cdot w_{2косп}. \quad (2.91)$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, см:

$$\begin{cases} D'_2 = D''_1 + 2 \cdot a_{12}, \\ D''_2 = D'_2 + 2 \cdot a'_2. \end{cases} \quad (2.92)$$

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

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup>:

$$P_{02} = 6 \cdot k \cdot \pi \cdot n_{к2} \cdot (D'_2 + a_2) \cdot (a_2 + 0,1 \cdot b') \cdot 10^{-4}, \quad (2.93)$$

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

### 3 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.

#### 3.1 Втрати короткого замикання

Маса металу обмоток, кг:

$$G_{01} = 1,5 \cdot K_\gamma \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot w_1 \cdot \Pi_1 \cdot 10^{-5}, \quad (3.1)$$

$$G_{02} = 1,5 \cdot K_\gamma \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot w_{2H} \cdot \Pi_2 \cdot 10^{-5}, \quad (3.2)$$

де  $K_\gamma$  – коефіцієнт відносної густини ( $K_\gamma = 28$  – для *Cu*;  $K_\gamma = 8,47$  – для *Al*).

Загальна маса металу обмоток, кг:

$$G_0 = G_{01} + G_{02} \cdot \frac{w_{2H} + 2 \cdot w_p}{w_{2H}}. \quad (3.3)$$

Основні електричні втрати в обмотках, Вт:

$$\begin{cases} P_{el1o} = K \cdot (\Delta_1)^2 \cdot G_{01} ; \\ P_{el2o} = K \cdot (\Delta_2)^2 \cdot G_{02} . \end{cases} \quad (3.4)$$

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  $\beta$  та  $k_\delta$ .

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:

$$\beta = 0,1 \cdot \frac{b \cdot m}{l} \cdot K_p, \quad (3.5)$$

б) для обмотки з круглого проводу:

$$\beta = 0,1 \cdot \frac{d_{np} \cdot m}{l} \cdot K_p, \quad (3.6)$$

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

для двохшарової циліндричної обмотки  $m = n_{el} \cdot w_{ul1}$  ;

для гвинтової одноходової обмотки  $m = w_1$  ;

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

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

для багат шарової циліндричної обмотки  $m = n_{\epsilon} \cdot W_{ш}$  ;

для неперервної котушкової обмотки  $m = n_{\kappa}$  ;

$b, d_{np}$  – 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:

$$k_{\delta} = 1 + 1,73 \cdot \beta^2 \cdot \left( \frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot a^4 \cdot (n^2 - 0,2) \cdot 10^{-4}; \quad (3.7)$$

б) для обмотки із круглого проводу:

$$k_{\delta} = 1 + 0,8 \cdot \beta^2 \cdot \left( \frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot (d_{np})^4 \cdot (n^2 - 0,2) \cdot 10^{-4}, \quad (3.8)$$

де  $\rho$  – питомий електричний опір, Ом·м/мм<sup>2</sup> (для міді –  $\rho = 0,02135$ , для алюмінію –  $\rho = 0,0344$ );

$a, d_{np}$  – розміри прямокутного і круглого проводів, мм;

$n$  – кількість окремих провідників обмотки, укладених в радіальному напрямку:

для двох шарової циліндричної обмотки  $n = 2$  ;

для гвинтової одноходової обмотки  $n = n_{\epsilon 1}$  ;

для гвинтової двохходової обмотки  $n = 0,5 \cdot n_{\epsilon 1}$  ;

для гвинтової чотирьохходової обмотки  $n = 0,25 \cdot n_{\epsilon 1}$  ;

для багат шарової циліндричної обмотки  $n = n_{ш}$  ;

для неперервної котушкової обмотки  $n = n_{\epsilon} \cdot W_{\kappa \text{оср}}$ .

Значення  $k_{\delta}$  не має бути більшим 1,01...1,11. Коефіцієнти  $k_{\delta}$  розраховуються для обох обмоток: для обмотки НН –  $k_{\delta 1}$ , а обмотки ВН –  $k_{\delta 2}$ .

Повні електричні втрати в обмотках, Вт:

$$P_{\text{ел1}} = k_{\delta 1} \cdot P_{\text{ел1о}}, \quad (3.9)$$

$$P_{\text{ел2}} = k_{\delta 2} \cdot P_{\text{ел2о}}. \quad (3.10)$$

Дійсні густини теплових потоків на поверхні охолодження обмоток, Вт/м<sup>2</sup>:

$$q_1 = \frac{P_{\text{ел1}}}{\Pi_{01}}, \quad (3.11)$$

$$q_2 = \frac{P_{\text{ел2}}}{\Pi_{02}}. \quad (3.12)$$

Маса металу відводів обмоток НН та ВН, відповідно (з'єднувальних

провідників між обмотками і вводами та між обмотками сусідніх фаз), кг:

$$G_{\text{відв1}} = \frac{10^{-5} \cdot l_{\text{відв1}} \cdot \Pi_{\text{відв1}} \cdot K_{\gamma}}{\pi}, \quad (3.13)$$

$$G_{\text{відв2}} = \frac{10^{-5} \cdot l_{\text{відв2}} \cdot \Pi_{\text{відв2}} \cdot K_{\gamma}}{\pi}, \quad (3.14)$$

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»  $\Delta$  –  $l_{\text{відв}} = 14 \cdot l$ ;

$\Pi_{\text{відв}}$  – переріз проводу, що має дорівнювати перерізу витка відповідної обмотки  $\Pi_1$  або  $\Pi_2$ , мм<sup>2</sup>.

Електричні втрати в відводах, Вт:

$$P_{\text{відв1}} = K \cdot (\Delta_1)^2 \cdot G_{\text{відв1}}, \quad (3.15)$$

$$P_{\text{відв2}} = K \cdot (\Delta_2)^2 \cdot G_{\text{відв2}}. \quad (3.16)$$

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

$$P_{\delta} = 10 \cdot k_{\delta} \cdot S_n, \quad (3.17)$$

у цьому разі  $k_{\delta} = 0,012$  в трансформаторах з  $S_n < 1000$  кВА;  $k_{\delta} = 0,025$  – у разі, коли  $S_n \geq 1000$  кВА.

Повні втрати короткого замикання, Вт:

$$P_{\kappa} = P_{\text{ел1}} + P_{\text{ел2}} + P_{\text{відв1}} + P_{\text{відв2}} + P_{\delta}. \quad (3.18)$$

Ці втрати не можуть 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.

### 3.2 Напряга короткого замикання

Активна складова напруги короткого замикання, % ( $P_{\kappa}$  – Вт,  $S_n$  – кВА):

$$u_a = \frac{P_{\kappa}}{10 \cdot S_n}. \quad (3.19)$$

Середній діаметр двох обмоток, см:

$$d_{12} = D''_1 + a_{12}. \quad (3.20)$$

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

$$a_p = a_{12} + \delta_{\text{екр}} + \frac{(a_1 + a_2)}{3}. \quad (3.21)$$

Відносна ширина обмоток:

$$\sigma = \frac{a_{12} + \delta_{екр} + a_1 + a_2}{\pi \cdot l}. \quad (3.22)$$

Дійсне значення коефіцієнта Роговського:

$$K_p = 1 - \sigma \cdot \left( 1 - \left( 1 - e^{-\frac{1}{\sigma}} \right) \right). \quad (3.23)$$

Дійсне значення напруги одного витка, В:

$$u_g = \frac{U_{1фн} \cdot 10^3}{w_1}. \quad (3.24)$$

Середня висота обмоток, см:

$$l = \frac{l_1 + l_2}{2}. \quad (3.25)$$

Для котушкової обмотки ВН потрібно врахувати наявність розриву між півобмотками, що полягає у визначенні коефіцієнта  $k_q$ . Для його визначення попередньо обчислюється абсолютна та відносна величина розриву під час роботи на номінальному відгалуженні А4–А5.

Абсолютна величина розриву, см:

$$l'_x = 0,2 \cdot n_{pc} \cdot b' + 2 \cdot n_{pc} \cdot h_k + h_{кр}. \quad (3.26)$$

Відносна величина розриву:

$$x = \frac{l'_x}{l}. \quad (3.27)$$

Відповідно коефіцієнт, що враховує наявність розриву між півобмотками:

$$k_q = 1 + \frac{l \cdot x^2}{3 \cdot a_p \cdot K_p} \quad (3.28)$$

Для багат шарової циліндричної обмотки ВН потрібно брати  $k_q = 1$ .  
Реактивна складова напруги короткого замикання, %:

$$u_p = \frac{8,26 \cdot f \cdot S_n \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p \cdot k_q}{u_a^2 \cdot l} \cdot 10^{-3} \quad (3.29)$$

Повна напруга короткого замикання, %:

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_p^2} \quad (3.30)$$

Знайдене значення напруги короткого замикання є важливим параметром трансформатора, тому може відрізнятись від заданого не більше, ніж на 10 %. В пояснювальній записці необхідно вказати дійсне відхилення.

Якщо отримане  $u_k$  менше допустимого більше, ніж на 10 %, то можна збільшити  $u_p$  збільшенням відстані між обмотками  $a_{12}$  (але не більше, ніж в 1,5 раза). Якщо і цього недостатньо або відхилення  $u_k$  від заданого виявилось в більшу сторону, то потрібно повторити розрахунок за іншого значення  $K_s$  (результати розрахунку ORTR): меншого, якщо  $u_k$  менше заданого значення і навпаки.



## 4 МЕХАНІЧНІ СИЛИ І НАПРУГИ В ОБМОТКАХ

Механічні сили в обмотках виникають внаслідок взаємодії струму з магнітним полем розсіювання. 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:

$$F_p = 52,6 \cdot \frac{S_n \cdot u_p \cdot k_{y\partial}^2 \cdot 10^4}{f \cdot a_p \cdot u_\kappa^2}, \quad (4.1)$$

де  $k_{y\partial}$  – ударний коефіцієнт:

$$k_{y\partial} = 1 + e^{-\frac{\pi u_a}{u_p}}. \quad (4.2)$$

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

$$F'_{oc1} = \frac{a_p}{2 \cdot l_1} \cdot F_p, \quad (4.3)$$

$$F'_{oc2} = \frac{a_p}{2 \cdot l_2} \cdot F_p. \quad (4.4)$$

Осьова сила  $F''_{oc}$  викликається появою додаткового поперечного поля через нерівномірний розподіл струму по висоті обмотки ВН у разі відключення регулювальних витків. Напрямок цієї сили в обмотці НН збігається з  $F'_{oc}$ , а в обмотці ВН вона діє назустріч  $F'_{oc}$ .

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

$$d_1 = 0,113 \cdot \sqrt{\Pi_1}, \quad (4.5)$$

$$d_2 = 0,113 \cdot \sqrt{\Pi_2}. \quad (4.6)$$

Знаходиться проектна ширина бака, см:

$$B = D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2, \quad (4.7)$$

де  $S_1, S_2, S_3, S_4$  – ізоляційні відстані, см; що визначаються з табл. 2.4 за відповідними випробувальними напругами:

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

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

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

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

Проектна відстань від стержня до стінки бака, см:

$$l'' = \frac{B-d}{2}. \quad (4.8)$$

Для неперервної котушкової обмотки визначається відстань між крайніми котушками зі струмом за відключення всіх регулювальних витків (див. рис. 2.4, в), г) см;

$$l_x'' = 0,4 \cdot n_{pc} \cdot b' + 4 \cdot n_{pc} \cdot h_k + h_{кр}. \quad (4.9)$$

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

Осьова сила  $F''_{oc}$ , викликається появою додаткового поперечного поля через нерівномірний розподіл струму по висоті обмотки ВН у разі відключення регулювальних витків:

$$F''_{oc1} = F''_{oc2} = \frac{l_x'' \cdot F_p}{4 \cdot l'' \cdot K_p}. \quad (4.10)$$

Таблиця 4.1 – Ізоляційні відстані між відводами та стінками бака

$U_{вин}, \text{кВ}$	до 25		35		45		55		85	
$\delta_{відв}, \text{см}$	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2	0	0,2
$S_1, S_2, S_3, S_4, \text{см}$	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 ( $\delta_{відв} = 0$ ) використовуються тільки в обмотках з  $U_{вин} = 5 \text{ кВ}$ .

3.  $\delta_{відв}$  – одностороння товщина ізоляції відводу.

Сумарні стискальні сили, що діють на обмотки, Н:

$$F_{cm1} = F'_{oc1} + F''_{oc1}, \quad (4.11)$$

$$F_{cm2} = F'_{oc2} - F''_{oc2}. \quad (4.12)$$

Якщо  $F_{cm2} > 0$ , вона стискає тільки одну обмотку, не діючи на ярма, а якщо  $F_{cm2} < 0$ , 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 міжкотушкової ізоляції обмоток.

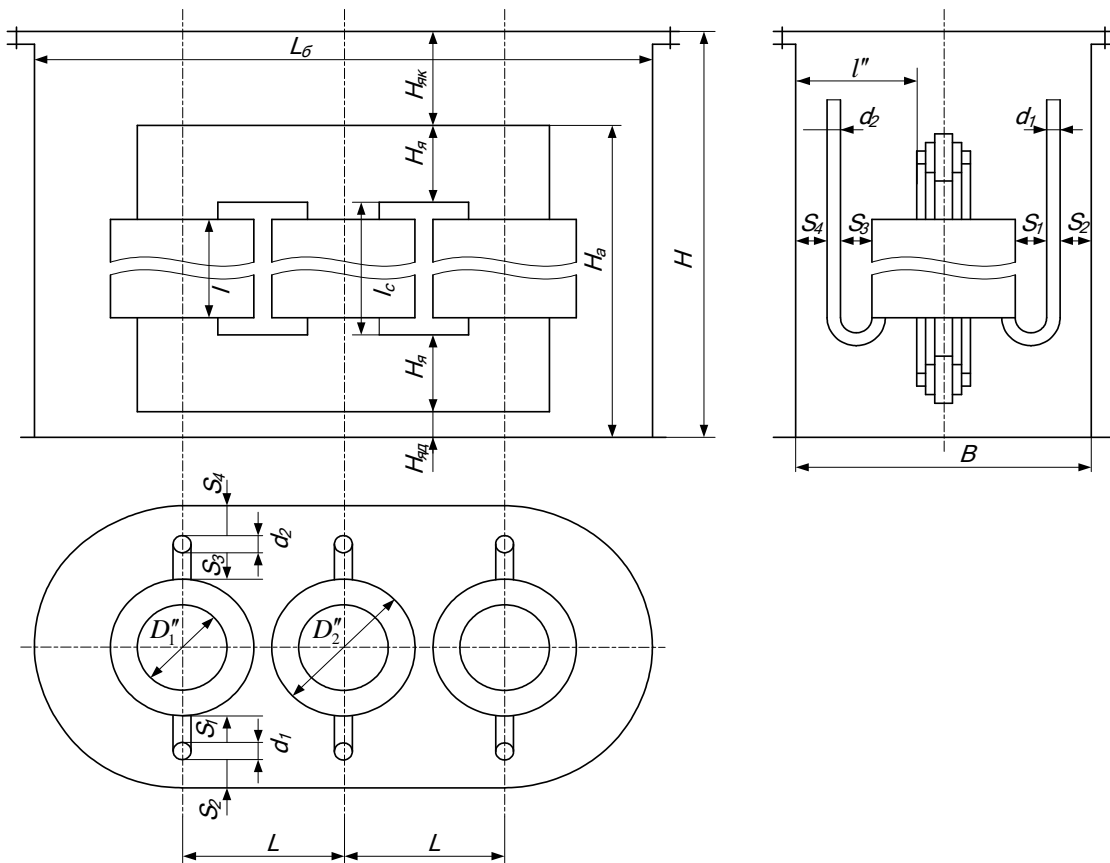


Рисунок 4.1 – Основні розміри бака

Напруження на розрив в проводі обмоток, МПа:

$$\sigma_{p1} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_1 \cdot \Pi_1}, \quad (4.13)$$

$$\sigma_{p2} = \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot w_{2H} \cdot \Pi_2}. \quad (4.14)$$

В трансформаторах з мідними обмотками потужністю до 6300 кВА  $\sigma_p$  не має перевищувати 60 МПа, а за більшої потужності може досягати 150 МПа. В алюмінієвих обмотках  $\sigma_p \leq 25$  МПа.

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

$$\sigma_{cm1} = \frac{F_{cm1}}{10 \cdot a_1 \cdot t \cdot n_n}, \quad (4.15)$$

$$\sigma_{cm2} = \frac{F_{cm2}}{10 \cdot a_2 \cdot t \cdot n_n}, \quad (4.16)$$

де  $a_1, a_2$  – радіальні розміри обмоток, см;  
 $t$  – ширина прокладки, мм;  $t = 40 \dots 60$  мм;

$n_n$  – число прокладок (рейок) по околу обмоток, шт.; дорівнює:

6 – за умови  $S_n < 100$  кВА;

8 – за умови  $S_n = 100 \dots 630$  кВА;

10 – за умови  $S_n = 1000 \dots 1600$  кВА;

12...14 – за умови  $S_n = 2500 \dots 16000$  кВА (п. 2.2.4)

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

Для двохшарової та багатшарової циліндричних обмоток осьові сили незначні і напруження стискання від них не виходять за допустимі межі.

## 5 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  $J_{onm}$  та типу стиків  $T_{onm}$  з використанням дійсних розмірів магнітної системи і обмоток.

### 5.1 Маса магнітної системи

Фактична довжина стержня магнітопроводу, см:

$$l_c = l + l'_0 + l''_0, \quad (5.1)$$

де  $l'_0, l''_0$  – ізоляційні відстані між обмотками та магнітопроводом по висоті (див. табл. 1.4), см;

$l$  – середня висота обмоток, см, (3.25).

Маса сталі стержнів в межах вікна магнітної системи, кг:

$$G'_c = 3 \cdot \Pi_c \cdot l_c \cdot \gamma_{cm} \cdot 10^{-6}, \quad (5.2)$$

де  $\Pi_c$  – активний переріз стержня, см<sup>2</sup>, (2.1);

$\gamma_{cm}$  – густина сталі, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_{cm} = 7650$  кг/м<sup>3</sup>.

Маса сталі одного кута магнітної системи, кг:

$$G_\kappa = 2 \cdot K_3 \cdot \gamma_{cm} \cdot 10^{-6} \cdot (g_{1c} \cdot g_{1я} \cdot h_1 + g_{2c} \cdot g_{2я} \cdot h_2 + g_{3c} \cdot g_{3я} \cdot h_3 + \dots), \quad (5.3)$$

де  $g_{1c}, g_{1я}, g_{2c}, g_{2я}, \dots$  – ширина пластин стикованих пакетів стержня та ярма відповідно, см, (див. табл. 1.1);

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

Маса сталі в місцях стику пакетів стержня і ярма (місця відмічені по вздовжньою штриховкою на рис. 1.1, б):

$$G''_c = 3 \cdot (\Pi_c \cdot g_1 \cdot \gamma_{cm} \cdot 10^{-6} - G_\kappa), \quad (5.4)$$

де  $g_1$  – ширина пластини першого пакета (див. табл. 1.1), см.

Фактична маса сталі стержнів, кг:

$$G_c = G'_c + G''_c. \quad (5.5)$$

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

$$L = D''_2 + a_{12}, \quad (5.6)$$

де  $a_{12}$  – ізоляційна відстань між обмотками ВН сусідніх фаз, см (береться такою, що дорівнює значенню, що вводилось в програму розрахунку ORTR).

Маса сталі ярем між осями крайніх стержнів (див. рис. 1.1, а), кг:

$$G'_я = 4 \cdot L \cdot \Pi_я \cdot \gamma_{ст} \cdot 10^{-6}, \quad (5.7)$$

де  $\Pi_я$  – активний переріз ярма, см<sup>2</sup>,  $\Pi_я = K_3 \cdot \Pi_{фя}$  ( $\Pi_{фя}$  – з табл. 1.1 за діаметром  $d$ ).

Маса сталі ярем в кутках крайніх стержнів (заштриховані ділянки на рис. 1.1 а), кг:

$$G''_я = 2 \cdot G_к. \quad (5.8)$$

Фактична маса сталі ярем, кг:

$$G_я = G'_я + G''_я. \quad (5.9)$$

Повна маса сталі, кг:

$$G_{ст} = G_с + G_я. \quad (5.10)$$

## 5.2 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 ярем, де з'являються додаткові втрати за рахунок спотворення ліній магнітного потоку.

