

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»



О. Ю. Юр'єва, Т. Ю. Кунченко

ПРОЄКТУВАННЯ СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
З КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ

Харків 2023

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

О. Ю. Юр'єва, Т. Ю. Кунченко

**ПРОЄКТУВАННЯ
СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ**

НАВЧАЛЬНО-МЕТОДИЧНИЙ ПОСІБНИК
З КУРСОВОГО ПРОЄКТУВАННЯ

для студентів, що навчаються за спеціальністю
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Затверджено
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 2 від 28.06.23.

Харків
НТУ «ХПІ»
2023

УДК 621.313
Ю 85

Рецензенти: *В. Є. Плюгін*, д-р техн. наук, професор, Харківська національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова;

В. В. Шевченко, канд. техн. наук, доцент, Національний технічний університет «Харківський політехнічний інститут»

Юр'єва О. Ю.

Ю 85 Проектування силових трансформаторів : навчально-методичний посібник з курсового проектування для студентів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / О. Ю. Юр'єва, Т. Ю. Кунченко. – Х.: НТУ «ХПІ», 2023. – 76 с.

Навчально-методичний посібник містить методичне забезпечення, яке необхідно для проектування силових трифазних трансформаторів, їх розрахункової та конструкторської розробки при виконанні курсового або дипломного проекту.

Розраховано на студентів для студентів, що навчаються за спеціальністю «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка».

Іл. 25. Табл. 35. Бібліогр.: 12 назв.

УДК 621.313

© О. Ю. Юр'єва, Т. Ю. Кунченко, 2023

ВСТУП

Силові трансформатори є найрозповсюдженішими електростатичними пристроями, що застосовуються при передаванні електричної енергії. Вони перетворюють електричну енергію з одними величинами напруги та струму на електричну енергію з іншими величинами [1].

Через велику розгалуженість електричних мереж, які передають або розподіляють електричну енергію між споживачами, необхідна чотири-п'ятикратна трансформація напруги, для цього приходиться встановлювати велику кількість підвищувальних або знижувальних трансформаторів. Тому загальна сумарна потужність силових трансформаторів, що встановлені в мережах, перевищує сумарну потужність генераторів електростанцій в 7–8 разів.

Силові трансформатори поділяються на трансформатори загального та спеціального призначення. Силові трансформатори загального призначення призначені для вмикання до мережі або безпосереднього живлення приймачів електричної енергії, якщо ця мережі та струмоприймачі не відрізняються особливими умовами роботи, характером навантаженні або режимами роботи.

Конструктивні форми силових трифазних трансформаторів визначаються величинами номінальних напруг та струмів, умовами монтажу, характером зовнішнього середовища, умовами обслуговування [2, 3].

Метою курсового проєкту є ознайомлення студента з сучасними методами проєктування силових трифазних трансформаторів загального призначення, використання здобутих ним знань для розв'язання реальної інженерної задачі, а також отримання навичок самостійної роботи.

Курсовий проєкт складається з розрахункової та графічної частин.

Розрахункова частина повинна бути викладена у вигляді пояснювальної

записки на аркушах паперу формату А4 (297 x 210 мм) і зброшурована разом з рисунками (поперечний переріз трансформатора, головна ізоляція обмоток, схеми виконання регулювальних відгалужень, взаємне розташування обмоток вищої та нижчої напруги, магнітна система трансформатора, елементи бака трансформатора, характеристики трансформатора). Конструктивні елементи трансформатора приводяться на рисунках з дотриманням масштабу. Пояснювальна записка оформляється відповідно до вимог стандартів [4]. При використанні літерних позначень величин слід керуватися [5]. Позначення одиниць фізичних величин виконувати згідно [6, 7].

Графічна частина проєкту містить кресленик загального виду та деяких вузлів і деталей трансформатора. Всі кресленики повинні виконуватися відповідно до вимог стандартів [8–10]. Специфікації до креслеників виконуються на окремих аркушах формату А4 і підшиваються в кінці пояснювальної записки.

Кожен студент отримує індивідуальне завдання на проєктування силового трифазного трансформатора у вигляді технічних умов. Завдання містить номінальні дані трансформатора, вимоги до конструктивного виконання, до ступеню захисту від зовнішніх впливів, методу охолодження, кліматичних умов і категорії розміщення.