Дійсне значення магнітної індукції, Тл:

$$B_c = \frac{U_{1фн} \cdot 10^3}{4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Pi_c \cdot 10^{-4}}. \quad (5.11)$$

Для фактичного значення магнітної індукції відомого типу сталі  $J_{онм}$  з табл. 1.7 вибираються питомі втрати в сталі для стержнів  $P_с$ , за значенням

$B_{\text{я}} = B_c \cdot (\Pi_c / \Pi_{\text{я}})$  з тієї самої таблиці визначаються питомі втрати потужності в ярмі  $P_{\text{я}}$ . 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:

$$P_0 = k_{mn} k_{mi} \left[ k_{np} \cdot (P_c \cdot G_c + P_{\text{я}} \cdot (G'_{\text{я}} - 4 \cdot G_{\kappa}) + 0,5 \cdot k_{yn} \cdot G_{\kappa} \cdot (P_c + P_{\text{я}})) + n'_3 \cdot P'_3 \cdot \Pi_c + n''_3 \cdot P''_3 \cdot \Pi_c \right], \quad (5.12)$$

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

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

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

Значення  $k_{yn}$  наведено в табл. 1.8.

Розраховані втрати холостого ходу (5.12) не мають перевищувати задані більше, ніж на 7,5 %. В пояснювальній записці вказати дійсне відхилення.

### 5.3 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:

$$Q_0 = k_{mn} k_{mi} \left[ k_{mp} \cdot (q_c \cdot G_c + q_{\text{я}} \cdot (G'_{\text{я}} - 4 \cdot G_{\kappa}) + 0,5 \cdot k_{ym} \cdot k_{mll} \cdot G_{\kappa} \cdot (q_c + q_{\text{я}})) + n'_3 \cdot q'_3 \cdot \Pi_c + n''_3 \cdot q''_3 \cdot \Pi_c \right], \quad (5.13)$$

де  $k_{mn}$  – коефіцієнт, що враховує пресування пластин і дорівнює 1,05 в трансформаторах потужністю до 6300 кВА і 1,06 за  $S_n \geq 10000$  кВА;

$k_{mi}$  – коефіцієнт, що враховує перешихтування верхнього ярма ( $k_{mi} = k_{ni}$ );

$k_{mp}$  – коефіцієнт, що враховує різку пластин,  $k_{mp} = 1,18$ ;

$k_{ym}$ ,  $k_{mll}$  – коефіцієнти, які знаходяться з рис. 1.2;

$q_c$ ,  $q_{\text{я}}$ ,  $q''_3$ ,  $q'_3$  – питомі намагнічувальні потужності, які знаходяться із табл. 1.7 для тих самих значень індукцій, для яких знаходились відповідні питомі втрати.

Активна складова струму холостого ходу, А і %:

$$\begin{cases} I_{0a} = \frac{P_0}{3 \cdot U_{1\phi n} \cdot 10^3}; \\ i_{0a} = \frac{P_0}{10 \cdot S_n}. \end{cases} \quad (5.14)$$

Реактивна складова струму холостого ходу, А і %:

$$\begin{cases} I_{0p} = \frac{Q_0}{3 \cdot U_{1\phi n} \cdot 10^3}; \\ i_{0p} = \frac{Q_0}{10 \cdot S_n}. \end{cases} \quad (5.15)$$

Повний струм холостого ходу, А і %:

$$\begin{cases} I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2}; \\ i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}. \end{cases} \quad (5.16)$$

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



## 6 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

Під час роботи 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 мають перевищувати допустимих.

Найбільш нагріті точки в трансформаторі – провідники обмоток. В процесі передачі теплоти від провідників до масла температура (перепад) між обмоткою і маслом  $\theta_{o-m}$  знижується. Потім теплота від масла передається стінкам бака, внаслідок чого виникає перепад температур між маслом і баком  $\theta_{m-b}$  і, нарешті, теплота від бака передається в навколишнє середовище, що визначає перепад температур між баком і повітрям  $\theta_{b-n}$ .

Для ізоляції, що застосовується в силових масляних трансформаторах, ГОСТ 11677-85 визначає максимально допустимий перепад (перевищення) температури обмоток над навколишнім середовищем  $\theta_{(o-n)don} = 65$  °С, а масла в верхніх шарах над повітрям  $\theta_{(m-n)don} = 60$  °С. За відомих втрат в обмотці, її розмірів і виду ізоляції проводу, можна розрахувати перепад температур  $\theta_{o-m}$ ; перепад  $\theta_{m-b}$  змінюється в дуже вузьких межах для різних трансформаторів і його значення становить 5...6 °С. Тоді допустиме перевищення температури бака над повітрям становитиме

$$\theta_{b-n} = \theta_{(o-n)don} - \theta_{o-m} - \theta_{m-b}, \quad (6.1)$$

за величиною якого можна визначити потрібну площу поверхні охолодження трансформатора, тобто вирішити задачу теплового розрахунку.

### 6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом

Цей перепад складається із перепаду всередині самої обмотки, тобто між точками, розташованими в центрі її перерізу і зовнішньою поверхнею  $\theta_o$ , та між зовнішньою поверхнею обмотки і маслом  $\theta_{no-m}$ .

Для обмоток із прямокутного проводу, °С:

$$\theta_o = \frac{q \cdot \delta \cdot 10^{-5}}{\lambda_{iz}}, \quad (6.2)$$

де  $q$  – дійсна густина теплового потоку на поверхні обмотки, Вт/м<sup>2</sup> (3.11, 3.12);

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

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

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

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

Відносна теплопровідність ізоляції:

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

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

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

Питомі об'ємні втрати потужності в обмотці, Вт/см<sup>3</sup>:

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

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

Перепад температури за масою обмотки з круглого проводу:

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

де  $a_{2н}$  – радіальний розмір зовнішньої котушки обмотки ВН, см, (рис. 2.3), для обмотки НН підставляти  $a_{1н}$ .

З наведених формул визначається температура найбільш нагрітої точки обмотки. Під час практичних розрахунків потрібно знаходити середній перепад всередині всієї обмотки:

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

Перепад температури між поверхнею обмотки і маслом, °C:  
– для двошарової і багат шарової циліндричних обмоток:

$$\theta_{но-м} = 0,285 \cdot q^{0,6}; \quad (6.9)$$

– для гвинтової і неперервної обмоток:

$$\theta_{no-m} = 0,35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q^{0,6}, \quad (6.10)$$

де  $k_1 = 1,0$  – для природного масляного охолодження,  $k_1 = 0,9$  – для масляного охолодження з дуттям (в трансформаторах  $S_n \geq 10000$  кВА);  
 $k_2 = 1,0$  – для зовнішніх обмоток і  $k_2 = 1,1$  – для внутрішніх обмоток;  
 $k_3$  – коефіцієнт, що враховує відношення висоти каналу між котушками до радіального розміру обмотки (визначається з табл. 6.1).

Таблиця 6.1 – Розрахункові значення коефіцієнту  $k_3$

$h_{к/а}$	0,07...0,08	0,08...0,09	0,1	0,11...0,12	0,13...0,14	0,15...0,19	$\geq 0,2$
$k_3$	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8

Середнє перевищення температури обмотки над маслом, °С:

$$\theta_{(o-m)cp} = \theta_{ocp} + \theta_{no-m}. \quad (6.11)$$

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

## 6.2 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 зі збільшенням потужності має створюватись додаткова поверхня охолодження за рахунок труб, що вварюються у стінки бака, або знімних 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. 6.1, а);

б) в трансформаторах 160...1600 кВА потрібно застосовувати одинарні радіатори з овальними (рис. 6.1, б) або круглими (рис. 6.1, в) трубами;

в) в трансформаторах 2500...6300 кВА зазвичай застосовують подвійні радіатори (рис. 6.1, в), одинарний радіатор на рис. 6.1, г) – половина подвійного;

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

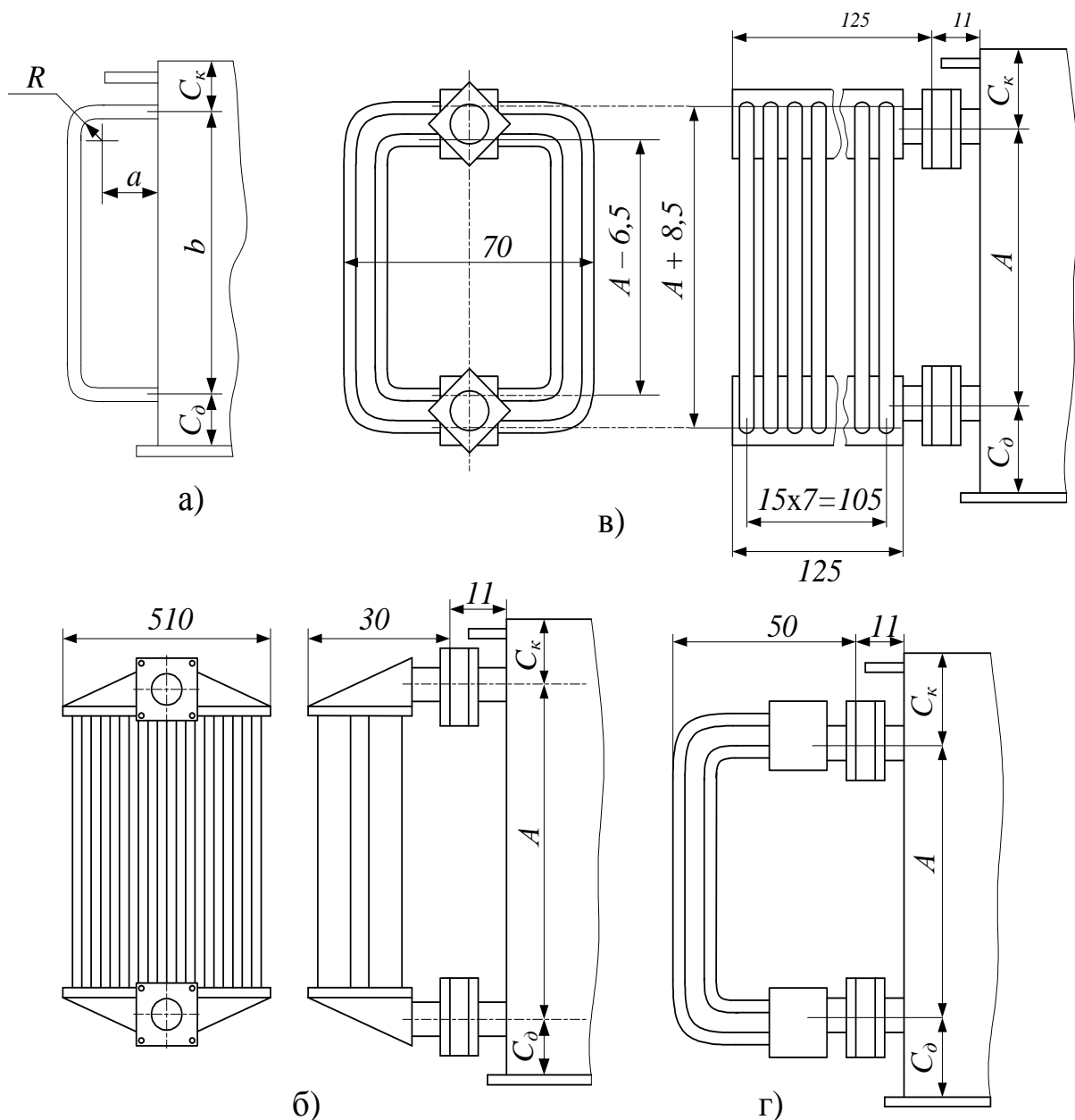


Рисунок 6.1 – Схеми розміщення труб і радіаторів на стінці бака

Для розрахунку системи охолодження відповідно до рис. 6.1 потрібно визначити мінімальні розміри бака, см:

– довжина:

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

– ширина:

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

– висота:

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

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

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

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

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

Площа поверхні випромінювання бака (овальної форми), м<sup>2</sup>:

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

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

Необхідний перепад температури між баком та повітрям:

$$\theta_{(\sigma-n)_н} = \theta_{(o-n)\text{доп}} - \theta_{(o-m)\text{ср}} - \theta_{m-\sigma}, \quad (6.16)$$

де  $\theta_{(o-m)\text{ср}}$  – більше із двох значень, розрахованих для обмоток ВН і НН;  
 $\theta_{m-\sigma}$  – перепад температури на поверхнях «масло-бак», °С;  
 $\theta_{m-\sigma} = 5 \dots 6$  °С.

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

Знайдене значення  $\theta_{(\sigma-n)_н}$  має задовольняти умову:

$$1,2 \cdot \theta_{(\sigma-n)_н} + \theta_{m-\sigma} \leq 60 \text{ °С}. \quad (6.17)$$

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

Якщо вказана умова не виконується, то потрібно взяти:

$$1,2 \cdot \theta_{(\sigma-n)_н} + \theta_{m-\sigma} = 60 \text{ °С}, \quad (6.18)$$

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

$$\theta_{(\sigma-n)_н} = 50 - \theta_{m-\sigma}. \quad (6.19)$$

Необхідна площа поверхні конвекції, м<sup>2</sup>:

$$P_{кн} = \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_k)}{2,5 \cdot \theta_{(\sigma-n)_н}^{1,25}} - 1,12 \cdot P_{вип}, \quad (6.20)$$

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

### 6.3 Розрахунок поверхні охолодження

Розрахунок зводиться до визначення дійсної площі конвекції  $\Pi_{кд}$ , м<sup>2</sup>, яка має бути не меншою за необхідну:

$$\Pi_{кд} \geq \Pi_{кн}. \quad (6.21)$$

#### 6.3.1 Розрахунок поверхні охолодження баку з гладкими стінами

Площа поверхні кришки бака, м<sup>2</sup>:

$$\Pi_{кр} = [(L_{\sigma} - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (6.22)$$

Повна площа поверхні охолодження гладкого бака дорівнює площі поверхні випромінювання стінками та кришкою бака, м<sup>2</sup>:

$$\Pi_{кд} = \Pi_{вип} = [2 \cdot (L_{\sigma} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot \Pi_{кр}. \quad (6.23)$$

Після розрахунку  $\Pi_{кд}$  перевірити виконання умови (6.21). Якщо за рекомендацій п. 6.2 вона не виконується, то потрібно брати варіант охолодження з трубами.

#### 6.3.2 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  $\Pi_{м} = 0,16$  м<sup>2</sup>, а маса масла в ній – 1,58 кг.

Розмір труб (див. рис. 6.1, а):  $a = 5$  см;  $C_{к} = 7$  см;  $C_{\delta} = 8$  см;  $R = 15$  см;

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

$$b = H - C_{к} - C_{\delta}. \quad (6.24)$$

Розгорнута довжина труби, см:

$$l_{mp} = b + 1,14 \cdot R + 2 \cdot a. \quad (6.25)$$

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

$$m_{mp} = 2 \cdot \frac{L_{\sigma} - B}{t_{mp}}, \quad (6.26)$$

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

Площа поверхні випромінювання бака з трубами, м<sup>2</sup>:

$$\Pi_{вип} = 1,1 \cdot [2 \cdot (L_{\sigma} - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot \Pi_{кр}, \quad (6.27)$$

де  $\Pi_{кр}$  – площа поверхні кришки бака, м<sup>2</sup> (6.22).

Площа поверхні конвекції гладкого бака:

$$P_{кзл} = [2 \cdot (L_6 - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4} + 0,5 \cdot P_{кр}. \quad (6.28)$$

Площа поверхні конвекції труб:

$$P_{ктр} = P_m \cdot m_{тр} \cdot l_{тр} \cdot 10^{-2}. \quad (6.29)$$

Фактична площа поверхні конвекції бака з трубами, м<sup>2</sup>:

$$P_{кд} = P_{кзл} + 1,4 \cdot P_{ктр}. \quad (6.30)$$

Після розрахунку  $P_{кд}$  перевірити виконання умови (6.21).

Якщо 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 взятих труб на поверхні бака  $m_{тр}$  до мінімальної потрібної, за якої умова (6.21) виконується.

### 6.3.3 Розрахунок поверхні охолодження бака з навісними радіаторами

Радіатор складається із двох колекторів, у які вварюються труби. В сучасних трансформаторах застосовують одинарні і подвійні радіатори (див. рис. 6.1), які мають стандартні розміри і відрізняються відстанню між осями приєднаних фланців. Основні дані радіаторів наведено в табл. 6.2.

Таблиця 6.2 – Технічні дані трансформаторних радіаторів

Одинарний радіатор за рис. 6.1, б)			Одинарний радіатор за рис. 6.1, г)			Подвійний радіатор за рис. 6.1, в)		
A, см	$P_{ктр}$ , м <sup>2</sup>	$G_m$ , кг	A, см	$P_{ктр}$ , м <sup>2</sup>	$G_m$ , кг	A, см	$P_{ктр}$ , м <sup>2</sup>	$G_m$ , кг
71	2,135	24,0	188	11,45	161	188	22,9	276
90	2,733	30,0	200	12,1	169	200	24,15	291
115	3,533	38,0	228,5	13,55	184	228,5	27,05	321
140	4,333	46,0	248,5	14,55	194	248,5	29,1	341
161,5	4,961	53,0	268,5	15,6	204	268,5	31,15	362
180	5,613	57,0	300	17,2	219	300	34,35	393
200	6,253	64,0	325	18,45	232	325	36,9	418
220	6,893	72,0	375	21,0	258	375	42,0	169
240	7,533	78,0	400	22,3	269	400	44,6	492
$P_{кк} = 0,34 \text{ м}^2$			$P_{кк} = 0,72 \text{ м}^2$			$P_{кк} = 0,66 \text{ м}^2$		
$S_H = 160 \dots 1000 \text{ кВА}$			$S_H = 1600 \dots 2500 \text{ кВА}$			$S_H \geq 2500 \text{ кВА}$		

#### Примітки.

1.  $P_{ктр}$  – площа поверхні конвекції труб, м<sup>2</sup>;
2.  $G_m$  – маса масла в радіаторі, кг;
3.  $P_{кк}$  – площа поверхні конвекції колекторів радіаторів, м<sup>2</sup>.

Для одинарного радіатора (рис. 6.1, б)  $C_d = 8,5$  см,  $C_k = 10$  см.

Радіатори підбирають за значенням його міжосьової відстані  $A$ , для чого розраховують потрібне значення  $A_{mp} = H - 34$  для подвійних радіаторів за рис. 6.1 в), г) і  $A_{mp} = H - 18,5$  для одинарних радіаторів (рис. 6.1, б).

Потім за табл. 6.1 підбирається стандартний радіатор з найближчою меншою відстанню  $A$ .

Площа конвекції стінок гładкого бака, м<sup>2</sup>:

$$P_{кст} = [2 \cdot (L_b - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-4}. \quad (6.31)$$

Площа конвекції кришки гładкого бака, м<sup>2</sup>:

$$P_{кр} = [(L_b - B) \cdot B + 0,25 \cdot \pi \cdot B^2] \cdot 10^{-4}. \quad (6.32)$$

Повна площа поверхні конвекції бака з радіаторами становитиме, м<sup>2</sup>:

$$P_{кд} = P_{кст} \cdot k_{фст} + P_{кр} \cdot k_{фкр} + n_{рад} \cdot (P_{к.тр} \cdot k_{фтр} + P_{кк} \cdot k_{фк}), \quad (6.33)$$

де  $k_f$  – коефіцієнти, що враховують збільшення тепловіддачі відповідними елементами охолодження трансформатора в сукупності:

$k_{фст} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,0$ ;  $k_{фтр} = 1,26$  – для одинарних радіаторів (рис. 6.1, б);

$k_{фст} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,0$ ;  $k_{фтр} = 1,4$  – для подвійних радіаторів (рис. 6.1, в), г) за відсутності обдуву;

$k_{фст} = k_{фкр} = k_{фк} = 1,6$ ;  $k_{фтр} = 2,24$  – для подвійних радіаторів (рис. 6.1, в), г) за наявності обдуву.

Оскільки поверхня  $P_{кд}$  має бути не меншою за  $P_{кн}$  (6.21), прирівнюючи їх з допомогою (6.33) визначається потрібна кількість радіаторів:

$$n_{рад} = \frac{P_{кн} - P_{кст} \cdot k_{фст} - P_{кр} \cdot k_{фкр}}{P_{к.тр} \cdot k_{фтр} + P_{кк} \cdot k_{фк}}. \quad (6.34)$$

Якщо  $n_{рад}$  – ціле число, то знайдене число радіаторів вважається за дійсне, а якщо дробове, то воно округляється до найближчого більшого цілого числа, за якого розраховується дійсна площа поверхні конвекції за (6.33).