Проєктування силового трансформатора складається з основних розділів: вибір головної ізоляції, визначення головних розмірів, розрахунок обмотки нижчої напруги, розрахунок обмотки вищої напруги, розрахунок втрат та струму короткого замикання, розрахунок магнітної системи, розрахунок втрат та струму неробочого ходу, тепловий розрахунок, визначення характеристик, конструювання трансформатора. Причому конструювання виконується одночасно з розрахунком трансформатора для можливості корегування обраних геометричних розмірів за конструктивними міркуваннями. Кожний конструктивний елемент з отриманими геометричними розмірами повинен відобразитися на креслениках трансформатора.

При проєктуванні необхідно користуватись рекомендованою літературою, стандартами, технічними умовами та іншими матеріалами. У процесі проєктування трансформатора необхідно звертати увагу не тільки на особливості конструкції окремих деталей або вузлів, а також на технологію їхнього виготовлення.

Результати розрахунків та конструювання за кожним розділом курсового проєкту мають бути надані для перевірки керівнику. Це дає можливість вчасно виправити можливі помилки та організувати рівномірну роботу над проєктом протягом заданого строку виконання.

1. ТЕХНІЧНІ УМОВИ

1.1. Вихідні дані для проектування силового трифазного трансформатора
Номінальна повна потужність трансформатора S_N , кВ·А.

Номінальна лінійна напруга обмотки вищої напруги U_{hN} , кВ.

Номінальна лінійна напруга обмотки нижчої напруги U_{lN} , кВ.

Кількість фаз m .

Втрати неробочого ходу P_o , Вт.

Втрати короткого замикання P_k , Вт.

Напруга короткого замикання $u_{k\%}$, %.

Струм неробочого ходу i_o , %.

Частота мережі f_N , Гц.

Кількість ступеней регулювання вищої напруги – 2.

Межі регулювання (0,95–1,05) U_{hN} .

Схема з'єднань фазних обмоток: Y або Δ.

Конструктивна схема трансформатора – тристрижневий з концентричними обмотками.

Номінальний режим роботи відповідно до ДСТУ EN 60034–1.

Ступінь захисту від зовнішніх впливів відповідно до ДСТУ EN 60034–5.

Система охолодження відповідно до ДСТУ EN 60034–6.

Кліматичні умови та категорія розміщення відповідно до ГОСТ 15150 і ГОСТ 15543.1.

1.2. Базові трансформатори

У даному посібнику приводиться методика проектування силових трифазних ($m = 3$) трансформаторів з масляним охолодженням загального призначення номінальною потужністю від 25 до 6300 кВ·А класів напруги 1, 3, 6, 10, 15, 20, 35 кВ.

Для силових трифазних трансформаторів використовуються такі групи та схеми з'єднань: Y/Y₀–0; Y/Δ–11; Y₀/Δ–11; Δ/Y₀–11. Для матеріалу магнітопроводу пропонується застосовувати холоднокатану електротехнічну сталь марки 3404 або 3405 товщиною 0,35 мм.

2. РОЗРАХУНОК НОМІНАЛЬНИХ ВЕЛИЧИН

2.1. Номінальна потужність однієї фази трансформатора, кВ·А,

$$S_{\phi N} = \frac{S_N}{m}.$$

2.2. Номінальний лінійний струм обмотки вищої напруги, А,

$$I_{hN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{hN}}.$$

2.3. Номінальний лінійний струм обмотки нижчої напруги, А,

$$I_{lN} = \frac{S_N}{\sqrt{3} \cdot U_{lN}}.$$

2.4. Номінальний фазний струм обмотки вищої напруги, А:

• $I_{\phi hN} = I_{hN}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y;

• $I_{\phi lN} = \frac{I_{lN}}{\sqrt{3}}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ.

2.5. Номінальний фазний струм обмотки нижчої напруги, А:

• $I_{\phi lN} = I_{lN}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y;

• $I_{\phi hN} = \frac{I_{hN}}{\sqrt{3}}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ.

2.6. Номінальна фазна напруга обмотки вищої напруги, кВ:

• $U_{\phi hN} = \frac{U_{hN}}{\sqrt{3}}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y;

• $U_{\phi lN} = U_{lN}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ.

2.7. Номінальна фазна напруга обмотки нижчої напруги, кВ:

• $U_{\phi lN} = \frac{U_{lN}}{\sqrt{3}}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y;

• $U_{\phi hN} = U_{hN}$ при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ.

3. ВИБІР ТИПУ ОБМОТКИ ТА ГОЛОВНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ

3.1. Величини випробувальних напруг обмоток вищої напруги $U_{h\ test}$ та нижчої напруги $U_{l\ test}$ визначаються з табл. 3.1 за класом напруги, який, в свою чергу, визначається величинами напруг U_{hN} та U_{lN} відповідно.

Для обмоток нижчої напруги з номінальною напругою меншою за 1 кВ клас напруги приймається 1 кВ.

3.2. Ізоляційні відстані обмоток вищої та нижчої напруги обираються з табл. 3.2, 3.3 залежно від потужності S_N та напруг $U_{h\ test}$, $U_{l\ test}$.

Таблиця 3.1 – Випробувальна та найбільша робоча напруги

Клас напруги, кВ	1	3	6	10	15	20	35
Номінальна напруга, кВ	1	3	6	10	15	20	35
Випробувальна напруга, кВ	5	18	25	35	45	55	85
Найбільша робоча напруга, кВ	–	3,6	7,2	12,0	17,5	24	40,5

Таблиця 3.2 – Мінімальні ізоляційні відстані обмотки вищої напруги

Номінальна потужність S_N , кВ·А	Випробувальна напруга $U_{h\ test}$, кВ	Ізоляційні відстані, мм						
		l_{h2}	δ_{is}	a_{12}	δ_{12}	l_{h1}	a_{22}	δ_{22}
25–100	18; 25; 35	20	–	9	2,5	10	8	–
160–630	18; 25; 35	30	–	9	3	15	10	–
1000–6300	18; 25; 35	50	–	20	4	20	18	–
вище 630	45	50	2	20	4	20	18	2
вище 630	55	50	2	20	5	30	20	3
160–630	85	75	2	27	5	50	20	3
1000–6300	85	75	2	27	5	50	30	3

Таблиця 3.3 – Мінімальні ізоляційні відстані обмотки нижчої напруги

Номінальна потужність S_N , кВ·А	Випробувальна напруга $U_{l\ test}$, кВ	Ізоляційні відстані, мм				
		l_{l2}	δ_{11}	a_{10}	a_{11}	l_{l1}
25–250	5	15	1	–	4	–
400–630	5*	l_{h2}	1	–	5	–
1000–2500	5	l_{h2}	4	6	15	18
630–1600	18; 25; 35	l_{h2}	4	6	15	25
2500–6300	18; 25; 35	l_{h2}	4	8	17,5	25

Примітка: для гвинтової обмотки розміри беруться з наступного рядка.

3.3. Ізоляційні відстані зазначено на рис. 3.1. Осьові розміри обмоток нижчої a_l та вищої a_h напруг визначаються після розрахунку обмоток.