Якщо отримане число одинарних радіаторів (рис. 6.1 б) неможливо розмістити по периметру бака (відстань між ними не може бути меншою за 10 см), то можна взяти радіатори з більшим розміром  $A$ , збільшивши відповідно висоту бака. Якщо те саме буде спостерігатись у випадку подвійних радіаторів (відстань між ними не має бути меншою за 16 см), то потрібно застосувати дуття.



#### 6.4 Визначення фактичних перегрівів

Середній перегрів стінки бака над повітрям, °С:

$$\theta_{\delta-n} = \left[ \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_\kappa)}{2,8 \cdot \Pi_{\text{вип}} + 2,5 \cdot \Pi_{\text{кд}}} \right]^{0,8} \quad (6.35)$$

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

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[ \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_\kappa)}{\Pi_{\text{кзл}} + \Pi_{\text{кр}} + \Pi_{\text{ктр}}} \right]^{0,6}, \quad (6.36)$$

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

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

$$\theta_{\text{м-б}} = 0,165 \cdot k_1 \cdot \left[ \frac{1,05 \cdot (P_0 + P_\kappa)}{\Pi_{\text{кзл}} + \Pi_{\text{кр}} + (\Pi_{\text{ктр}} + \Pi_{\text{кк}}) \cdot n_{\text{рад}}} \right]^{0,6} \quad (6.37)$$

Перегрів верхніх шарів масла над повітрям, °С:

$$\theta_{\text{м-н}} = 1,2 \cdot (\theta_{\delta-n} + \theta_{\text{м-б}}), \quad (6.38)$$

який не має перевищувати 60 °С.

Перегрів обмоток над повітрям, °С:

– обмотки НН:

$$\theta_{(o-n)1} = \theta_{(o-m)cp1} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\delta-n}; \quad (6.39)$$

– обмотки ВН:

$$\theta_{(o-n)2} = \theta_{(o-m)cp2} + \theta_{\text{м-б}} + \theta_{\delta-n}, \quad (6.40)$$

які не мають перевищувати 65 °С.

## 7 КОНСТРУКТИВНІ 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:

$$G_{ac} = 1,2 \cdot (G_{cm} + G_o + G_{відв1} + G_{відв2}). \quad (7.1)$$

Загальна маса масла визначається таким чином.

Об'єм гладкого бака, м<sup>3</sup>:

$$V_{\bar{o}} = \Pi_{кр} \cdot H \cdot 10^{-6}. \quad (7.2)$$

Об'єм активної частини, м<sup>3</sup>:

$$V_{ac} = \frac{G_{ac}}{\gamma_{ac}}, \quad (7.3)$$

де  $\gamma_{ac}$  – середня густина активної частини трансформатора, кг/м<sup>3</sup>;

$\gamma_{ac} = 5500 \dots 6000$  кг/м<sup>3</sup> – у разі обмоток з міді,

$\gamma_{ac} = 5000 \dots 5500$  кг/м<sup>3</sup> – у разі обмоток з алюмінію.

Маса масла в додаткових охолоджувальних елементах, кг:

а) в трубах (бак з трубами):

$$G_{m.тр} = 1,58 \cdot l_{тр} \cdot m_{тр} \cdot 10^{-2}; \quad (7.4)$$

б) в радіаторах (бак з радіаторами):

$$G_{m.тр} = G_m \cdot n_{рад}, \quad (7.5)$$

де  $G_m$  – маса масла в одному радіаторі, кг, що визначається з табл. 6.1.

Відповідно, загальна маса масла, кг:

$$G_m = 1,05 \cdot [\gamma_m \cdot (V_{\bar{o}} - V_{ac}) + G_{m.тр}], \quad (7.6)$$

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

$\gamma_m$  – густина масла, кг/м<sup>3</sup>;  $\gamma_m = 900$  кг/м<sup>3</sup>.

Розміри розширювача:

– об'єм, м<sup>3</sup>:

$$V_p = (0,07 \dots 0,1) \cdot (V_{\bar{o}} - V_{ac}); \quad (7.7)$$

– довжина приймається близькою до ширини баку, см –  $l_p \approx B$ ;

– діаметр розширювача, см:

$$d_p = \sqrt{\frac{4 \cdot V_p \cdot 10^6}{\pi \cdot l_p}}. \quad (7.8)$$

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

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 кресленика загального вигляду. Відповідні дані серійних трансформаторів потрібно брати з довідників або даних заводів-виробників.

## 8 КОНСТРУЮВАННЯ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

### 8.1 Конструктивна схема трансформатора

У кожному силовому масляному трансформаторі можна виділити такі основні 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. 8.1 і 8.2 наведено загальний вигляд трансформатора в трьох проєкціях. На рис. 8.1 – головний вид та вид збоку, а на рис. 8.2 – вид зверху. Потужність зображеного трансформатора – 1600 кВА, напруга обмотки ВН – 10 кВ, обмотки НН – 1,15 кВ, схема з'єднання обмоток – Y/Y0.

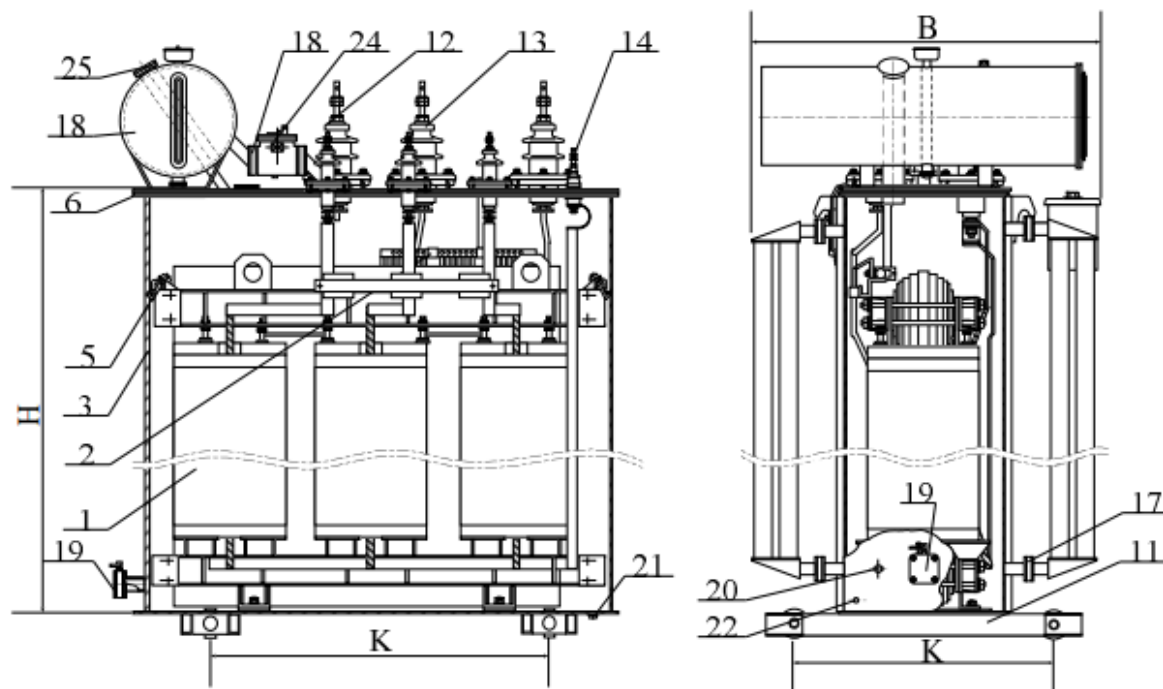


Рисунок 8.1 – Загальний вигляд трансформатора

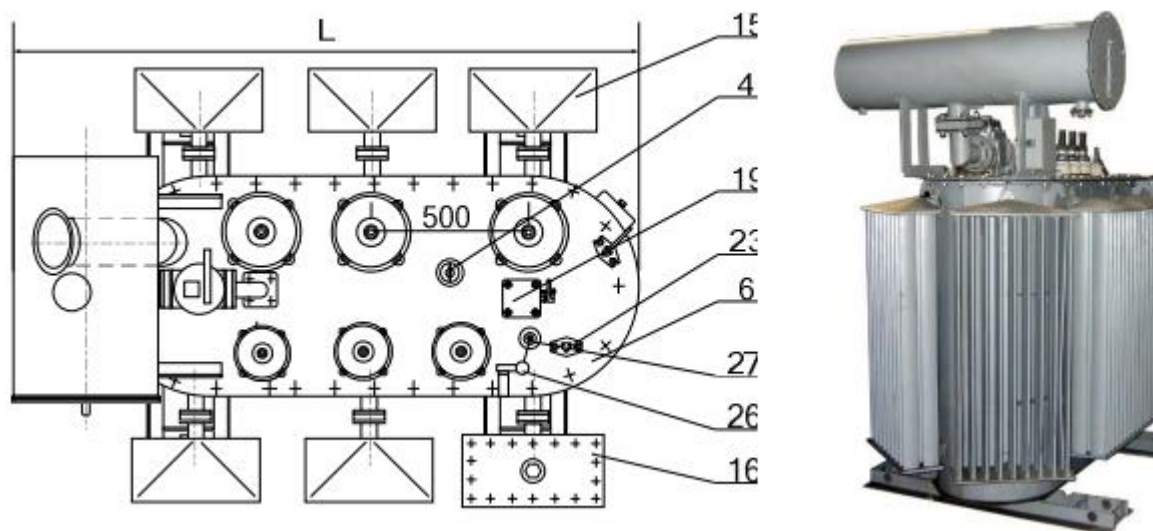


Рисунок 8.2 – Загальний вигляд трансформатора ТМ-1600/10

На головному і бічному видах бак розрізаний по стінках і дні, що дозволяє показати внутрішню частину трансформатора, яка виймається з бака, виїмну частину, яка містить активну частину 1 трансформатора, що складається з магнітопроводу, обмоток, відведень і всіх деталей їх кріплення, а також перемикач 2, з приводом 4, встановленим на кришці бака. Виїмну частину оберігає від зміщення у середині бака чотири розпірні гачки 5, які встановлені по кінцях верхніх яремних балок магнітопроводу і зачеплені зі скобами, що приварені до стінок бака. Бак 3 є резервуаром, звареним із сталевих конструкцій, і призначений для розміщення в ньому частини, яка виймається. Зверху бак закривається сталевією кришкою 6, притиснутою до верхньої рами болтами 7, з гайками 8 і шайбами 9 та ущільненою за допомогою прокладки 10, з маслостійкої гуми, яка випускається у вигляді смуг, кілець і шайб за ГОСТ 12855 – 67. 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 12 (низької напруги – НН), 13 (високої напруги – ВН) і нульовий ввід 14, призначені для з'єднання обмоток трансформатора з відповідними лініями електропередач (ЛЕП) або для виведення нульової точки обмотки, сполученої «в зірку» (якщо це потрібно).

Охолоджувальним пристроєм трансформатора є трубчастий радіатор 15, який можна знімати, закріплений на бічній стінці бака. Звичайно радіатори рекомендується розміщувати в межах прямолінійної частини стінки бака (див. рис. 8.2), але якщо всі вони там не розмістяться, їх можна встановлювати і на закругленнях. Один з радіаторів 16 має вбудований фільтр для безперервного очищення масла в процесі роботи трансформатора. Між

фланцями бака і радіаторів встановлюється ущільнювальна прокладка 17 з маслостійкої гуми.

В таких трансформаторах 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 йде 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 його верхній і нижній частинах бака. У потужних трансформаторах для збільшення інтенсивності охолодження застосовують додаткові вентилятори, що обдувають труби радіаторів (примусове охолодження).

Розширювач 18 розташований на кришці трансформатора і сполучений з баком спеціальним трубопроводом. Внутрішній об'єм розширювача приблизно наполовину заповнений трансформаторним маслом.

Допоміжна арматура містить:

а) плоскі крани 19, призначені для заливання масла (на стінці бака), його зливання (в нижній частині бічної стінки), демонтажу газового реле (в перетині трубопроводу, що сполучає розширювач з баком), відключення радіаторів або знімного фільтра (між фланцями бака і радіаторів або фільтра 29);

б) кран 20 на бічній стінці бака для взяття проби масла;

в) пробку 21 для спуску залишків масла з бака;

г) фільтр 29 для безперервного очищення масла;

д) болт заземлення 22.

Замість плоских кранів для зливання і заливання 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 пошкодження бака трансформатора від внутрішнього надлишкового тиску, розміщується на кришці бака і проходить або всередині розширювача, або зверху нього;

г) пробивний запобіжник 26, який захищає лінію НН від потрапляння на неї потенціалу високої напруги під час пробою ізоляції між обмотками ВН і НН, розміщується на кришці трансформатора.

Всі сучасні трансформатори залежно від їх потужності і класу напруги обмотки ВН розподіляються на VIII габаритів, які наведено в табл. 8.1. До VIII габариту відносяться також всі трансформатори напругою понад 330 кВ (незалежно від потужності). Далі розглядатимуться конструктивні особливості трансформаторів перших чотирьох габаритів.

Таблиця 8.1 – Габаритні розміри трансформатора

Номер габариту	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII
Потужність, кВА	до 100	160... 630	1000... 6300	10000... 80000	до 40000	40000... 100000	160000... 250000	понад 250000
Напруга, кВ (включно)	до 35	до 35	до 35	До 35	110, 150	до 330	до 330	до 330

## 8.2 Магнітопровід

Магнітопровід трансформатора – це його магнітна система, а також станина для кріплення обмоток, виводів, перемикача регулювальних відгалужень та інших деталей. Конструкція магнітопроводу має бути жорсткою, стійкою до механічних зусиль, що виникають під час монтажу обмоток, транспортування та раптових коротких замикань в процесі 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 різної 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<sub>1,5/50</sub>, 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 пи-

томих, а також повних втрат і струму холостого ходу. Анізотропна сталь має високу магнітну проникність тільки у напрямі прокату, через що пластини магнітопроводу потрібно розташовувати так, щоб напрям магнітного потоку в них збігався з напрямом прокату 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 види – показано на рисунку 8.3, 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.

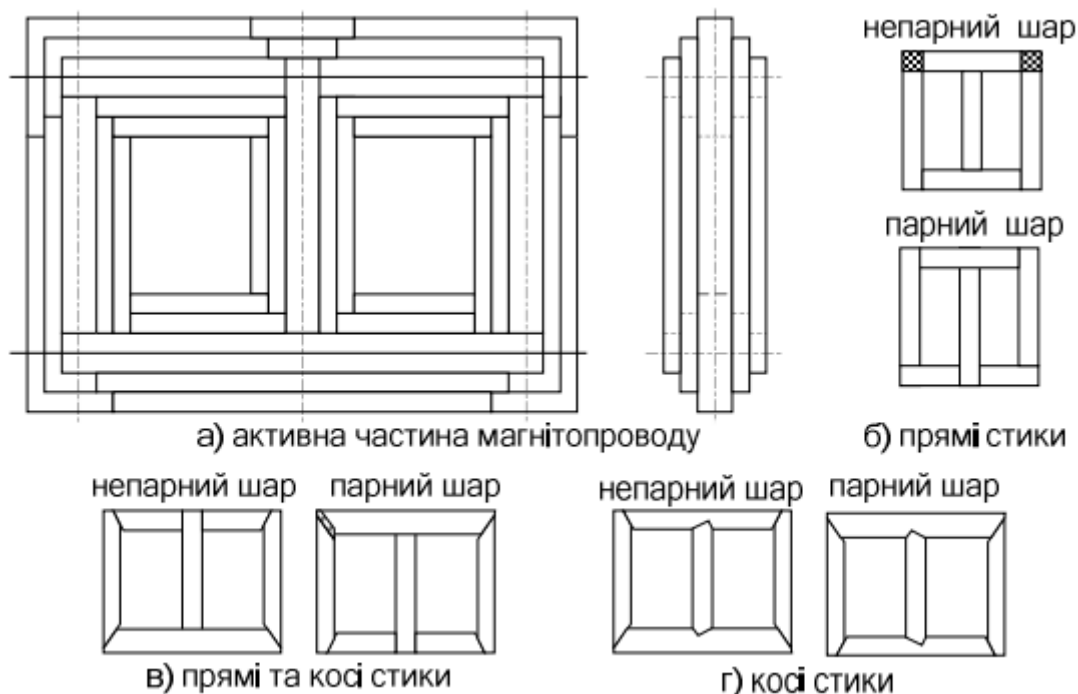


Рисунок 8.3 – Активна частина магнітопроводу трансформатора

Діаметри стержнів, розміри їх пакетів стандартизовано і наведено в табл. 8.1.

Шихтування активної частини магнітопроводу здійснюється «в перепліт», 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. За прямих стиків в кутових частинах ярем (заштрихована область на рис. 8.3, б) магнітний потік проходить по листах сталі під кутом приблизно  $45^\circ$  до напрямку їх прокату, що збільшує втрати і струм холостого ходу



(х.х.) трансформатора. У разі косих стиків ця зона підвищених втрат виходить значно меншою (заштрихована область на рис. 8.3, в).

У технологічному відношенні найбільш простим є магнітопровід з прямими стиками пластин (рис. 8.3, б), далі йде комбінований магнітопровід (рис. 8.3, 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. 8.3, г).

Нині на деяких заводах випускаються трансформатори I і II габаритів з просторовим магнітопроводом, в якому стержні розташовані в трьох площинах під кутом  $120^\circ$ . 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 під час роботи 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 за діаметрів 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 збору магнітопроводу проводять запікання 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 установаження спеціальних ярмових балок – верхніх і нижніх, стягнених однією або двома шпильками з кожної сторони балок. Стягування здійснюється гайками. У безшпилькових конструкціях магнітопроводів шпильки для стяжки ярма проходять поза ярмом. Як ярмова балка звичайно використовується швелер, висота якого береться дещо більшою ширини крайнього пакета ярма. Швелери виготовляються зі сталі за ГОСТ 535-2005 [9] і мають стандартні розміри.

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 стягування ярем сталевими напівбандажами, що виготовляються у вигляді сталевих гнутих шпильок з ізолюваними 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 ізолюють від обмоток бакелітовими трубками. Трубки марки ТБ випускаються відповідно до 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 приварено сталеві шпильки, що входять у відповідні отвори ярмових балок. Замкові пластини застосовуються для розвантаження активної сталі магнітопроводу від дії механічних сил під час короткого замикання (к.з.), а також під час підйому 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 слугує 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 їхній 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. Водночас між окремими металевими частинами і баком існує різниця потенціалів, що призводить до додаткового шуму під час роботи 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 0,3×40 мм. Заземлювальну шину і закладають між листами ярма на відстані близько 10 мм від його краю, а другий кінець кріплять болтами і до верхньої ярмової балки. Однієї стрічки достатньо для заземлення верхніх і нижніх ярмових балок, які електрично ар'язані між собою і з баком.

Після установаження обмоток на стержні вони мають бути спресовані в осьовому напрямі. В трансформаторах I і II габаритів це здійснюється вертикальними шпильками. Під час закручування 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 стягування 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 їх одночасне пресування. Товщина кільця – 30...40 мм. Нажимне кільце має 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 сама ізоляція встанов-

люється і з нижньої сторони обмотки. Іноді замість сталевого розрізного кільця застосовують кільце з склотекстоліту. В цьому випадку його можна робити нерозрізним, крім того, відпадає потреба в додаткових текстолітових опорних пластинах.

### 8.3 Перемикачі регулювальних відгалужень

Перемикачі слугують для зміни числа витків обмотки ВН і забезпечують тим самим регулювання напруги на виводах НН трансформаторів. Перемикач 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, 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 самі напруги і струм понад 160 А

Трифазний нульовий перемикач типу ПТО 6-35/65 (рис. 8.4) призначений для вмикання в коло обмотки, сполученої за схемою з'єднання «зірка» Y, регулювальні відгалуження якої розташовуються в кінці кожної фази (в нейтралі зірки). Таку схему регулювання мають трансформатори з багатополушаровою циліндричною обмоткою на стороні ВН з напругами від 6 до 35 кВ і номінальним фазним струмом до 65 А включно.

Нерухома контактна система перемикача змонтована на паперово-бакелітовій трубці марки ТБ згідно з ГОСТ 8726-88 [10], в якій закріплено нерухомі контакти з латуні згідно з ГОСТ 2060-2006 [11]. 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.