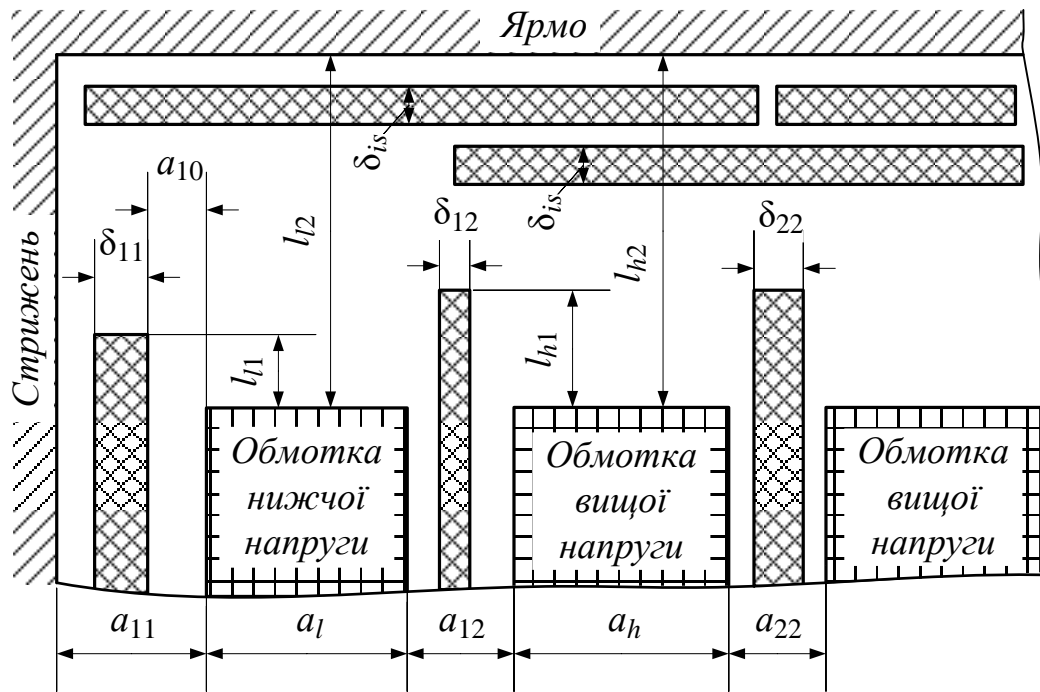


Рисунок 3.1 – Головна ізоляція обмоток

4. ВИЗНАЧЕННЯ ОСНОВНИХ РОЗМІРІВ

4.1. Коефіцієнт оптимального відношення середньої довжини кола каналу між обмотками до висоти обмотки β обирається з табл. 4.1. Рекомендується обирати менші значення коефіцієнта β при інших однакових умовах.

Таблиця 4.1 – Значення коефіцієнта оптимального відношення середньої довжини кола каналу між обмотками до висоти обмотки β

Номінальна потужність S_N , кВт·А	Номінальна напруга обмотки вищої напруги U_{hN} , кВ			
	матеріал обмотки – мідь		матеріал обмотки – алюміній	
	6; 10	35	6; 10	35
25–100	1,8–2,4	–	1,2–1,6	–
160–630	1,8–2,4	1,8–2,4	1,2–1,6	1,2–1,5
1000–6300	2,0–2,6	1,8–2,4	1,3–1,7	1,2–1,6

4.2. Попередні значення зведеної ширини обох обмоток, мм,

$$\frac{a_l + a_h}{3} \approx k_\sigma \cdot \sqrt[4]{S_{\varphi N}} \cdot 10,$$

де k_{σ} – коефіцієнт зведення для каналів розсіяння, визначається з табл. 4.2.

Таблиця 4.2 – Коефіцієнт зведення для каналів розсіяння трансформаторів

Номінальна потужність S_N , кВ·А	Клас напруги	
	до 10	35
до 250	0,63	0,8–0,74
400–530	0,53	0,65–0,58
1000–6300	0,51–0,43	0,52–0,48

Примітки: 1. Для обмоток з алюмінієвого проводу значення коефіцієнта k_{σ} помножити на 1,25.
2. При відхиленні заданих втрат короткого замикання від втрат, що встановлені стандартами, більше ніж на $\pm 10\%$ значення коефіцієнта зведення помножити на 0,96 для -10% або на 1,04 для $+10\%$.

4.3. Ширина зведеного каналу розсіювання, мм, $a_{\sigma} = a_{12} + \frac{a_l + a_h}{3}$.

4.4. Коефіцієнт зведення ідеального магнітного поля розсіяння до реального (коефіцієнт Роговського) $K_R = 0,95$.

4.5. Активна складова напруги короткого замикання, %, $u_{a\%} = \frac{P_k}{10 \cdot S_N}$.

4.6. Реактивна складова напруги короткого замикання, %, $u_{r\%} = \sqrt{u_{k\%}^2 - u_{a\%}^2}$.

4.7 Марка електротехнічної сталі для магнітопроводу трансформатора обирається 3404, 3405 товщиною 0,35 або 0,3 мм.

4.8. Попереднє значення магнітної індукції в стрижні B'_b обирається з табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Рекомендовані значення магнітної індукції в стрижні трансформатора

Величина	Значення	
Номінальна потужність S_N , кВ·А	25–100	більше 160
Магнітна індукція в стрижні B_b , Тл	1,55–1,60	1,55–1,85

4.9. Коефіцієнт заповнення сталлю площі кола, описаного навкруги поперечного перерізу стрижня, $k_s = k_{Fe} \cdot k_{lmb}$,

де k_{Fe} – коефіцієнт заповнення поперечного перерізу стрижня сталлю при

шихтуванні, для сталі товщиною 0,3 мм коефіцієнт k_{Fe} становить 0,96, для сталі товщиною 0,35 мм – 0,97;

k_{lmb} – коефіцієнт заповнення поперечного перерізу кола, описаного навкруги стрижня, при пакетуванні, визначається з табл. 4.4.

Таблиця 4.4 – Значення коефіцієнта заповнення поперечного перерізу кола, описаного навкруги стрижня, при пакетуванні k_{lmb} ; орієнтовний діаметр стрижня, залежно від номінальної потужності S_N

Номінальна потужність S_N , кВ·А	Коефіцієнт k_{lmb}	Орієнтовний діаметр стрижня d_c , мм
40–100	0,884	80–95
	0,913	100–140
160–630	0,917	150–200
1000–1600	0,909	290–320
	0,925	310–320
2500–6300	0,922	330–380

4.10. Розрахункове значення діаметра стрижня (діаметр описаного кола на-

вкруги стрижня), мм, $d_c = 90 \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{\phi N} \cdot a_{\sigma} \cdot \beta \cdot K_R}{f_N \cdot u_{r\%} \cdot B_b'^2 \cdot k_s^2}}$.

Отримане розрахункове значення діаметра стрижня d_c заокруглюється до найближчого нормалізованого діаметру d_n з ряду нормалізованих діаметрів: 80; 85; 90; 92; 95; 100; 105; 110; 115; 120; 125; 130; 140; 150; 160; 170; 180; 190; 200; 210; 220; 225; 230; 240; 250; 260; 270; 280; 290; 300; 310; 320; 330; 340; 350; 360; 370 мм.

4.11. Коефіцієнт оптимального відношення середньої довжини кола каналу між обмотками до висоти обмотки, що відповідає нормалізованому діаметру,

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

4.12. Попереднє значення радіального розміру обмотки нижчої напруги, мм, $a_l' = k_{is} \cdot \frac{a_l + a_h}{3}$,

де k_{is} – коефіцієнт, що враховує товщину ізоляції, для трансформаторів потужністю 25–1000 кВ·А становить 1,1; 1000–6300 кВ·А – 1,4.

4.13. Попереднє значення середнього діаметру каналу між обмотками, мм,
 $d'_{av} = d_n + 2a_{11} + a_{12} + 2a'_l$.

4.14. Попереднє значення висоти обмоток, мм, $l' = \frac{\pi \cdot d'_{av}}{\beta_n}$.

4.15. Повна площа поперечного перерізу стрижня S_{bf} визначається з табл.

4.5.

4.16. Активна площа поперечного перерізу стрижня, мм², $S_b = k_{Fe} \cdot S_{bf}$.

4.17. Попереднє значення ЕРС одного витка обмотки, В,

$$E'_c = \pi \sqrt{2} \cdot f_N \cdot B'_b \cdot S_b \cdot 10^{-6}.$$

4.18. Основні розміри трансформатора (рис. А.1.1) уточнюються після розрахунку обмоток вищої та нижчої напруг та магнітопроводу трансформатора.

Таблиця 4.5 – Площі поперечного перерізу стрижня S_{bf} та ярма S_{yf}

Діаметр стрижня d_n , мм	Площа поперечного перерізу стрижня S_{bf} , мм ²	Площа поперечного перерізу ярма S_{yf} , мм ²	Діаметр стрижня d_n , м	Площа поперечного перерізу стрижня S_{bf} , мм ²	Площа поперечного перерізу ярма S_{yf} , мм ²
80	4330	4480	210	31920	32720
85	5080	5160	220	35300	36050
90	5670	5820	230	38770	39400
95	6290	6370	240	41930	42560
100	7130	7250	250	45610	46250
105	7930	8010	260	49060	50290
110	8620	8970	270	53250	54330
115	9310	9610	280	57090	59110
120	10490	10650	290	61170	62210
125	11230	11530	300	63020	64020
130	12190	12490	310	70190	71560
140	14150	14400	320	74000	75560
150	16160	16580	330	79690	81970
160	18240	18660	340	84480	86080
170	20850	21410	350	87880	89320
180	23280	23760	360	95020	96580
190	26210	26560	370	95430	96790
200	28840	29260	380	105792	108552

5. РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ НИЖЧОЇ НАПРУГИ

5.1. Середня густина струму в обмотках, А/мм²,

$$J_{av} = k_k k_{ad} \cdot \frac{P_k \cdot E'_c}{S_N \cdot d'_{av}} \cdot 10.$$

де k_k – коефіцієнт, що враховує питомий опір матеріалу обмотки, становить для мідних обмоток 0,746, для обмоток з алюмінію 0,463,

k_{ad} – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати при короткому замиканні, визначається з табл. 5.1.