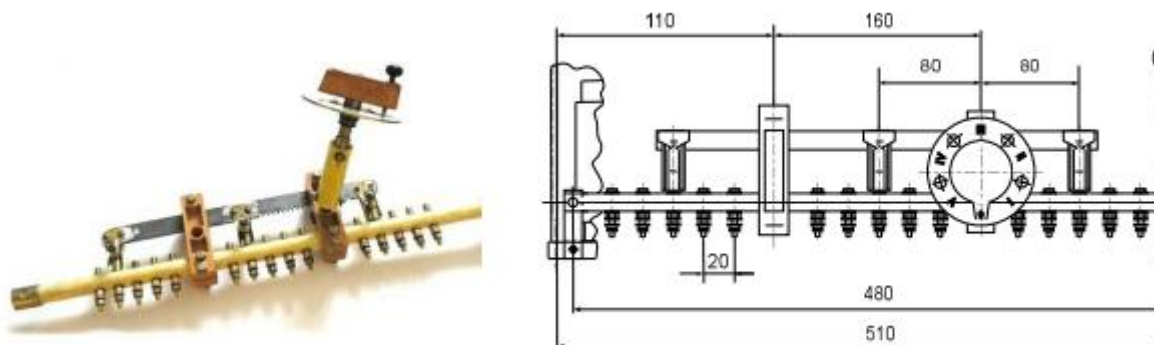


Рисунок 8.4 – Перемикач типу ПТО-6-35/65

Рухома контактна система складається зі сталевій 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 утримувачах, розташованих між фазами перемикача, які виконують роль напрямних. Кожен утримувач 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 кришку тримачів).

Механізм переміщення рухомих контактів – зубчате колесо, надіте на вал і входить в зачеплення із зубцями рейки. Під час повороту колеса відбувається переміщення рейки з контактами.

Таблиця 8.2 – 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. 8.5) на струм 160 А призначений для включення в коло обмотки ВН, яке складається з двох однакових напівобмоток, що сполучаються послідовно через перемикач. Зазвичай перемикачі такого типу застосовуються в неперервній котушечній обмотці, регулювальні відгалуження в якій розташовані в місці розриву, тобто на середині її висоти.

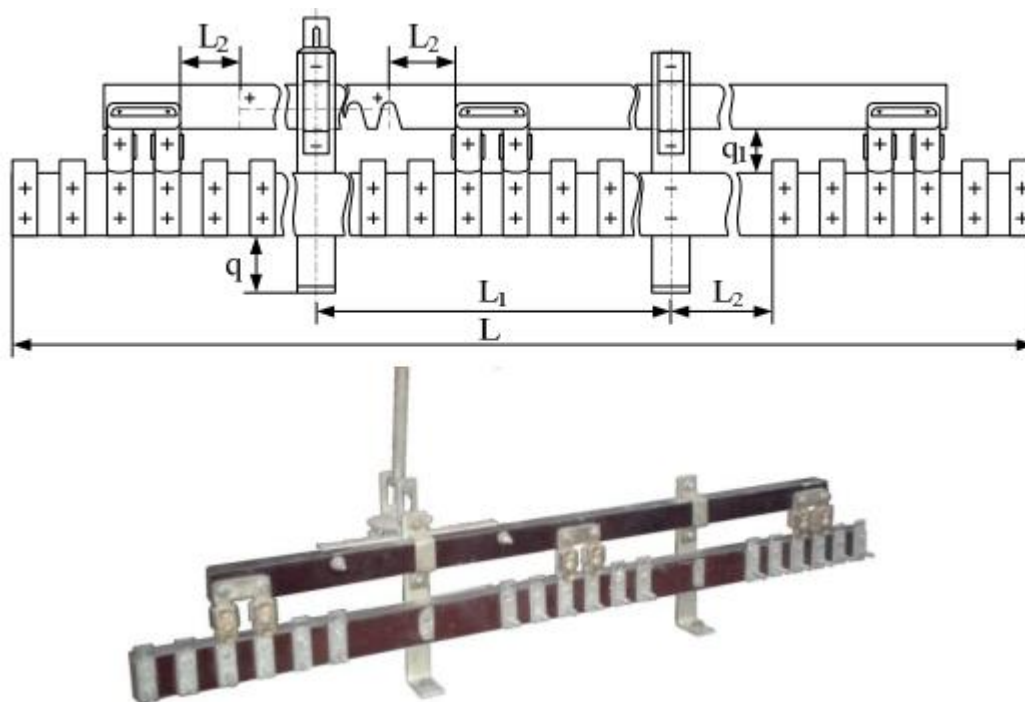


Рисунок 8.5 – Перемикач типу ПТР 6-35/160

Нерухома контактна система перемикача змонтована на ізоляційній рейці з листового гетинаксу (ГОСТ 2718-74 [12]), до якої за допомогою болтів, гайок і шайб прикріплено нерухомі контакти з шинної міді (ГОСТ 434-78 [13]). Болти фіксуються від розкручування загальною стопорною пластиною. Провідники від регулювальних відгалужень обмотки приєднуються до болтів.

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

Рухомі контакти ламельного типу зібрані 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 містить барабан, вал якого повертається у втулці, ввареній в косинець, який також приварений до кронштейна. Вал барабана фіксується за допомогою стопорної шайби. До рухомої рейки кріпиться болтами, гайками і шайбами зубчаста сталевая рейка, виконана з косинця. Зубці цієї рейки входять в зачеплення з штифтами барабана, забезпечуючи під час повороту 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 маслостійкої 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, вкрученим в гайку, яка закладається в ковпак під час його пресування.

Таблиця 8.3 – Основні розміри перемикача ПТР 6 ÷ 35/16

Розміри мм							
$U_{ВН}$ , кВ	$L_2$	$L_1$	$q$	$q_1$	$L$	$h$	$H$
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 регулювальні відгалуження знаходяться всередині обмотки. Внаслідок цього габарити перемикача ПТР виходять більшими, ніж перемикача ПТО.

Перемикач однофазний барабанний типу П-6 (рис. 8.6) застосовується у неперервних обмотках ВН за струмів, що перевищують 160 А. Кожна фаза має свій перемикач з окремим приводом. Вали перемикачів ізоляційними штангами сполучені з приводами, розміщеними на кришці бака.



Рисунок 8.6 – Однофазний перемикач типу П-6

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 дисків, вставляються контактні стержні з латуні (ГОСТ 2060-2006 [10]). В латунні стержні вкручуються кабельні наконечники. До наконечників за допомогою пайки приєднуються кінці регулювальних відведень. За великого струму наконечники можуть вкручуватися в обидва кінці контактних стержнів.

Гетинаксові диски мають по три вирізи, розташовані під кутом  $120^\circ$ , в які входять виступи верхнього і нижнього коротких паперово-бакелітових циліндрів. Диски з контактами і короткими циліндрами розташовуються 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 в свою чергу фіксуються болтами до полиць верхньої і нижньої ярмових балок.

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

Рухома контактна система збирається 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, звареними в кришку бака, і затягується гайками та шайбами. Ущільнення фланця здійснюється прокладкою з маслостійкої 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.

#### 8.4 Бак з візком

Бак трансформатора (рис. 8.7) 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 глечик трансформатора. Ці чотири основні деталі є в баках всіх трансформаторів, а їх розміри, залежні від потужності останніх, наведено в табл. 8.4 (все розміри дано в міліметрах).

Основні розміри бака – довжина  $L_6$ , висота  $H$  і ширина  $B$  – визначаються з розрахунку трансформатора (6.12 – 6.14).



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.



Рисунок 8.7 – Бак трансформатора з радіаторами

Таблиця 8.4 – Розміри бака трансформатора, мм

Потужність трансформатора, 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 за стінку $a$	16	16	20	25	25	25	25
Верхня рама $d \times e$	5×35	6×40	10×65	12×75	$\frac{12 \times 7}{5}$	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 косинцями, 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. 8.8).

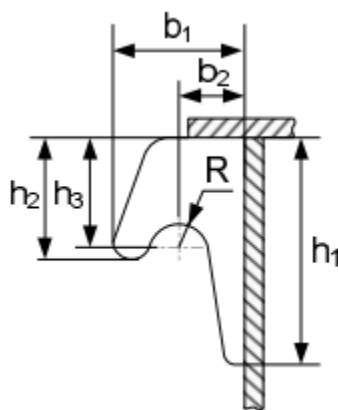


Рисунок 8.8 – Підйомний гак бака трансформатора

Гаки встановлюються по кінцях прямолінійної частини стінок бака або на початку її закруглень. Конфігурація гаків та їх розміри показано у табл. 8.5. Орієнтовні маси трансформаторів в складеному вигляді наведено у табл. 8.6.

Таблиця 8.5 – Розміри підйомних гаків

Маса тр-ра	Розміри підйомного гака, 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 8.6 – Маси трансформаторів в складеному вигляді

$S_n/U_{BH}$	Маса, т	$S_n/U_{BH}$	Маса, т	$S_n/U_{BH}$	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		

Баки трансформаторів потужністю 25 і 40 кВА мають гładкі 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 слугує упором для гумової прокладки під кришкою бака. В дно бака вварюють втулку під пробку для спуску залишків масла.

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

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. 8.9), яка болтами з шайбами кріпиться до швелера. У місці розміщення болта швелер посилюється привареною до нього пластиною. Вісь від випадання оберігається шплінтами.

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 під час руху в поперечному напрямі слугують сталеві пластини, приварені до швелерів.

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

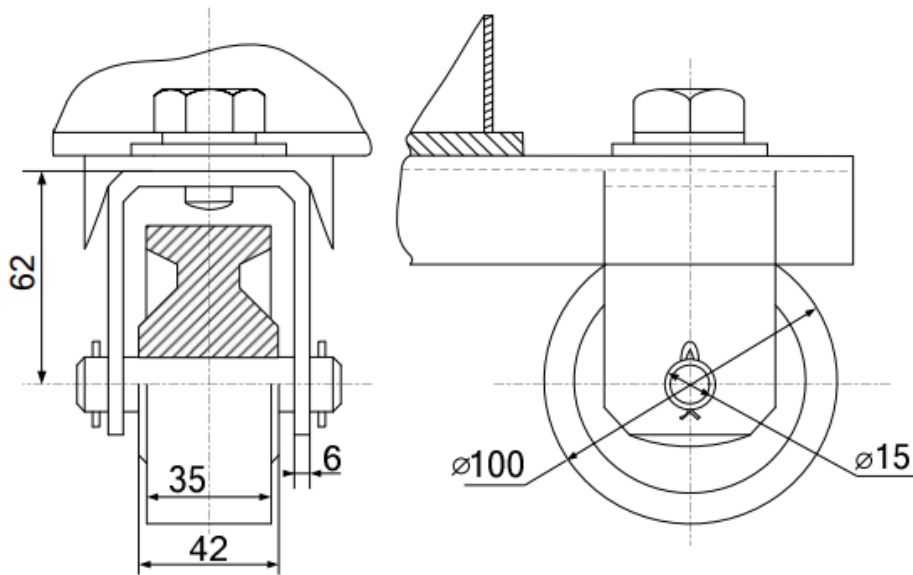


Рисунок 8.9 – Каток трансформатора потужністю 250 кВА

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 сталеві опорна плита. Каток розміщується в спеціальній поворотній каретці, звареній зі сталевих пластин (рис. 8.10).

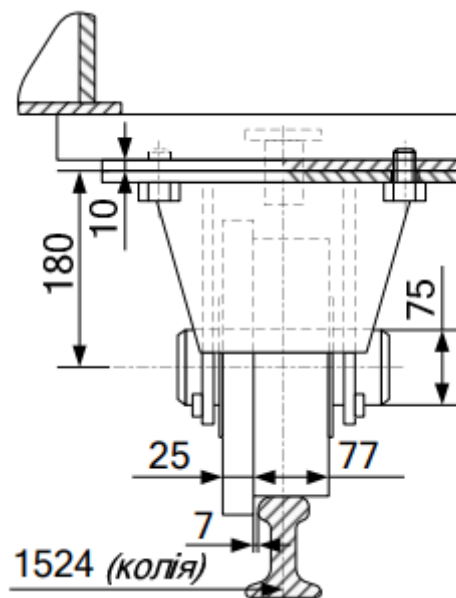


Рисунок 8.10 – Каток трансформатора потужністю 2500 кВА

Для повороту каретки на  $90^\circ$  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.

### 8.5 Вводи

Для приєднання обмоток трансформатора до електричної мережі застосовуються вводи, що встановлюються на кришці бака. Основні деталі вводів – 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, занурену 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. 8.11 зображено вводи різних напруг.

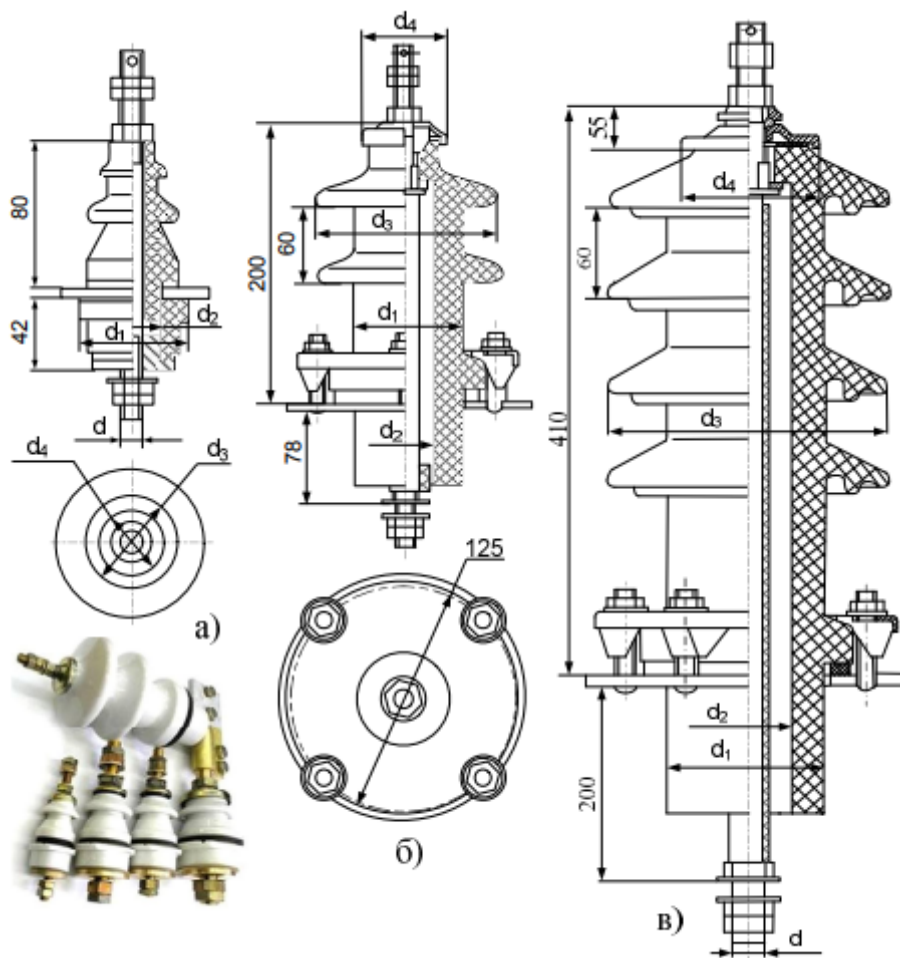


Рисунок 8.11 – Вводи трансформаторів  
а) 6 ÷ 10 кВ; б) 20 ÷ 35 кВ; в) до 1 кВ

Під час заливання 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. 8.11, 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 подовжній розріз. Після завертання 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 за великих струмів має забезпечувати приєднання відведень 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. В такому разі в кришці бака під плитою робиться виріз. Застосування плит викликано підвищеним нагрівом сталеві 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 наведено табл. 8.7.

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

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

Таблиця 8.7 – Основні розміри вводів трансформаторів

Напруга, кВ	Струм, А	Розміри, мм					
		d <sub>1</sub>	d <sub>2</sub>	d <sub>3</sub>	d <sub>4</sub>	d <sub>5</sub>	d <sub>6</sub>
1 (рис. 8.11, 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	M27x1.5	110	56	90	76	-
	1600	M33x2	125	70	105	80	-
	2000	M42x3	125	70	105	80	-
3, 6, 10 (рис. 8.11, б)	250	M12	65	30	130	52	125
	400	M16	84	44	140	62	145
	630	M20	84	44	140	62	145
	1000	M27x1,5	104	60	155	98	180
	1600	M33x2	126	82	185	114	200
	2000	M42 x 3	126	82	185	114	200
20, 35 (рис. 8.11, в)	400	M16	104	54	205	98	180
	630	M20	104	54	205	98	180
	1000	M27x1,5	104	54	206	98	180
	1600	M33x2	126	76	240	114	200

Мінімальні відстані в повітрі між струмоведучими частинами (ковпаками) вводів, а також струмоведучими і заземленими частинами трансформаторів мають становити: за напруги вводів 3 кВ – 60 мм; 6 кВ – 80 мм; 10 кВ – 110 мм; 15 кВ – 150 мм; 20 кВ – 180 мм; 35 кВ – 300 мм.

### 8.6 Відводи

Відводами називаються провідники, за допомогою яких обмотки окремих фаз з'єднуються між собою з метою утворення заданої схеми (зірка або трикутник), початки фаз з'єднуються з струмоведучими стержнями вводів, а регулювальні 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 двох сторін активної частини: з однієї сторони – відводи обмотки НН, з іншої – обмотки ВН.

Для виконання відводів застосовуються такі типи провідників:

а) круглий голий дріт з діаметрами, мм: 2,44; 3,05; 4,1; 4,8; 5,5; 6,5; 8; 10 і 12, який можна порівняно легко згинати і надавати відводам будь-яку форму. Застосовується в трансформаторах I і II габаритів за напруги обмоток 1 кВ;

б) голі шини прямокутного перетину, мм: 2,83×30; 4,4×25; 4,4×30; 4,5×40; 5×40; 5×50; 4,5×60; 5×60; 6×60; 5×80; 6×80; 5×100; 7×80; 8×80; 8×100; 10×100; 12,5×100. Застосовуються також за напруги обмоток до 1 кВ, якщо перерізів круглого провідника недостатньо для виконання відводів;

в) круглий дріт перерахованих вище діаметрів, ізолюваний паперово-бакелітовими трубками із завтовшки стінки 2 або 4 мм. Застосовується в трансформаторах I-III габаритів за напруг обмоток 3...35 кВ;

г) гнучкий дріт (кабель) з паперовою ізоляцією завтовшки 3,6 або 8 мм на сторону. Він обплетений з тонких (діаметром 0,57 мм) провідників. Кабель має такі діаметри і перерізи (в дужках), мм (мм<sup>2</sup>): 5,8 (16); 7,7 (25); 10,2 (50); 14,3 (95); 18,1 (150); 23 (240); 26,2 (300); 29,8 (400). Застосовується в трансформаторах IV габариту за напруг 6...35 кВ.

Допустимий струм у відводах залежить від їх перерізу і товщини ізоляції  $\delta$  на одну сторону і може бути визначений з табл. 8.8.

Всі відводи розраховуються на фазний струм, окрім відводів, переріз яких вибирається за лінійним струмом.

Лінійні відводи з круглих провідників приєднуються до введів безпосередньо, а з прямокутних шин і гнучких кабелів – через компенсатор. Останній є декількома складеними разом мідними стрічками завтовшки 0,3 мм. З одного кінця стрічки спаяні між собою і з шиною або з кабелем відводу, а інший кінець – припаяний олов'яним припоєм і в ньому зроблено отвір для шпильки введення. В середній частині компенсатора стрічки не спаяні, дякуючи чому забезпечується їх гнучкість. Приєднуючи компенсатор до введів, його згинають по дузі кола, чим забезпечується компенсація неточності підгонки довжини відводів. Ширина стрічки компенсатора становить 30...80 мм.

Таблиця 8.8 – Перетин і товщини ізоляції

Круглий провідник				Шини		Гнучкий провідник			
$d$ , мм	$\delta = 0$	$\delta = 2$ , мм	$\delta = 4$ , мм	$a \times b$ , 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				



Розташування відводів для різних варіантів обмоток ВН та НН наведено на рис. 8.12.

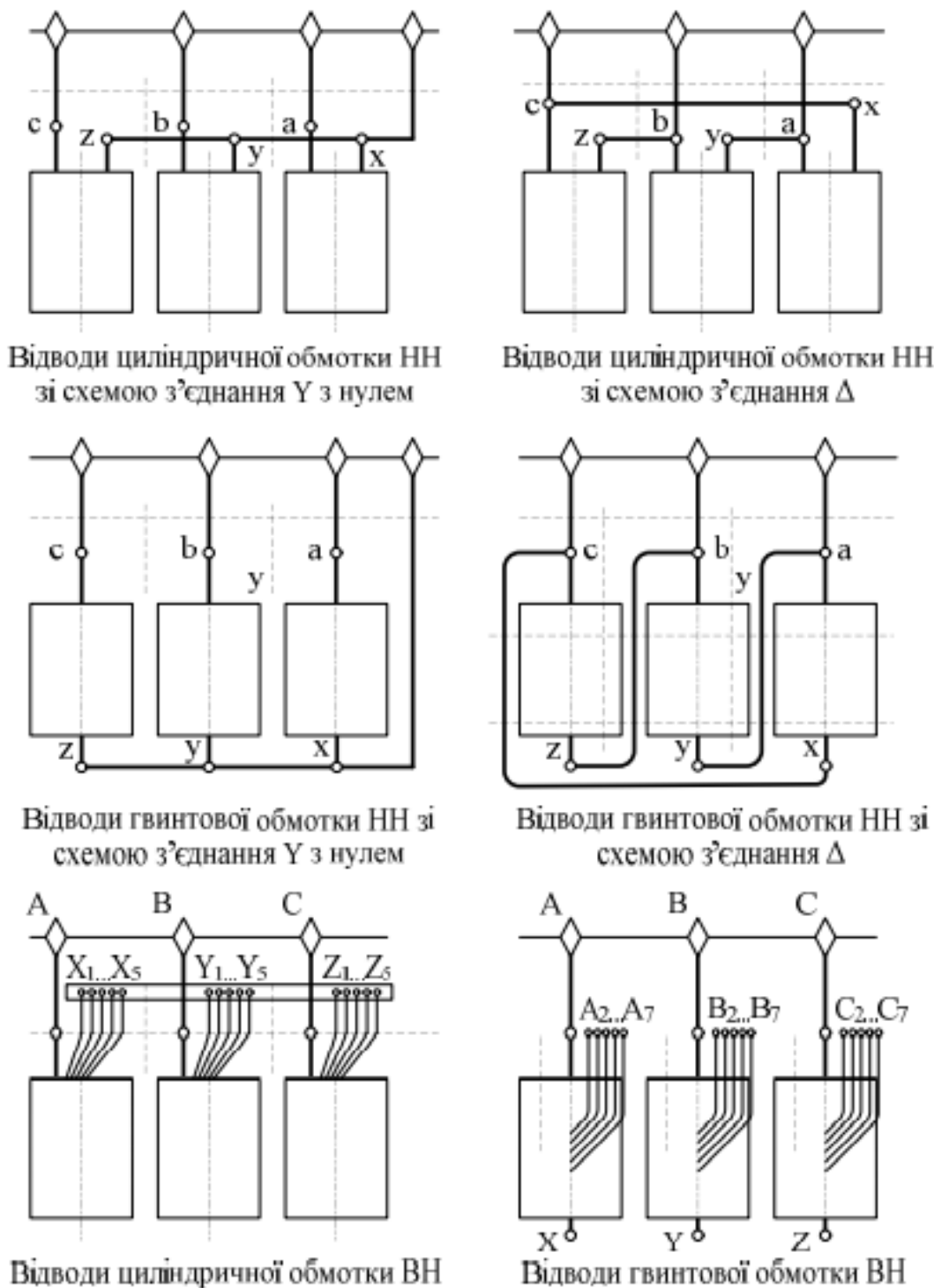


Рисунок 8.12 – Конструкції відводів обмоток низької та високої напруги

Рейки і планки (зображені штриховою лінією на рис. 8.12) для кріплення відводів мають 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 відводів і стінкою бака має витримуватися 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 (рис. 8.4).

У безперервній обмотці регулювальні відгалуження розміщуються на середині висоти обмоток, через що вони мають мати 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 (рис. 8.6) регулювальні відводи приєднуються до них без додаткового кріплення.

Кінці обмоток з відводами, відводи між собою сполучають за допомогою паяння твердим мідно-фосфорним припоєм (ГОСТ 4515-93 [15]). Зачищені кінці провідників або шин затискаються між вугільними електродами щипців для електропаяння. За включеного 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 під час виготовлення компенсаторів. Мідно-фосфорний припій 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.

Під час конструювання відводів мають дотримуватися необхідні ізоляційні відстані 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.

### **8.7 Охолоджувальний пристрій**

Охолодження масляних трансформаторів здійснюється за рахунок природної конвективної циркуляції масла. У трансформаторах малої потужності 25...40 кВА для відведення тепла досить власної поверхні бака. За потужності 63...100 кВА потрібним є невелике додаткове збільшення по-

верхні 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 їх зовнішньої поверхні здійснюється шляхом установлення знімних радіаторів, зварених з труб.

У проєктованих трансформаторах застосовуються одинарні радіатори з овальних і круглих труб і 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 самий 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 скріплюються між собою за допомогою кутиків, приварених до них і стягнутих болтами і гайками. В дно верхнього до нижнього колекторів зварюються 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 вертикальні електродвигуни з вентилятором на валу поміщені в міжтрубному просторі радіатора. Вентилятори засмоктують повітря знизу і направляють його конусом розсіювання вгору. Водночас 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 за відстані між верхнім та нижнім фланцями радіатора по осях  $A = 1800...2685$  мм; 870 мм – за  $A = 3000$  і 3250 мм; 1170 мм – за  $A = 3750$  і 4000 мм і 1270 мм, коли  $A = 4250$  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 самі, як в подвійному радіаторі.

### 8.8 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. 8.13), які наведено в табл. 8.9.

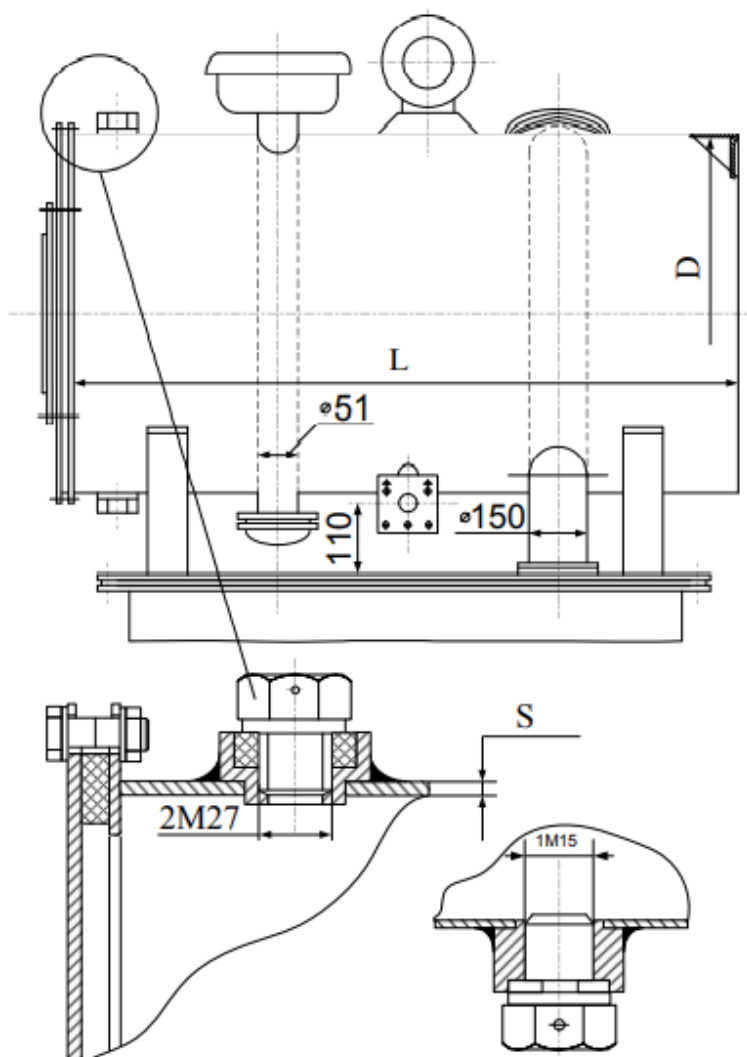


Рисунок 8.13 – Конструкція та розміри розширювача

Таблиця 8.9 – Технічні характеристики розширювачів

Розміри, мм				Об'єм розширювача, м <sup>3</sup>	Маса масла, що заливається, кг
<i>D</i>	<i>L</i>	<i>S</i>	<i>d<sub>1</sub></i>		
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

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.

До корпусу розширювача приварюються опорні пластини, які за допомогою болтів кріпляться до кришки трансформатора. У потужних трансформаторах (вище 1000 кВА) пластини приварюються до косинців, а ті також 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 зливання 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.

У трансформаторах без газового реле (до 1000 кВА) трубопровід за допомогою привареного до нього фланця з'єднується прямо з кришкою бака, а у всій решті випадків – в його переріз ставиться газове реле.

З'єднання розширювача з атмосферою здійснюється через вбудований або виносний повітроосушувач (рис. 8.14).

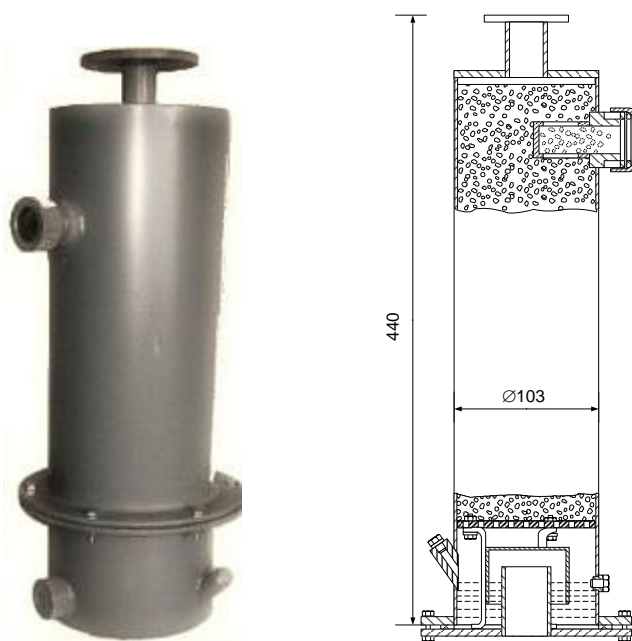


Рисунок 8.14 – Осушувач повітря

Вбудований повітроосушувач складається з двох сталевих труб, зварених 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]), просоченим розчинами хлористого кальцію і хлористого кобальту. Знизу повітроосушувач закритий скляним ковпаком, закріплюваним фланцем і болтами з гайками. Ущільнення ковпака проводиться за допомогою гумової манжети.

У разі зниженні рівня масла в розширювачі тиск повітря над ним стає нижче 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 видно 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 гума прокладка.

Нижнє коліно має спеціальний болт, за допомогою якого можна перекидати отвір в коліні і проводити очищення масломірного скла або його заміну.

На передньому торці розширювача робляться контрольні відмітки, відповідні рівню масла в ньому за максимальної температури повітря  $+40\text{ }^{\circ}\text{C}$ , нормальної  $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$  і мінімальної  $-45\text{ }^{\circ}\text{C}$ .

Трансформатори потужністю 1000 кВА і вище мають мати запобіжну (вихлопну) трубу, яка запобігає розриву бака у випадку аварійного підвищення в ньому тиску газів, що виділяються з масла у разі його надмірного нагрівання.

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.

Під час нормальної роботи 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 самого діаметра 150 мм встановлюється під кутом  $15^{\circ}$  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 під час нормальної роботи трансформатора.

### 8.9 Допоміжна арматура

Трансформатори мають комплектуватися пристроями, що забезпечують їх нормальну експлуатацію. До допоміжної арматури трансформаторів відносяться фільтри неперервного очищення масла, крани, вентилялі 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:

- вбудовані в один з радіаторів (див. рис. 8.2, поз. 16);
- виносні фільтри термосифонного типу з масою силікагелю 4, 6 і 10 кг;
- окремі фільтри з масою силікагелю 50 і 100 кг.

Конструкцію вбудованого в радіатор фільтра описано 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) наведено на рис. 8.15.

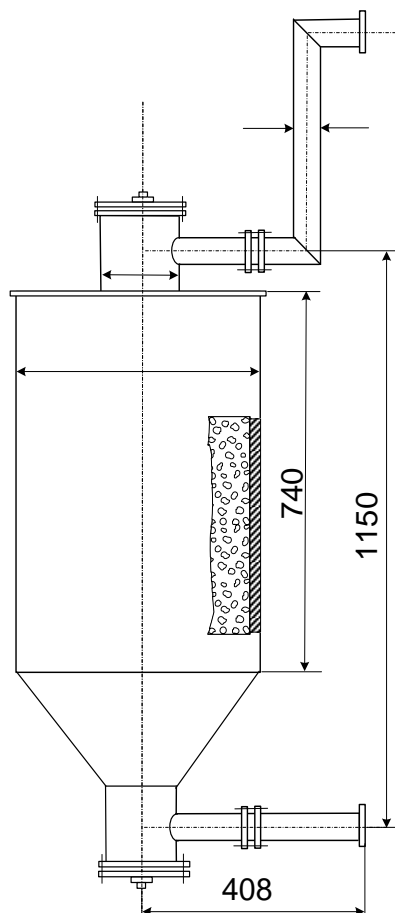


Рисунок 8.15 – Термосифонний фільтр неперервного очищення масла



Він складається із зварного циліндричного корпусу, в дно якого вварено 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. У кришці корпусу має бути пробка виходу повітря з фільтра під час заливання масла в трансформатор.

Внутрішній діаметр корпусу за маси силікагелю 4 і 6 кг – 180 мм, а у разі 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 за більшої потужності – висносні 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 вентилі. Заливання масла в бак трансформаторів I габариту здійснюється через пробку, що встановлюється на розширювачі (див. рис. 8.13). Аналогічна пробка встановлюється в дні бака і слугує для зливання з нього залишків масла (див. рис. 8.1, 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.

Конструкцію плоского крана наведено на рис. 8.16. Кран складається з плоского корпусу, в центрі якого є отвір діаметром 50 мм або 80 мм. Цей отвір може перекриватися плоскою заслінкою, закріпленою в верхній та нижній півосях 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 якої забезпечується гайкою через проміжну втулку.

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 бака і встановлюється в нижній частині стінки бака (див. рис. 8.1, 8.2, 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 бака можуть застосовуватися чавунні вентилі з умовними проходами 25, 50 або 80 мм з фланцевим кріпленням.

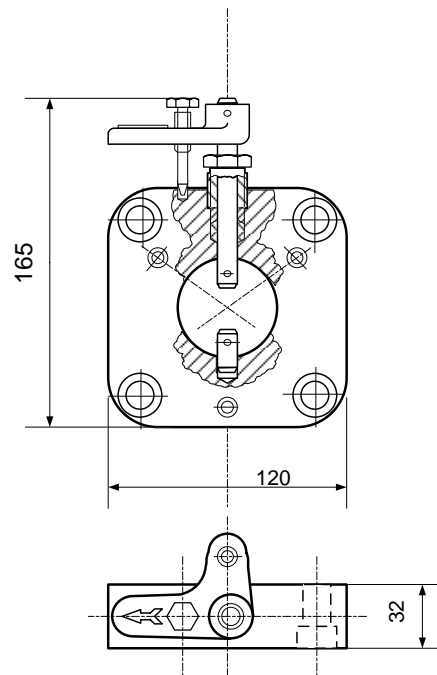


Рисунок 8.16 – Плоский кран

Вентиль має значно більші габаритні розміри порівняно з плоским краном. Однак вентилі надійніше перекривають шлях масла на відміну від застінки плоского крана, через яку масло просочується за знятої заглушки. Через це вентилі 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 бака ставиться кран для відбору проби масла з кульковим клапаном (рис. 8.17).

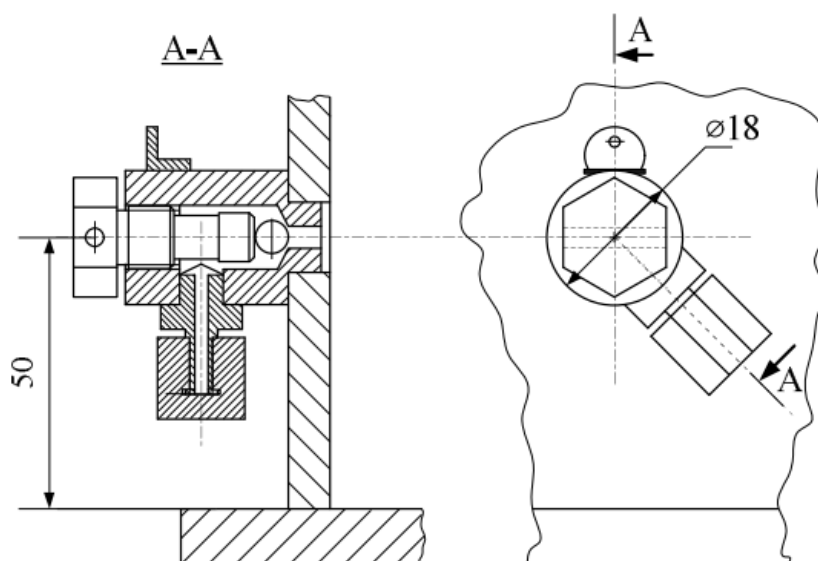


Рисунок 8.17 – Конструкція крана для відбору проб масла

Він складається з корпусу, ввареного в стінку бака, усередині якого просвердлено отвір, що закривається кулькою, кулька затискається болтом. У бічну стінку корпусу крана вварено втулку, закриту гайкою і ущільнену прокладкою. Втулка служить для приєднання шланга.

### **8.10 Контрольні та захисні пристрої**

До контрольних пристроїв відносяться прилади, які забезпечують неперервний контроль рівня масла в розширювачі, вказівники температури масла у верхніх шарах бака, термометри та термосигналізатори. Конструкції масловказівників було розглянуто в п. 8.8.

У трансформаторах потужністю до 630 кВА включно температура масла в баку вимірюється спиртовим скляним термометром (рис. 8.18, див. рис. 8.2, 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 подовжнім 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. 8.18).

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. Всередині штуцера проходить капілярна трубка.

Сигналізатор складається з корпусу, усередині якого змонтовано манометричну пружину, механізм переміщення стрілки та електроконтактний пристрій. На шкалі встановлюються додатково жовта і червона нерухомі стрілки-вказівники. 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, 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, призначені для кріплення приладу до пластини на стінці бака або до труб радіатора на рівні очей людини.

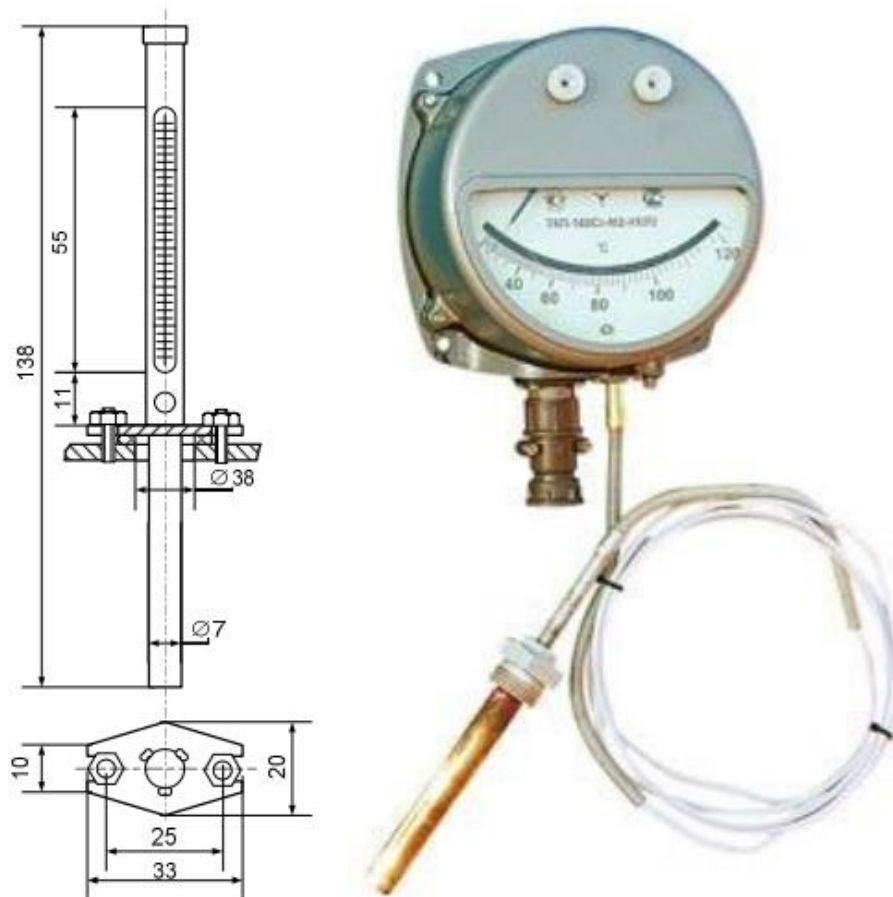


Рисунок 8.18 – Засоби для вимірювання температури масла трансформатора: термометр та термосигналізатор

У разі досягнення рухомою стрілкою стрілки-вказівника 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 за досягнення рухомою стрілкою стрілки-вказівника 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 у випадку електричного пробоя між обмотками ВН і НН (див. рис. 8.2, поз. 27). Запобіжниками 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 мають мати запобіжники).