Отримане значення J_{av} повинно задовольняти умові: $J_{av} < \frac{u_{k\%}}{\sqrt{2}}$.

Таблиця 5.1 – Значення коефіцієнта, що враховує додаткові втрати при короткому замиканні, k_{ad} залежно від номінальної потужності S_N

Номінальна потужність S_N , кВ·А	Коефіцієнт k_{ad}
до 100	0,97
160–630	0,96–0,93
1000–6300	0,93–0,85

5.2. Попереднє значення площі поперечного перерізу витка обмотки нижчої напруги, мм²,

$$S'_{cl} = \frac{I_{\phi lN}}{J_{av}}.$$

5.3. Кількість витків на одну фазу

$$N_l = \frac{U_{\phi lN}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_N \cdot B'_b \cdot S_b} \cdot 10^9.$$

Кількість витків N_l для циліндричної обмотки повинна бути парною, для гвинтової та безперервної котушкової – цілою.

5.4. Уточнене значення ЕРС одного витка, В,

$$E_c = \frac{U_{\phi lN} \cdot 10^3}{N_l}.$$

5.5. Уточнене значення магнітної індукції в стрижні, Тл,

$$B_b = \frac{U_{\phi lN}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_N \cdot N_l \cdot S_b} \cdot 10^9.$$

5.6. За отриманими значеннями струму I_{IN} , напруги U_{IN} , площі поперечного перерізу S'_{cl} обрати тип обмотки з табл. Б.1.

Найчастіше для обмоток нижчої напруги застосовуються циліндричні обмотки з проводу прямокутного перерізу з кількістю шарів від 2 до 4 або гвинтові обмотки. При виборі циліндричної обмотки розрахунок здійснювати за п. 5.7, гвинтової – пп. 5.8 або 5.9.

5.7. Розрахунок циліндричної обмотки з проводу прямокутного перерізу (рис. 5.1)

5.7.1. Кількість шарів обмотки нижчої напруги n_{II} . Розпочинати розрахунок необхідно з обмотки з кількістю шарів $n_{II} = 2$. При невиконанні будь-якої з нижче наведених умов необхідно переходити на більшу кількість шарів обмотки, 3 або 4.

5.7.2. Кількість витків в одному шарі

$$N_{II} = \frac{N_I}{n_{II}}.$$

5.7.3 Попереднє значення осьового розміру витка обмотки нижчої напруги, мм,

$$h'_{cl} = \frac{l'}{N_{II} + 1}.$$

5.7.4. Попереднє значення радіального розміру витка обмотки нижчої напруги, мм,

$$a'_{cl} = \frac{S'_{cl}}{h'_{cl} - 0,5}.$$

Отримане значення не повинно перевищувати гранично допустимого радіального розміру проводу, при якому додаткові втрати не перевищують 5 %. Гранично допустимий радіальний розмір проводу визначається за табл. 5.2.

Таблиця 5.2 – Граничні радіальні розміри, мм, проводу прямокутного перерізу циліндричних обмоток, при якому додаткові втрати не перевищують 5 %

Кількість шарів обмотки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Матеріал обмотки – мідь	10,0	7,1	5,6	4,75	4,0	3,75	3,55	3,35	3,15	3,0
Матеріал обмотки – алюміній	11,6	8,6	6,4	5,9	5,1	4,7	4,4	4,1	3,8	3,3

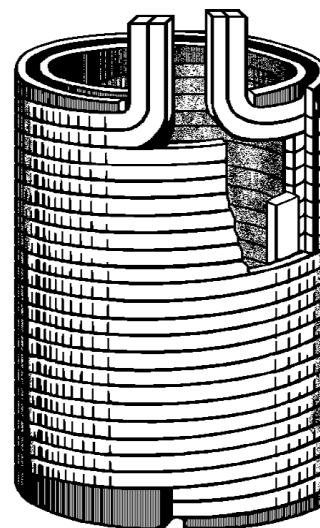


Рисунок 5.1 – Циліндрична двошарова обмотка з осьовим каналом з проводу прямокутного перерізу