Пробивний запобіжник складається з фарфорових підставок і головки. Через центральний отвір підставки проходить контактна шпилька, що за-

тискається двома гайками зверху і знизу. Між гайками затискається провід діаметром 5 мм, що сполучає шпильку з одним з лінійних ввідів обмотки НН, якщо вона сполучена в трикутник, або з нульовим вводом, якщо обмотка з'єднується в зірку з виведеною нейтральною точкою.

За нормального значення напруги на обмотці НН електроди запобіжника розділені іскровим проміжком. Під час пробою між обмотками ВН і НН високий потенціал, що з'являється на нижньому електроді, викликає пробой іскрового проміжку по отворах слюдяної прокладки пробивного запобіжника, сполучаючи обмотку НН із землею і запобігаючи появам високої напруги в мережі НН. Запобіжник витримує після пробою струм заземлення 200 А протягом 30 хв. Цей струм може викликати зварювання електродів, тому після спрацювання запобіжник має бути замінений новим.

Газове реле (рис. 8.19 та див. рис. 8.1, поз. 24) застосовується в трансформаторах потужністю 1000 кВА і вище та слугує для їх захисту від всіх видів внутрішніх пошкоджень, зокрема 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.



Рисунок 8.19 – Газове реле трансформаторів

Газове реле встановлюється в розрізі маслопроводу, що сполучає розширювач з баком і кріпиться фланцевим з'єднанням.

Для того, щоб газове реле спрацювало своєчасно, потрібно щоб весь газ, який виділяється у випадку пошкодження трансформатора, потрапляв в корпус реле. Для цього трансформатор встановлюють на фундамент так, щоб один його край (зі сторони газового реле) був підведений на кут  $1...1,5^\circ$ . Крім того, маслопровід разом з реле також має бути нахиленим на кут  $2...4^\circ$  до горизонталі з підйомом у бік розширювача.

Докладніший опис конструкції допоміжних пристроїв трансформаторів наведено в [8].

## Література

1. Грабко В. В. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори : навчальний посібник / Грабко В. В., Розвудюк М. П., Левицький С. М. – Вінниця : ВНТУ, 2008. – 219 с.
2. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : нав. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.
3. Яцун М. А. Електричні машини : підручник / Яцун М. А. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2011. – 464 с.
4. Чуєнко Р. М. Електричні машини : навчальний посібник / Чуєнко Р. М. – К. : Видавництво «Компрінт», 2017. – 462 с.
5. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
6. 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).
7. Сталь электротехническая холоднокатаная анизотропная тонколистовая. Технические условия: ГОСТ 21427.1-83 — [Введ. 01-01-1984]. – М. : Изд-во стандартов, 1983. – 13 с. – (Межгосударственный стандарт).
8. Тихомиров П. М. Расчёт трансформаторов / Тихомиров П. М. – М. : Энергоатомиздат, 1986.
9. 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).
10. Трубки электротехнические бумажно-бакелитовые. Технические условия: ГОСТ 8726-88 – [Введ. 01-01-1989]. – М. : Изд-во стандартов, 1988. – 10 с.
11. Прутки латунные. Технические условия: ГОСТ 2060-2006 – [Введ. 01-01-2008]. – М. : Изд-во стандартов, 2007. – 29 с. – (Межгосударственный стандарт).
12. Гетинакс электротехнический листовой. Технические условия: ГОСТ 2118-74 – [Введ. 01-01-1976]. – М. : Изд-во стандартов, 1974. – 23 с.
13. Проволока прямоугольного сечения и шины медные для электрических целей. Технические условия : ГОСТ 434-78 – [Введ. 01-01-1977]. – М. : Изд-во стандартов, 1978. – 20 с.
14. Отливки стальные. Общие технические условия: ГОСТ 977-88 — [Введ. 01-01-1990]. – М. : Изд-во стандартов, 1990. – 35 с.
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.

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).

**Додаток А**  
**Завдання на проектування**

Міністерство освіти і науки України  
Вінницький національний технічний університет  
Факультет електроенергетики та електромеханіки

ЗАТВЕРДЖУЮ  
Зав. кафедри КЕМСК

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.

**ІНДИВІДУАЛЬНЕ ЗАВДАННЯ**  
на курсовий проект з дисципліни «Електричні машини»  
студенту групи \_\_\_\_\_

1. Тема проекту (роботи):

**Розрахунок і проектування трифазного силового  
масляного трансформатора**

2. Термін здачі студентом закінченого проекту

3. Вихідні дані до проекту: варіант \_\_\_\_\_

S <sub>н</sub> , кВА	Лінійна на- пруга, кВ		Схема і група з'єднання обмоток	Втрати, Вт		Струм х.х. %	На- пруга к.з. %	Мате- ріал обмо- ток
	ВН	НН		х.х.	к.з.			

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки:

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

2.2.1 Розрахунок обмотки низької напруги

2.2.2 Розрахунок обмотки високої напруги

3 Розрахунок характеристик короткого замикання

3.1 Втрати короткого замикання

3.2 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
6.4 Розрахунок поверхні охолодження
6.4 Визначення фактичних перегрівів
7 Конструктивні показники трансформатора

5. Перелік графічного матеріалу:

Графічна частина складається з одного кресленника формату А1

Загальний вид трансформатора в трьох проекціях з необхідними розрізами і перерізами

Елемент конструкції трансформатора за окремим завданням керівника

**Календарний план**

Ч.ч.	Назва станів курсового проекту	Термін виконання станів проекту	Позначка про виконання
1	Видача завдання		
2	Розробка технічного завдання		
3	Розрахунок основних електричних величин		
4	Попередній розрахунок в ORTR		
5	Розрахунок обмоток НН та ВН		
6	Розрахунок характеристик к.з.		
7	Механічні сили і напруги в обмотках		
8	Розрахунок магнітної системи		
9	Тепловий розрахунок трансформатора		
10	Конструктивні показники трансформатора		
11	Здача пояснювальної записки		
12	Здача графічного матеріалу		
13	Здача готового проекту		
14	Захист курсового проекту		

Завдання отримав \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ім'я, по-батькові)

Керівник проекту \_\_\_\_\_  
(підпис) (прізвище, ім'я, по-батькові)

## Додаток Б Приклад розрахунку у ППП MathCad

Номинальна потужність, кВА:	$S_{\text{НОМ}} := 4000$
Номинальна напруга вторинної обмотки, кВ:	$U_{1\text{НОМ}} := 6.3$
Номинальна напруга первинної обмотки, кВ:	$U_{2\text{НОМ}} := 35$
Схема і група з'єднань обмоток:	Y / Δ -11
Втрати холостого ходу, Вт:	$P_0 := 5700$
Втрати короткого замикання, Вт:	$P_{\text{кз}} := 33500$
Струм холостого ходу, %:	$i_{0\%} := 1$
Напруга короткого замикання, %:	$U_{\text{кз}\%} := 7.5$
Матеріал обмоток:	Cu

+

### 1 ПОПЕРЕДНІЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

#### 1.1 Розрахунок основних електричних величин

Номинальні лінійні струми обмоток трансформатора, (індексами 1 позначена обмотка НН, індексами 2 обмотка ВН), А:

$$I_{1\text{ЛН}} := \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{1\text{НОМ}}} = 366.572$$

$$I_{2\text{ЛН}} := \frac{S_{\text{НОМ}}}{\sqrt{3} \cdot U_{2\text{НОМ}}} = 65.983$$

Номинальні фазні струми і напруги обмоток, при схемі з'єднанні обмотки НН в трикутник (А, кВ):

$$I_{1\text{ФН}} := \frac{I_{1\text{ЛН}}}{\sqrt{3}} = 211.64$$

$$U_{1\text{ФНОМ}} := U_{1\text{НОМ}} = 6.3$$

Номинальні фазні струми і напруги обмоток, при схемі з'єднанні обмотки ВН в зірку (А, кВ):

$$I_{2\text{фн}} := I_{2\text{лн}} = 65.983$$

$$U_{2\text{фном}} := \frac{U_{2\text{ном}}}{\sqrt{3}} = 20.207$$

## 2 РОЗРАХУНОК ОБМОТОК

### 2.1 Вибір типу обмоток

По номінальним даним трансформатора для обох обмоток НН та ВН обираємо неперервну спіральну катушечну обмотку.

### 2.2 Розрахунок обмотки низької напруги

Активна і реактивна складові заданої напруги короткого замикання, %:

$$u_{a\%} := \frac{P_{\text{кз}}}{10 \cdot S_{\text{ном}}} = 0.838$$

$$u_{p\%} := \sqrt{U_{\text{кз}\%}^2 - u_{a\%}^2} = 7.453$$

Активний переріз стержня, см<sup>2</sup>:

Площа ступінчатої фігури стержня, см<sup>2</sup>

$$\Pi_{\text{фс}} := 844.8$$

Коефіцієнт заповнення ступінчатої фігури сталлю  $J_{\text{ст}}$

$$K_3 := 0.97$$

$$\Pi_c := \Pi_{\text{фс}} \cdot K_3 = 819.456$$

Напруга (ЕРС) одного витка, В:

Частота мережі, Гц

$$f := 50$$

Робоча індуктивність в стержні, Тл

$$B_c := 1.64$$

$$u_B := 4.44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c \cdot 10^{-4} = 29.835$$

Число витків обмотки

$$W_1 := \text{round} \left( \frac{U_{1\text{фном}} \cdot 10^3}{u_B} \right) = 211$$

Густина струму в обмотці НН, при якій будуть забезпечені задані у ній втрати при допустимому нагріванні,  $\text{мм}^2$

Середня густина струму,  $\text{А/мм}^2$ :  $\Delta_{\text{ср}} := 3.482$

$$\Delta_{1\text{доп}} := 1.05 \cdot \Delta_{\text{ср}} = 3.656$$

Необхідний переріз витка,  $\text{А/мм}^2$

$$\Pi_{1\text{тр}} := \frac{I_{1\text{фн}}}{\Delta_{1\text{доп}}} = 57.887$$

Визначимо гранично допустиму висоту проводу з урахуванням нормального тепловідводу з поверхні обмотки,  $\text{мм}^2$ :

$$q_{\text{доп}} := 1300$$

$$b := \frac{10 \cdot q_{\text{доп}}}{107 \cdot \Delta_{1\text{доп}}^2} = 9.089$$

Обираємо стандартний провід  $b_1 := 9$

Сумарний необхідний радіальний розмір проводу,  $\text{мм}^2$ :

$$a_{1\Sigma\text{тр}} := \frac{\Pi_{1\text{тр}}}{b_1} = 6.432$$

Обираємо стандартний провід з розміром  $a_1 := 3.15$

Кількість паралельних провідників

$$n_{\text{в}1\_} := \frac{a_{1\Sigma\text{тр}}}{a_1} = 2.042$$

$$n_{\text{в}1} := 2$$

$$\text{провід ПБ } n_{\text{в}1} \frac{a \times b}{a' \times b'} = 2 \frac{3,15 \times 9}{3,65 \times 9,5}; \Pi_{\text{тр}} = 27,8 \text{ (мм}^2\text{)}, \quad \Pi_{\text{пр}1} := 27.8$$

$$\delta_{-} := 0.25$$

Розміри провідників обмотки НН з ізоляцією, мм

$$a' := a_1 + 2 \cdot \delta_{-} = 3.65$$

$$b' := b_1 + 2 \cdot \delta_{-} = 9.5$$

Дійсний переріз витка:

$$\Pi_1 := n_{В1} \cdot \Pi_{пр1} = 55.6$$

Дійсна густина струму:

$$\Delta_1 := \frac{I_{1ФН}}{\Pi_1} = 3.806$$

Похибка:

$$\delta_{\Delta} := \frac{\Delta_1 - \Delta_{1доп}}{\Delta_{1доп}} \cdot 100 = 4.113$$

Отримане значення густини струму не відрізняється від значення  $\Delta_{1доп}$  більш ніж на  $\pm 5\%$ .

Кількість котушок обмотки:

висота каналу між котушками  $h_k := 0.45$

довжина обмотки  $L_{-} := 58.145$

$$n_{k1-} := \frac{L_{-} + h_k}{0.1 \cdot b + h_k} = 43.119$$

Заокруглюємо до найближчого більшого парного числа:

$$n_{k1} := 44$$

Середня к-ть витків в котушці:

$$W_{k1cp} := \left( \frac{W_1}{n_{k1}} \right) = 4.795 \quad \frac{795 \cdot 1.2}{1000 \cdot 1.2} \quad \frac{9.54}{12}$$

Середня к-ть витків в котушці дробова тому здійснимо процедуру розгону витків котушки по котушкам двох типів 4+9/12 та 4+10/12 витків (кратно 1/12 витка, 12 рейок для заданої потужності):

$$w_{k1ш} := 4 + \frac{9}{12}$$

$$w_{k1шш} := 4 + \frac{10}{12}$$

$$n_{k1ш} := \frac{W_1 - n_{k1} \cdot w_{k1шш}}{w_{k1ш} - w_{k1шш}} = 20$$

$$n_{k1шш} := n_{k1} - n_{k1ш} = 24$$

Перевірка:

$$w_{k1ш} \cdot n_{k1ш} + w_{k1шш} \cdot n_{k1шш} = 211 \quad W_1 = 211$$

Отже обмотка має 20 котушок по  $4 + 9/12$  витків та 24 котушки по  $4 + 10/12$  витків

Дійсна висота обмотки:

$$l_1 := 0.1 \cdot b' \cdot n_{k1} + h_k \cdot (n_{k1} - 1) = 61.15$$

Відхилення висоти, %

$$\frac{l_1 - L_-}{L_-} \cdot 100 = 5.168$$

Так як відхилення більше 5 % зменшимо висоту каналу :

$$h_{kв} := 0.4$$

Дійсна висота обмотки:

$$l_{1в} := 0.1 \cdot b' \cdot n_{k1} + h_{kв} \cdot (n_{k1} - 1) = 59$$

Відхилення висоти, %

$$\frac{l_1 - L_-}{L_-} \cdot 100 = 1.47$$

Радіальний розмір обмотки, що складається з двох котушок:

$$a_{1-} := 0.1 \cdot a' \cdot n_{B1} \cdot W_{k1cp} = 3.501$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки:

Діаметр стержня  $d := 34$

$$a_{01} := 1.75$$

$$D'_1 := d + 2 \cdot a_{01} = 37.5$$

$$D''_1 := D'_1 + 2 \cdot a_{1\_} = 44.501$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки:

коефіцієнт, що враховує закриті частини поверхні обмотки рейками та прокладками  $k := 0.75$

$$P_{01} := 6 \cdot k \cdot \pi \cdot n_{k1} \cdot (D'_1 + a_{1\_}) \cdot (a_{1\_} + 0.1 \cdot b') \cdot 10^{-4} = 11.351$$

### 2.3 Розрахунок обмотки високої напруги

При виборі і розрахунку обмотки ВН слід враховувати необхідність виконання в обмотці відгалужень для регулювання напруги. Обмотка ВН повинна мати відгалуження, які відповідають (1,05; 1,025; 1; 0,975; 0,95) від номінальної напруги.

Кількість витків обмотки, що відповідає номінальній напрузі:

$$W_{2H} := \text{round} \left( W_1 \cdot \frac{U_{2\text{фном}}}{U_{1\text{фном}}} \right) = 677$$

Кількість витків, що відповідає одному ступеню регулювання ( $0,025 \cdot U_H$ ):

$$W_p := \text{round}(0.025 \cdot W_{2H}) = 17$$

Кількість витків, що відповідають регулювальним відгалуженням

$$1.05 \cdot U_H \quad \longrightarrow \quad W_{2H} + 2 \cdot W_p = 711$$

$$1.025 \cdot U_H \quad \longrightarrow \quad W_{2H} + W_p = 694$$

$$1.0 \cdot U_H \quad \longrightarrow \quad W_{2H} = 677$$

$$0.975 \cdot U_H \quad \longrightarrow \quad W_{2H} - W_p = 660$$

$$0.9 \cdot U_H \quad \longrightarrow \quad W_{2H} - 2 \cdot W_p = 643$$

Допустима густина струму в обмотці ВН, при якій будуть забезпечені задані в ній втрати при допустимому нагріванні

$$\Delta_{2\text{доп}} := 0.95 \cdot \Delta_{\text{ср}} = 3.308$$

Потрібний переріз витка обмотки:

$$\Pi_{2\text{тр}} := \frac{I_{2\text{фн}}}{\Delta_{2\text{доп}}} = 19.947$$

Вибираємо неперервну спіральну катушечну обмотку.

Обчислимо кількість витків в регулювальній обмотці:

Одна катушка в регулювальному ступені  $n_{\text{рс}} := 1$

$$W_{\text{кр}} := \frac{W_{\text{р}}}{n_{\text{рс}}} = 17$$

Повна кількість катушок в обмотці:

$$n_{\text{к2}} := \frac{W_{2\text{н}} + 2 \cdot W_{\text{р}}}{W_{\text{кр}}} = 41.824$$

$$n_{\text{к2}} := 44$$

Осьовий розмір проводу:

$$l_2 := l_1 = 59 \qquad h_{\text{кр}} := 1.2 \qquad h_{\text{к}} = 0.4$$

$$b'_{\text{тр}} := 10 \cdot \frac{l_2 - h_{\text{к}} \cdot (n_{\text{к2}} - 2) - h_{\text{кр}}}{n_{\text{к2}}} = 9.318$$

$$\delta' := 0.25$$

$$b_{\text{тр}} := b'_{\text{тр}} - 2 \cdot \delta' = 8.818$$

Вибираємо стандартний прямокутний мідний провід  $b_2 := 8.5$

Розрахуємо сумарний необхідний радіальний розмір проводу:

$$a_{2\Sigma\text{тр}} := \frac{\Pi_{2\text{тр}}}{b_2} = 2.347$$



Підбираємо стандартний радіальний розмір проводу  $a_2 := 2.5$

Кількість паралельних проводів в обмотці:

$$n_{B2} := \text{round}\left(\frac{a_2 \Sigma_{\text{тр}}}{a_2}\right) = 1$$

$$a'_2 := a_2 + 2 \cdot \delta' = 3$$

$$b'_2 := b_2 + 2 \cdot \delta' = 9$$

$$\text{Провід ПБ } n_{B1} \cdot \frac{a \cdot b}{a' \cdot b'} = 1 \cdot \frac{2.5 \cdot 8.5}{3 \cdot 9} \quad \Pi_{\text{пр}2} := 20.7$$

Дійсні перерізи витка та густина струму:

$$\Pi_2 := n_{B2} \cdot \Pi_{\text{пр}2} = 20.7$$

$$\Delta_2 := \frac{I_{2\text{фн}}}{\Pi_2} = 3.188$$

Дійсна густина струму може відрізнятись не більше ніж на  $\pm 5\%$

$$\delta_{\Delta_-} := \frac{\Delta_{2\text{доп}} - \Delta_2}{\Delta_{2\text{доп}}} \cdot 100 = 3.637$$

Фактична висота обмотки з врахуванням висоти вибраного проводу, см:

$$l_{2_-} := 0.1 \cdot b'_2 \cdot n_{k2} + h_k \cdot (n_{k2} - 2) + h_{kp} = 57.6$$

$$\frac{l_{2_-} - l_1}{l_1} \cdot 100 = -2.373$$

Кількість регулювальних котушок:

$$n_p := 4 \cdot n_{pc} = 4$$

Число витків в котушках з посиленою ізоляцією:

$$W_{kp} := W_{kp} - 1 = 16$$

Кількість основних катушок:

Кількість катушок з посиленою ізоляцією  $n_{\Pi} := 4$

$$n_{2o} := n_{k2} - n_p - n_{\Pi} = 36$$

Кількість витків в основних катушках:

$$W_{2o} := W_{2H} + 2 \cdot W_p - n_p \cdot W_{kp} - n_{\Pi} \cdot W_{k\Pi} = 579$$