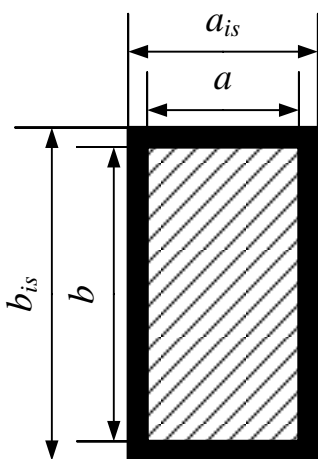


Рисунок 5.2 – Розміри витка обмотки з проводу прямокутного перерізу

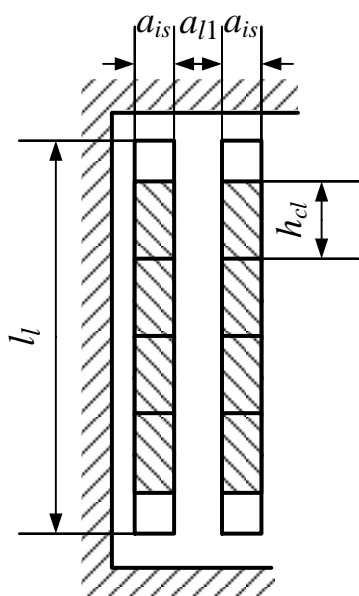


Рисунок 5.3 – Розміри циліндричної обмотки з осьовим каналом

5.7.5. За отриманими значеннями S'_{cl} , a'_{cl} та h_{cl} за табл. В.1 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_l та розмірами без ізоляції $a \times b$ та в ізоляції $a_{is} \times b_{is}$ (рис. 5.2). Двобічна товщина ізоляції проводу становить 0,5 мм.

Якщо в табл. В.1 провід відсутній, тоді виток розбивається на n_{bl} паралельних віток. Розбивати провідник на паралельні вітки можна тільки по висоті. В цьому разі стандартний провід обирається за площею поперечного перерізу $S_l = \frac{S'_{cl}}{n_{bl}}$ та осьовим розміром проводу $b_c = \frac{h'_c}{n_{bl}} - 0,5$.

Проводи паралельних віток розташовуються в осьовому напрямку (уздовж стрижня) (рис. 5.3). При намотуванні циліндричної обмотки з проводу прямокутного перерізу на ребро кількість паралельних віток не повинна перевищувати 8, при намотуванні плазом – 6.

При намотуванні обмотки на ребро осьовим розміром витка є менший розмір проводу, при намотуванні плазом – більший розмір проводу.

При намотуванні обмотки на ребро перевірити відношення радіального розміру проводу до осьового: $1,3 \leq \frac{a}{b} \leq 3$.

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі $n_{bl} \times \frac{a \times b}{a_{is} \times b_{is}} = 1 \times \frac{5,3 \times 9,0}{5,8 \times 9,5}$.

5.7.6. Площа поперечного перерізу витка, мм^2 , $S_{cl} = n_{bl} \cdot S_l$.

5.7.7. Осьовий розмір витка обмотки нижчої напруги, мм, $h_{cl} = n_{bl} \cdot b_{is}$.

5.7.8. Радіальний розмір витка, мм, $a_{cl} = a$.

5.7.9. Уточнене значення густини струму обмотки нижчої напруги, А/мм^2 ,

$$J_l = \frac{I_{\phi l N}}{S_{cl}}$$

5.7.10. Осьовий розмір обмотки нижчої напруги (висота обмотки), мм,

$$l_l = h_{cl} \cdot (N_{ll} + 1) \text{ мм.}$$

5.7.11. Ширина радіальних охолодних каналів між шарами обмотки нижчої напруги a_{l1} (рис. 5.4) обирається з табл. 5.3.