Середня кількість витків в основних катушках:

$$W_{2\text{коср}} := \frac{W_{2o}}{n_{2o}} = 16.083 \quad \frac{1}{12} = 0.083$$

Врахоуючи, що дробова частина кількості витків в основних катушках кратна 1/12 процедуру розгону робити не потрібно

Радіальний розмір обмотки, см:

$$a_{2\_} := 0.1 \cdot n_{B2} \cdot a'_2 \cdot W_{2\text{коср}} = 4.825$$

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, см:

Ізоляційна відстань між обмотками ВН та НН  $a_{12} := 2$

$$D'_2 := D''_1 + 2 \cdot a_{12} = 48.501$$

$$D''_2 := D'_2 + 2 \cdot a'_2 = 54.501$$

Повна площа поверхні охолодження обмотки, м<sup>2</sup> +

$$\Pi_{02} := 3 \cdot n_{k2} \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_2 + a_{2\_}) \cdot (a_{2\_} + 0.1 \cdot b'_2) \cdot 10^{-4} = 9.495$$

### 3 РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

#### 3.1 Втрати короткого замикання

Маса металу обмоток, кг:

Коефіцієнт відносної густини для міді  $k_{\gamma} := 28$

$$G_{01} := 1.5 \cdot k_{\gamma} \cdot (D'_1 + D''_1) \cdot W_1 \cdot \Pi_1 \cdot 10^{-5} = 404.043$$

$$G_{02} := 1.5 \cdot k_{\gamma} \cdot (D'_2 + D''_2) \cdot W_{2H} \cdot \Pi_2 \cdot 10^{-5} = 606.257$$

Загальна маса металу обмоток

$$G_0 := G_{01} + G_{02} \cdot \frac{W_{2H} + 2 \cdot W_P}{W_{2H}} = 1.041 \times 10^3$$

Основні електричні втрати в обмотках, Вт

Коефіцієнт приведення ваги до її опору, для міді  $k_- := 2.4$

$$P_{ел10} := k_- \cdot \Delta_1^2 \cdot G_{01} = 1.405 \times 10^4$$

$$P_{ел20} := k_- \cdot \Delta_2^2 \cdot G_{02} = 1.478 \times 10^4$$

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

Для обмотки НН:

Число провідників в обмотці, укладених в осьовому напрямку

$$m_1 := n_{k1} = 44$$

Коефіцієнт Роговського  $K_p := 0.95$

$$\beta_1 := 0.1 \cdot \frac{b_1 \cdot m_1}{l_1} \cdot K_p = 0.638$$

Коефіцієнт збільшення втрат активної потужності за рахунок додаткових втрат:

Питомий електричний опір, для міді  $\rho := 0.02135$

Число окремих провідників обмотки, укладених в радіальному напрямку

$$n_1 := n_{B1} \cdot W_{k1cp} = 9.591$$

$$k_{д1} := 1 + 1.73 \cdot \beta_1^2 \cdot \left( \frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot (a_{1-})^4 \cdot (n_1^2 - 0.2) \cdot 10^{-4} = 1.053$$

Для обмотки ВН:

$$m_2 := n_{k2} = 44$$

$$\beta_2 := 0.1 \cdot \frac{b_2 \cdot m_2}{l_{2\_}} \cdot K_p = 0.617$$

Коефіцієнт збільшення втрат активної потужності за рахунок додаткових втрат:

$$n_2 := n_{в2} \cdot W_{2\text{коср}} = 16.083$$

$$a_{2\_} := 2.5$$

$$k_{д2} := 1 + 1.73 \cdot \beta_2^2 \cdot \left( \frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 \cdot (a_{2\_})^4 \cdot (n_2^2 - 0.2) \cdot 10^{-4} = 1.036$$

Повні електричні втрати в обмотках:

$$P_{ел1} := k_{д1} \cdot P_{ел10} = 1.48 \times 10^4$$

$$P_{ел2} := k_{д2} \cdot P_{ел20} = 1.532 \times 10^4$$

Дійсні густини теплових потоків на поверхні охолодження обмоток:

$$q_1 := \frac{P_{ел1}}{\Pi_{01}} = 1.304 \times 10^3$$

$$q_2 := \frac{P_{ел2}}{\Pi_{02}} = 1.614 \times 10^3$$

Довжина проводів відводів для з'єднання «зірка» Y та «трикутник»:

$$l_{відв1} := 14 \cdot l_1 = 826$$

$$l_{відв2} := 7.5 \cdot l_{2\_} = 432$$

Маса металу відводів обмоток:

$$G_{відв1} := \frac{10^{-5} \cdot l_{відв1} \cdot \Pi_1 \cdot k_\gamma}{\pi} = 4.093$$

$$G_{відв2} := \frac{10^{-5} \cdot l_{відв2} \cdot \Pi_2 \cdot k_\gamma}{\pi} = 0.797$$

Електричні втрати у відводах (з'єднувальних провідниках між обмотками і вводами та між обмотками сусідніх фаз):

$$P_{\text{відв1}} := k_{-} \cdot \Delta_1^2 \cdot G_{\text{відв1}} = 142.338$$

$$P_{\text{відв2}} := k_{-} \cdot \Delta_2^2 \cdot G_{\text{відв2}} = 19.435$$

Втрати в стінках бака, які виникають в них від полів розсіювання:

$$K_{\delta} := 0.025 \quad \text{в трансформаторах з } S_{\text{ном}} > 1000 \text{ (кВА)}$$

$$P_{\delta} := 10 \cdot K_{\delta} \cdot S_{\text{ном}} = 1 \times 10^3$$

Повні втрати короткого замикання:

$$P_k := P_{\text{ел1}} + P_{\text{ел2}} + P_{\text{відв1}} + P_{\text{відв2}} + P_{\delta} = 3.128 \times 10^4$$

Похибка втрат короткого замикання:

$$\Delta P_k := \frac{P_k - P_{\text{кз}}}{P_{\text{кз}}} \cdot 100 = -6.621$$

Враховуючи, що розрахункові втрати менші заданих, розрахунок здійснено вірно

### 3.2 Напряга короткого замикання

Активна складова напруги короткого замикання:

$$U_a := \frac{P_k}{10 \cdot S_{\text{ном}}} = 0.782$$

Середній діаметр двох обмоток:

$$a_{12\_} := 2.7$$

$$d_{12} := D''_1 + a_{12\_} = 47.201$$

Приведена ширина каналу розсіювання між обмотками ВН та НН:

$$\delta_{\text{екр}} := 0.3$$

$$a_{1\_} = 3.501 \quad a_2 = 2.5$$

$$a_p := a_{12\_} + \delta_{\text{екр}} + \frac{a_{1\_} + a_2}{3} = 5$$

Відносна ширина обмоток:

$$\sigma := \frac{a_{12} + \delta_{\text{екр}} + a_1 + a_2}{\pi \cdot L} = 0.049$$

Дійсне значення коефіцієнта Роговського:

$$K_p := 1 - \sigma \cdot \left( 1 - e^{-\frac{1}{\sigma}} \right) = 0.951$$

Дійсне значення напруги одного витка:

$$U_B := \frac{U_{1\text{фном}} \cdot 10^3}{W_1} = 29.858$$

Середня висота обмоток:

$$l_{\text{сер}} := \frac{l_1 + l_2}{2} = 58.3$$

Абсолютна величина розриву між пів обмотками:

$$l'_x := 0.2 \cdot n_{\text{рс}} \cdot b'_2 + 2 \cdot n_{\text{рс}} \cdot h_k + h_{\text{кр}} = 3.8$$

Відносна величина розриву:

$$x := \frac{l'_x}{l_{\text{сер}}} = 0.065$$

Коефіцієнт, що враховує наявність розриву між пів обмотками:

$$k_q := 1 + \frac{l_{\text{сер}} \cdot x^2}{3 \cdot a_p \cdot K_p} = 1.017$$

Реактивна складова напруги короткого замикання:

$$U_p := \frac{8.26 \cdot f \cdot S_{\text{ном}} \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p \cdot k_q}{U_B^2 \cdot l_{\text{сер}}} \cdot 10^{-3} = 7.251$$

Повна напруга короткого замикання:

$$U_k := \sqrt{U_a^2 + U_p^2} = 7.293$$

$$\Delta U_k := \frac{U_{\text{кз\%}} - U_k}{U_{\text{кз\%}}} \cdot 100 = 2.764$$

#### 4 МЕХАНІЧНІ СИЛИ І НАПРУТИ В ОБМОТКАХ

Ударний коефіцієнт

$$k_{уд} := 1 + e^{-\frac{\pi \cdot U_a}{U_p}} = 1.713$$

Повздовжня складова поля розсіювання  $F_p$ , що прагне стиснути внутрішню обмотку і розтягнути зовнішню

$$F_p := 52.6 \cdot \frac{S_{ном} \cdot U_p \cdot k_{уд}^2 \cdot 10^4}{f \cdot a_p \cdot U_k^2} = 3.365 \times 10^6$$

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

$$F'_{ос1} := \frac{a_p}{2 \cdot l_1} \cdot F_p = 1.426 \times 10^5$$

$$F'_{ос2} := \frac{a_p}{2 \cdot l_2} \cdot F_p = 1.426 \times 10^5$$

Ширина бака

Ізоляційні відстані

$$S_1 := 5 \quad S_2 := 2 \quad S_3 := 5 \quad S_4 := 5$$

Еквівалентні діаметри відводів обмоток НН і ВН

$$d_1 := 0.113 \cdot \sqrt{\Pi_1} = 0.843$$

$$d_2 := 0.113 \cdot \sqrt{\Pi_2} = 0.514$$

$$B := D''_2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2 = 72.858$$

Відстань від стержня до стінки бака

$$l'' := \frac{B - d}{2} = 19.429$$

Відстань між крайніми котушками зі струмом при відключенні всіх регулювальних витків:

$$l''_x := 0.4 \cdot n_{pc} \cdot b'_2 + 4 \cdot n_{pc} \cdot h_k + h_{kp} = 6.4$$

Осьова сила  $F''_{oc}$  викликається появою додаткового поперечного поля внаслідок нерівномірного розподілу струму по висоті обмотки ВН при відключенні регулювальних витків. Напрямок цієї сили в обмотці НН співпадає з  $F'_{oc}$ , а в обмотці ВН вона діє їй назустріч. Значення цієї сили для неперервної обмотки ВН визначається наступним чином:

$$F''_{oc1} := \frac{l''_x \cdot F_p}{4 \cdot l'' \cdot K_p} = 2.917 \times 10^5$$

$$F''_{oc2} := F''_{oc1} = 2.917 \times 10^5$$

Сумарні стискаючі сили, які діють на обмотки:

$$F_{ст1} := F'_{oc1} + F''_{oc1} = 4.343 \times 10^5$$

$$F_{ст2} := F'_{oc2} - F''_{oc2} = -1.491 \times 10^5$$

Напруження на розрив у проводі обмоток

$$\sigma_{p1} := \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot W_1 \cdot \Pi_1} = 45.652$$

$$\sigma_{p2} := \frac{F_p}{2 \cdot \pi \cdot W_{2H} \cdot \Pi_2} = 38.217$$

Напруження стиску на опорних поверхнях гвинтової і неперервної обмоток, утворених міжкотушечними прокладками з електрокартону:

Ширина прокладки  $t := 60$

Число прокладок по колу обмотки, що приймається рівним 12 при  $S_H=4000$  кВА.

$$n_{\Pi\_} := 12$$



$$\sigma_{\text{CT1}} := \frac{F_{\text{CT1}}}{10 \cdot a_{1\_} \cdot t \cdot n_{\text{П\_}}} = 17.231$$

$$\sigma_{\text{CT2}} := \frac{F_{\text{CT2}}}{10 \cdot a_{2\_} \cdot t \cdot n_{\text{П\_}}} = -8.284$$

## 5 РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ

### 5.1 Маса магнітної системи

Маса сталі стержнів у межах вікна магнітної системи:

Густина сталі  $\gamma_{\text{CT}} := 7650$

$$G'_c := 3 \cdot \Pi_c \cdot l_{\text{сер}} \cdot \gamma_{\text{CT}} \cdot 10^{-6} = 1.096 \times 10^3$$

Маса сталі одного кута магнітної системи:

$i := 0..9$

$g_{c_i}$  - ширина частин пакетів стержня і ярма, що стикуються

$g_{c_i} :=$	$g_{я_i} :=$	$h_i :=$
32.5	32.5	5
31	31	1.9
29.5	29.5	1.5
27	27	1.9
25	25	1.2
23	23	1
19.5	19.5	1.4
15.5	19.5	1.1
13.5	19.5	0.6

$$G_K := 2 \cdot K_3 \cdot \gamma_{\text{CT}} \cdot 10^{-6} \cdot \sum_{i=0}^9 (g_{c_i} \cdot g_{я_i} \cdot h_i) = 179.567$$

Маса сталі у місцях стику пакетів стержня і ярма:

$$G''_c := 3 \cdot \left( \Pi_c \cdot g_{c_1} \cdot \gamma_{\text{CT}} \cdot 10^{-6} - G_K \right) = 44.3$$

Маса сталі стержнів:

$$G_c := G'_c + G''_c = 1.141 \times 10^3$$

Відстань між осями сусідніх стержнів:

$$L_c := \text{round}(D''_2 + a_{12}) = 57$$

Активний переріз ярма:

$$\Pi_{\text{фя}} := 860.8$$

$$\Pi_{\text{я}} := K_3 \cdot \Pi_{\text{фя}} = 834.976$$

Маса сталі ярем між осями крайніх стержнів:

$$G'_я := 4 \cdot L_c \cdot \Pi_{\text{я}} \cdot \gamma_{\text{СТ}} \cdot 10^{-6} = 1.456 \times 10^3$$

Маса сталі ярем в кутках крайніх стержнів:

$$G''_я := 2 \cdot G_k = 359.134$$

Маса сталі ярем:

$$G_я := G'_я + G''_я = 1.815 \times 10^3$$

Повна маса сталі:

$$G_{\text{СТ}} := G_c + G_я = 2.956 \times 10^3$$

## 5.2 Втрати холостого ходу

Дійсне значення індукції в стержні:

$$B_c := \frac{U_{1\text{фном}} \cdot 10^3}{4.44 \cdot f \cdot W_1 \cdot \Pi_c \cdot 10^{-4}} = 1.641$$

Дійсне значення індукції в ярмі:

$$B_я := \frac{B_c \cdot \Pi_c}{\Pi_я} = 1.611$$

Для пластин, які відпалюються після механічної обробки, втрати холостого ходу:

Коефіцієнт, що враховує збільшення втрат внаслідок пресовки пластин стержнів і ярем

$$k_{\text{ПШ}} := 1.03$$

Коефіцієнт, що враховує необхідність перешихтовки верхнього ярма для установки обмоток	$k_{\text{ПШ}} := 1.04$
Коефіцієнт, що враховує збільшення втрат за рахунок різки пластин сталі	$k_{\text{Пр}} := 1.05$
Питомі втрати в стержні, для дійсної індукції в стержні	$P_c := 1.411$
Питомі втрати в ярмі:	$P_y := 1.295$
Коефіцієнта збільшення втрат в стиках	$k_{\text{УП}} := 8.58$
Питомі втрати в зоні стиків:	$P'_3 := 0.0475$
	$P''_3 := 0.1044$

Стики  $n'_3 := 6$   $n''_3 := 0$

$$P_{\text{ХХ}} := k_{\text{ПШ}} \cdot k_{\text{ПШ}} \cdot \left[ k_{\text{Пр}} \cdot \left[ P_c \cdot G_c + P_y \cdot (G'_y - 4 \cdot G_k) \dots \right] \dots \right] = 5.48 \times 10^3$$

$$\left[ \begin{array}{l} + 0.5 \cdot k_{\text{УП}} \cdot G_k \cdot (P_c + P_y) \\ + n'_3 \cdot P'_3 \cdot \Pi_c + n''_3 \cdot P''_3 \cdot \Pi_c \end{array} \right]$$

$P_0 := 5948$

Розраховані втрати холостого ходу не повинні перевищувати задані не більше чим на 7,5 %:

$$\delta_{\text{ХХ}} := \frac{P_{\text{ХХ}} - P_0}{P_0} \cdot 100 = -7.864$$

### 5.3 Струм холостого ходу

Для пластин, які відпалюються після механічної обробки, намагнічувальна потужність:

Коефіцієнт, що враховує пресовку пластин  $k_{\text{ТП}} := 1.05$

Коефіцієнт, що враховує перешихтовку верхнього ярма  $k_{\text{ТШ}} := 1.07$

Коефіцієнт, що враховує різку пластин  $k_{\text{ТР}} := 1.18$

$k_{\text{УТ}} := 28$   $k_{\text{ТПЛ}} := 1.2$

Питомі намагнічуючі потужності, для тих же значень індукції, для яких знаходились відповідні питомі втрати

$$q_c := 2.131 \quad q_{\text{я}} := 1.87 \quad q'_3 := 0.34 \quad q''_3 := 2.67$$

$$Q_0 := k_{\text{ТП}} \cdot k_{\text{ТШ}} \cdot \left[ k_{\text{ТР}} \cdot \left[ q_c \cdot G_c + q_{\text{я}} \cdot (G'_{\text{я}} - 4 \cdot G_k) \dots \right. \right. \\ \left. \left. + 0.5 \cdot k_{\text{УТ}} \cdot k_{\text{ТШЛ}} \cdot G_k \cdot (q_c + q_{\text{я}}) \dots \right. \right. \\ \left. \left. + n'_3 \cdot q'_3 \cdot \Pi_c + n''_3 \cdot q''_3 \cdot \Pi_c \right. \right. \left. \left. \right] = 2.327 \times 10^4$$

Активна складова струму холостого ходу

$$I_{0a} := \frac{P_{\text{XX}}}{3 \cdot U_{1\text{фном}} \cdot 10^3} = 0.29$$

$$i_{0a} := \frac{P_{\text{XX}}}{10 \cdot S_{\text{НОМ}}} = 0.137$$

Реактивна складова струму холостого ходу:

$$I_{0p} := \frac{Q_0}{3 \cdot U_{1\text{фном}} \cdot 10^3} = 1.231$$

$$i_{0p} := \frac{Q_0}{10 \cdot S_{\text{НОМ}}} = 0.582$$

Повний струм холостого ходу:

$$I_0 := \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0p}^2} = 1.265$$

$$i_0 := \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2} = 0.598$$

Струм XX з ОРТР

$$i_{0\%} := 0.522$$

Обчислимо похибку струму холостого ходу:

$$\delta_{0\text{XX}} := \frac{i_{0\%} - i_0}{i_{0\%}} \cdot 100 = -14.496$$

## 6 ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

### 6.1 Розрахунок температурного перепаду між обмотками і маслом

Температурний перепад між центром перерізу обмотки і зовнішньою поверхнею для НН та ВН відповідно:

Теплопровідність ізоляції провода  $\lambda_{i3} := 0.0017$

$\delta_i := 0.25$

$$\theta_{o1} := \frac{q_1 \cdot \delta_i \cdot 10^{-5}}{\lambda_{i3}} = 1.917$$

$$\theta_{o2} := \frac{q_2 \cdot \delta_i \cdot 10^{-5}}{\lambda_{i3}} = 2.373$$

Середній перепад всередині всієї обмотки:

$$\theta_{оср1} := \frac{2}{3} \cdot \theta_{o1} = 1.278$$

$$\theta_{оср2} := \frac{2}{3} \cdot \theta_{o2} = 1.582$$

Перепад температури між поверхнею обмотки і маслом:

$k_1 := 1$        $k_2 := 1.1$        $k_3 := 0.95$

$$\theta_{пом1} := 0.35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q_1^{0.6} = 27.057$$

$$\theta_{пом2} := 0.35 \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot q_2^{0.6} = 30.753$$

Середнє перевищення температури обмотки над маслом:

$$\theta_{омср1} := \theta_{оср1} + \theta_{пом1} = 28.335$$

$$\theta_{омср2} := \theta_{оср2} + \theta_{пом2} = 32.335$$

### 6.2 Вибір і розрахунок системи охолодження

Для розрахунку системи охолодження визначимо мінімальні розміри бака:

Довжина:

$$L_{\zeta} := 2 \cdot L_c + D^2 + 2 \cdot (S_3 + S_2 + d_2) = 183.53$$

Ширина:

$$B_{\zeta} := D^2 + S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + d_1 + d_2 = 72.858$$

Висота:

Ширина першого пакета ярма  $H_{\text{я}} := 32.5$

Товщина опорного бруса під нижнім ярмом  $H_{\text{яд}} := 5$

Відстань від верхнього ярма до кришки бака  $H_{\text{як}} := 40$

$$H_{\zeta} := l_{\text{сер}} + 2 \cdot H_{\text{я}} + H_{\text{яд}} + H_{\text{як}} = 168.3$$

Площа поверхні випромінювання бака, що має овальну форму

коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні  
випромінювання бака з трубами і з радіаторами  
порівняно з гладким баком  $k_{\text{вип}} := 1.7$

$$P_{\text{вип}} := [2 \cdot (L_{\zeta} - B_{\zeta}) + \pi \cdot B_{\zeta}] \cdot H_{\zeta} \cdot k_{\text{вип}} \cdot 10^{-4} = 12.882$$

Необхідний перепад температури між баком та повітрям:

$\theta_{\text{омср}} := \theta_{\text{омср1}} = 28.335$  – більше з двох значень,  
розрахованих для обмоток НН і ВН

Перепад температури на поверхнях «масло-бак»  $\theta_{\text{мб}} := 5$

Гранично допустимий перепад температури  
обмоток над оточуючим повітрям  $\theta_{\text{опдоп}} := 65$

$$\theta_{\zeta\text{пн}} := \theta_{\text{опдоп}} - \theta_{\text{омср}} - \theta_{\text{мб}} = 31.665$$

Знайдене значення має задовольняти умову:

$$1.2 \cdot \theta_{\zeta\text{пн}} + \theta_{\text{мб}} = 42.998 < 60$$

Необхідна площа поверхні конвекції:

$$\Pi_{\text{кн}} := \frac{1.05 \cdot (P_0 + P_k)}{2.5 \cdot \theta_{\text{бпн}}^{1.25}} - 1.12 \cdot \Pi_{\text{вип}} = 193.742$$

### 6.3 Розрахунок поверхні охолодження

Площа поверхні конвекції труб

$$\Pi_{\text{ктр}} := 22.9$$

Площа поверхні конвекції колекторів радіатора

$$\Pi_{\text{кк}} := 0.66$$

Маса масла в одному радіаторі

$$G_M := 276$$

Площа конвекції стінок гладкого баку:

$$\Pi_{\text{кгл}} := [2 \cdot (L_{\text{б}} - B_{\text{б}}) + \pi \cdot B_{\text{б}}] \cdot H_{\text{б}} \cdot 10^{-4} = 7.577$$

Площа конвекції кришки гладкого баку:

$$\Pi_{\text{кр}} := [(L_{\text{б}} - B_{\text{б}}) \cdot B_{\text{б}} + 0.25 \cdot \pi \cdot B_{\text{б}}^2] \cdot 10^{-4} = 1.223$$

Число радіаторів:

Коефіцієнти, що враховують збільшення тепловіддачі відповідними елементами охолодження трансформатора в сукупності.

$$k_{\text{фгл}} := 1.6 \quad k_{\text{фкр}} := 1.6 \quad k_{\text{фк}} := 1.6 \quad k_{\text{фтр}} := 2.24$$

$$n_{\text{рад}} := \frac{\Pi_{\text{кн}} - \Pi_{\text{кгл}} \cdot k_{\text{фгл}} - \Pi_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}}}{\Pi_{\text{ктр}} \cdot k_{\text{фтр}} + \Pi_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}} = 3.432$$

$$n_{\text{рад}} := 4$$

Повна площа поверхні конвекції баку з радіаторами:

$$\Pi_{\text{кд}} := \Pi_{\text{кгл}} \cdot k_{\text{фгл}} + \Pi_{\text{кр}} \cdot k_{\text{фкр}} + n_{\text{рад}} \cdot (\Pi_{\text{ктр}} \cdot k_{\text{фтр}} + \Pi_{\text{кк}} \cdot k_{\text{фк}}) = 223.489$$

### 6.4 Визначення фактичних перегрівів

Середній перегрів стінки баку над повітрям:

$$\theta_{\text{бп}} := \left[ \frac{1.05 \cdot (P_0 + P_k)}{2.8 \cdot \Pi_{\text{вип}} + 2.5 \cdot \Pi_{\text{кд}}} \right]^{0.8} = 28.456$$

Середній перегрів масла над стінкою баку з радіаторами:

$$\theta_{\text{мб}_-} := 0.165 \cdot k_1 \cdot \left[ \frac{1.05 \cdot (P_0 + P_k)}{\Pi_{\text{кгл}} + \Pi_{\text{кр}} + (\Pi_{\text{ктр}} + \Pi_{\text{кк}}) \cdot n_{\text{рад}}} \right]^{0.6} = 5.82$$

Перегрів верхніх шарів масла над повітрям:

$$1.2 \cdot (\theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}}) = 40.147 < 60$$

Перегрів обмоток над повітрям:

$$\theta_{\text{оп1}} := \theta_{\text{омср1}} + \theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}} = 61.791$$

$$\theta_{\text{оп2}} := \theta_{\text{омср2}} + \theta_{\text{бп}} + \theta_{\text{мб}} = 65.791$$



## Додаток В

### Розрахунок оптимального варіанта виконання трансформатора в ORTR

Дані індивідуального завдання

$S_{н}$ , кВА	Лінійна напруга, кВ		Схема і група з'єднання обмоток	Втрати, Вт		Струм х.х. %	Напруга к.з. %	Матеріал обмоток
	ВН	НН		х.х.	к.з.			
4000	35	6,3	Y / Δ – 11	5700	33500	1	7,5	Cu

### Підготовка даних

Прізвище, ім'я, по-батькові, група, варіант завдання								
$S_{ном}$ , кВА	$P_k$ , Вт	$u_k$ , %	$P_0$ , Вт	$i_0$ , %	$u_{ка}$ , %	$u_{кр}$ , %	$V_c$ , ТЛ	
а	$a_{01}$	$a_{12}$	$a_{22}$	$I_0$	$K_s$	$K_{smin}$	$K_{smax}$	$\Delta K_s$
$K_c$	$d_1$ , см	$d_2$ , см	$d_3$ , см	$d_4$ , см	$d_5$ , см	$d_6$ , см	$d_7$ , см	$d_8$ , см
$K_p$	$K_{я}$	$K_d$	$N_0$	$K_{ip}$	$K_o$	$C_o$	$K_{отх}$	$K_{цд}$
$K_{тд}$	$K'_{тд}$	$K_{т.пл}$	$K_{\Delta}$	$K_{\sigma}$	$\Delta_{ср.доп}$	$\sigma_{р.доп}$		
/-/	J = 1	J = 2	J = 3	J = 4				
$C_{ст}$								
$K_{ст}$								
$P_c$								
$P_{я}$								
$Q_c$								
$Q_{я}$								
$q'_{з}$								
$q''_{з}$								
/-/	T = 1	T = 2	T = 3					
$K_{уп} (J=1)$								
$K_{уп} (J=2)$								
$K_{уп} (J=3)$								
$K_{уп} (J=4)$								
$K_{ут}$								

$S_{н}$  – номінальна потужність трансформатора;

$P_k$  – втрати короткого замикання;

$P_0$  – втрати холостого ходу;

$i_0$  – струм холостого ходу;

$f$  – номінальна частота;

$U_a = \frac{P_K}{10 \cdot S_H}$ ;  $U_p = \sqrt{U_K^2 - U_a^2}$  – активна та реактивна складові напруги к.з.

$V_c$  – робоча індукція, що залежить від марки сталі магнітопроводу і потужності трансформатора (С. 18);

$a$  – коефіцієнт (С. 17);

$a_1$  та  $a_2$  – осьові розміри обмоток;

$l_0, a_{01}, a_{12}, a_{22}$  – ізоляційні відстані (табл. 1.5);

Коефіцієнт  $K_s$  (С. 18);

$K_c$  – коефіцієнт заповнення сталлю площі кола (С. 13, спочатку за оптимальним діаметром вибирається  $K_{кр}$  з табл. 1.2);

$d_1 \dots d_8$  – діаметри стержня магнітопроводу, що визначаються за потужністю трансформатора (табл. 1.3);

$K_p$  – коефіцієнт Роговського;

$K_d$  – коефіцієнт додаткових втрат (табл. 1.5 – вибирається за значенням потужності трансформатора);

$N_0$  – кількість витків сторони ВН (С. 19);

$K_0 C_0$  – вартість обмоткового проводу з врахуванням виготовлення ізоляції (табл. 1.6);

$K_{пд}, K_{тд}, K_{тд}^*$  – коефіцієнти збільшення втрат (табл. 1.10);

$K_{отх}$  – коефіцієнт, що враховує вартість відходів при розрізі рулонної сталю,

$K_{т.пл}$ , – коефіцієнти збільшення намагнічувальної потужності в вузлах магнітної системи (рис. 1.2, б);

$K_\Delta$  – коефіцієнт густини струму, що залежить від матеріалу обмотки (С. 27)

$K_\sigma$  – коефіцієнт, що визначає радіальні розміри обмоток (С. 27);

$\Delta_{ср.доп.}$  – допустима густина струму;

$\sigma_{ср.доп.}$  – допустимі механічні напруги в обмотках;

$C_{ст1} \dots C_{ст4}$  – ціна одного кілограма трансформаторної сталі, що визначається за потужністю трансформатора і маркою сталі (табл. 1.6);

$K_{ст1} \dots K_{ст4}$  – коефіцієнт, що враховує вартість виготовлення магнітопроводу й визначається за потужністю трансформатора і маркою сталі (табл. 1.6);

$P_{с1} \dots P_{с4}$  – питомі втрати в стержнях, що визначаються виходячи з марки сталі по величині індукції (табл. 1.8);

$P_{я1} \dots P_{я4}$  – питомі втрати в ярмах що визначаються виходячи з марки сталі за значеннями індукції (табл. 1.8);

$q_{с1} \dots q_{с4}$   $q_{я1} \dots q_{я4}$  – намагнічувальні потужності в районі прямих стиків (табл. 1.8);

$q'_3 \dots q'_3$  – питомі намагнічувальні потужності в районі косих стиків (табл. 1.8);

$q''_3, q''_3$  – коефіцієнти, що враховують збільшення втрат і намагнічувальної потужності, визначаються, виходячи з марки сталі, типів стиків, значення індукції (таблиця 1.8);

$K_{up}$  – коефіцієнт збільшення вартості проводу за рахунок наявності ізоляції;

$K_o$  – коефіцієнт, що враховує вартість вироблення обмоток з урахуванням вартості ізоляційних матеріалів і визначається за значенням потужності трансформатора і матеріалу проводу (табл. 1.6);

$C_o$  – ціна кілограма проводу (табл. 1.6);

### Результати розрахунку ORTR

SH = 4000	Pk = 33500	Uk = 7,5	P0 = 5700	I0 = 1	F = 50
Uka = 0,84	Kup = 7,45	Bc = 1,64	A = 1,4	A01 = 1,75	A12 = 2,7
L0 = 7,5	KS = 0,49	KSMIN = 0,46	KSMAX = 0,54	DKS = 0,016	KC = 0,891
D1 = 28	D2 = 30	D3 = 32	D4 = 34	D5 = 36	D6 = 38
D7 = 40	D8 = 42	KP = 0,95	KJA = 1,015	KD = 1,11	N0 = 2460
KIP = 1,06	K0 = 1,58	C0 = 1,34	KOTX = 1,055	KPD = 1,15	KTD = 1,28
KTD1 = 1,07	TKPL = 1,21	KDEL = 0,645	KSIG = 0,0000226		DCD = 4,5
SPD = 60					

	J = 1	J = 2	J = 3	J = 4
CCT =	0,8	0,88	0,9	0,96
KCT =	1,27	1,3	1,2	1,26
PC =	1,411	1,326	1,326	1,238
PJA =	1,353	1,278	1,278	1,194
QC =	2,131	1,894	2,012	1,775
QJA =	1,958	1,748	1,85	1,645
QZ1 =	0,4	0,37	0,4	0,37
QZ2 =	2,67	2,167	2,67	2,167

	T = 1	T = 2	T = 3	
J = 1	12,74	10,18	8,58	KUP
J = 2	13,13	10,45	8,75	KUP
J = 3	13,13	10,45	8,75	KUP
J = 4	13,52	10,64	8,85	KUP
KUT	65	40	27	

## Результати оптимального варіанту трансформатора

KS = 0,49

Марка сталі J = 1 3404 б=0.35 мм  
 Тип стиків Т = 3 прямих - 0 , косих - 6  
 Діаметр стержня D = 34 см  
 Довжина обмотки L = 57,034 см  
 Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 A5=8,885; A6=4,962; P4=808,956; U3=29,392;  
 L=61,27; G1=1324,372; G2=1885,638; G3=175,238;  
 G=3210,01; G0=1035,591; C=5764,853; P0=5836,56;  
 Q0=20685,33; F0=0,517; W=53,142

KS = 0,506

Марка сталі J = 1 3404 б=0.35 мм  
 Тип стиків Т = 3 прямих - 0 , косих - 6  
 Діаметр стержня D = 34 см  
 Довжина обмотки L = 58,145 см  
 Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 A5=9,175; A6=5,058; P4=808,956; U3=29,392;  
 L=61,85; G1=1344,981; G2=1900,196; G3=175,238;  
 G=3245,178; G0=1035,591; C=5802,548; P0=5892,653;  
 Q0=20778,03; F0=0,519; W=52,126

KS = 0,522

Марка сталі J = 1 3404 б=0.35 мм  
 Тип стиків Т = 3 прямих - 0 , косих - 6  
 Діаметр стержня D = 34 см  
 Довжина обмотки L = 59,257 см  
 Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 A5=9,465; A6=5,155; P4=808,956; U3=29,392;  
 L=62,43; G1=1365,591; G2=1914,755; G3=175,238;  
 G=3280,346; G0=1035,591; C=5840,244; P0=5948,748;  
 Q0=20870,74; F0=0,522; W=51,148

KS = 0,538

Марка сталі J = 1 3404 б=0.35 мм  
 Тип стиків Т = 3 прямих - 0 , косих - 6  
 Діаметр стержня D = 34 см  
 Довжина обмотки L = 60,368 см  
 Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 A5=9,755; A6=5,252; P4=808,956; U3=29,392;  
 L=63,01; G1=1386,2; G2=1929,313; G3=175,238;  
 G=3315,514; G0=1035,591; C=5877,94; P0=6004,841;  
 Q0=20963,44; F0=0,524; W=50,206

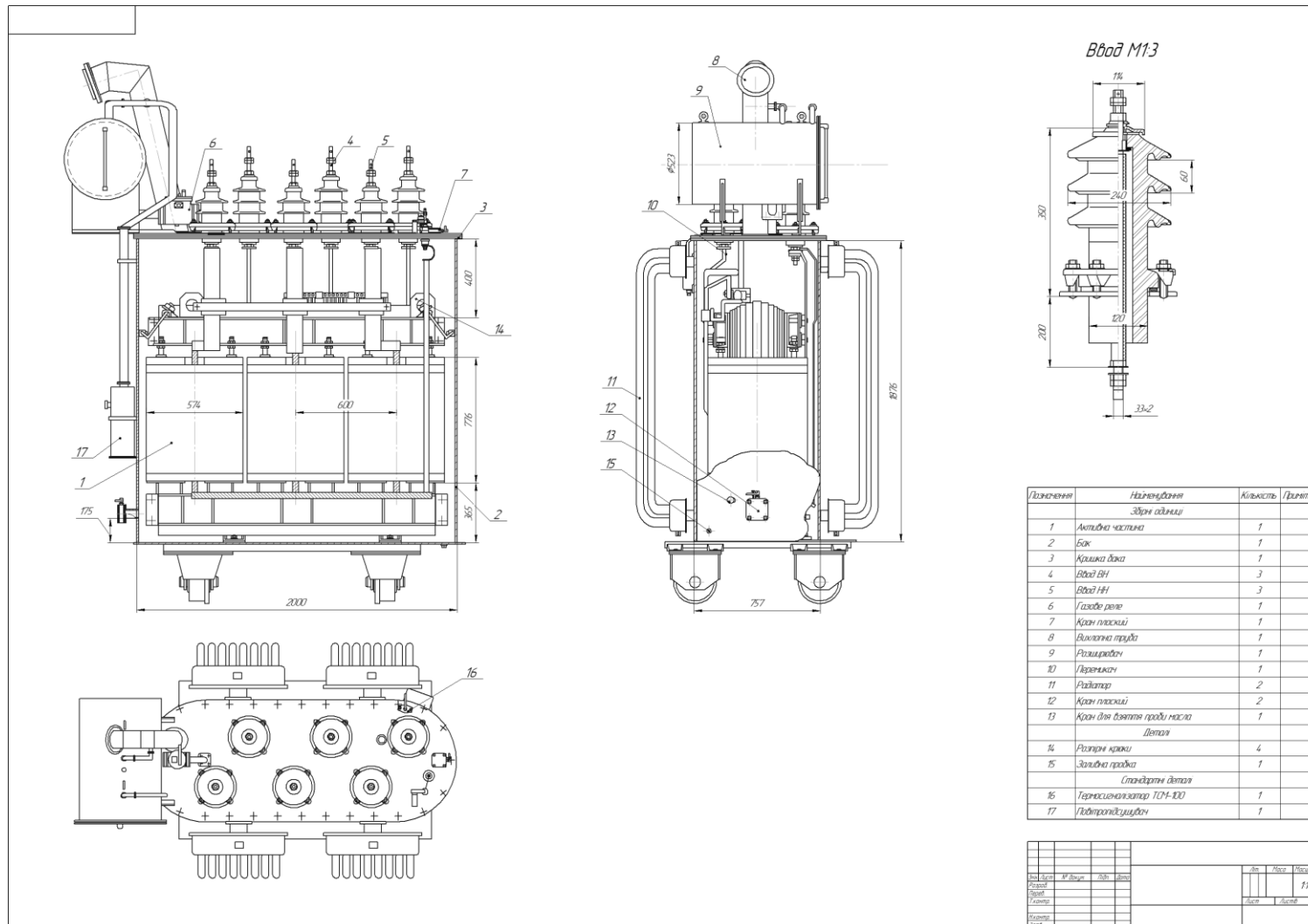
KS = 0,554

Марка сталі J = 1 3404 б=0.35 мм  
 Тип стиків Т = 3 прямих - 0 , косих - 6  
 Діаметр стержня D = 34 см  
 Довжина обмотки L = 61,48 см  
 Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 A5=10,045; A6=5,348; P4=808,956; U3=29,392;  
 L=63,59; G1=1406,81; G2=1943,871; G3=175,238;  
 G=3350,681; G0=1035,591; C=5915,635; P0=6060,935;  
 Q0=21056,14; F0=0,526; W=49,299

$$k_s = 0,57$$

Марка сталі  $J = 1$  3404  $\delta = 0.35$  мм  
Тип стиків  $T = 3$  прямих - 0 , косих - 6  
Діаметр стержня  $D = 34$  см  
Довжина обмотки  $L = 62,592$  см  
Густина струму DELTA = 3,482 А/мм<sup>2</sup>  
 $A_5 = 10,335$ ;  $A_6 = 5,445$ ;  $P_4 = 808,956$ ;  $U_3 = 29,392$ ;  
 $L = 64,171$ ;  $G_1 = 1427,419$ ;  $G_2 = 1958,43$ ;  $G_3 = 175,238$ ;  
 $G = 3385,849$ ;  $G_0 = 1035,591$ ;  $C = 5953,331$ ;  $P_0 = 6117,029$ ;  
 $Q_0 = 21148,84$ ;  $F_0 = 0,529$ ;  $W = 48,423$

## Додаток Г Приклад креслення



*Навчальне електронне видання  
комбінованого використання.  
Можна використовувати в локальному та мережному режимах*

**Михайло Петрович Розводюк  
Дмитро Петрович Проценко  
Вадим Сергійович Бомбик  
Олексій Анатолійович Жуков**

# **Розрахунок і проектування трифазного силового масляного трансформатора. Курсове проектування**

Навчальний посібник

Рукопис оформив *М. Розводюк*

Редактор *Т. Старічек*

Оригінал-макет виготовила *Т. Старічек*

Підписано до видання 06.03.2023 р.  
Гарнітура Times New Roman.  
Зам. № P2023-028.

Видавець та виготовлювач  
Вінницький національний технічний університет,  
Редакційно-видавничий відділ.  
ВНТУ, ГНК, к. 114.  
Хмельницьке шосе, 95,  
м. Вінниця, 21021.  
Тел. (0432) 65-18-06.  
**press.vntu.edu.ua;**  
*Email: irvc.vntu@gmail.com*

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи  
серія ДК № 3516 від 01.07.2009 р.