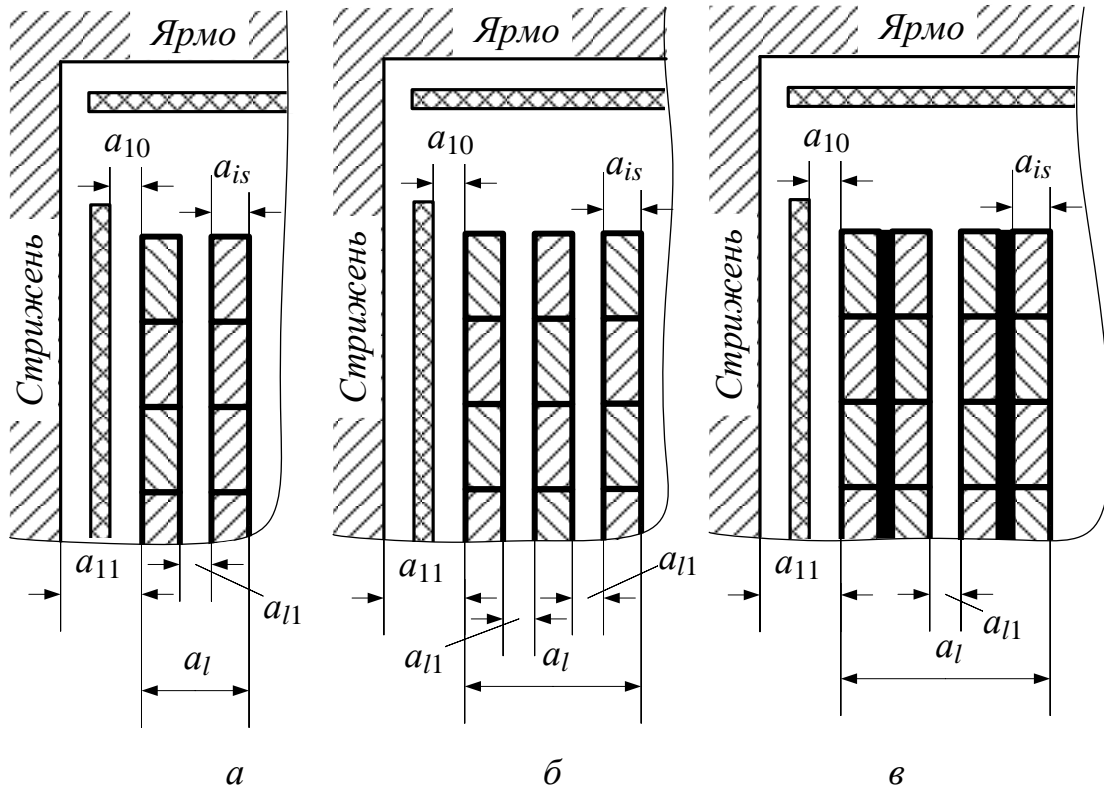


Рисунок 5.4 – Радіальні розміри циліндричної обмотки з проволу прямокутного перерізу:

a – двошарової, b – тришарової, c – чотиришарової

Таблиця 5.3 – Мінімальна ширина охолодних каналів в обмотках

Висота обмотки l_l , мм	Вертикальні канали, мм		Горизонтальні канали, мм	
	Радіальний розмір каналу обмотка – обмотка a_{l1} або a_{h1} , мм	Радіальний розмір каналу обмотка – ізолюючий циліндр	Радіальний розмір обмотки a_h , мм	Осьовий розмір каналу обмотка – обмотка b_{h1} , мм
до 300	4–5	4	до 40	4
300–500	5–6	5	40–60	5
500–1000	6–8	5–6	60–70	6
1000–1500	8–10	6–8	70–80	7

Якщо радіальний розмір витка a_{cl} менший або дорівнює половині гранично допустимого радіального розміру проводу, визначеного з рис. 5.5, то радіальний охолодний канал між шарами обмотки нижчої напруги замінюється жорсткою ізоляцією – двома шарами електрокартону товщиною 0,5 мм. В цьому разі ширина радіального каналу $a_{l1} = \delta_l = 1$ мм.

В чотиришаровій обмотці ($n_{ll} = 4$) між шарами може застосовуватися жорстка ізоляція шириною $\delta_l = 1$ мм.

5.7.12. Радіальний розмір обмотки нижчої напруги, мм:

- для дво- та тришарової обмоток ($n_{ll} = 2$ або 3)

$$a_l = n_{ll} \cdot a_{is} + (n_{ll} - 1) \cdot a_{l1};$$

- для чотиришарової обмотки ($n_{ll} = 4$)

$$a_l = n_{ll} \cdot a_{is} + a_{l1} + 2\delta_l;$$

5.7.13. Густина теплового потоку на поверхні обмотки нижчої напруги, Вт/м²:

- при наявності охолодного каналу між шарами

$$\Phi_l = k_{el} \cdot a \cdot \frac{b}{b_{is}} \cdot J_l^2;$$

- при наявності жорсткої ізоляції між шарами

$$\Phi_l = 2k_{el} \cdot a \cdot \frac{b}{b_{is}} \cdot J_l^2,$$

де k_{el} – коефіцієнт, що враховує додаткові електричні втрати та закриття частини обмотки кріпильними та ізоляційними деталями, для мідної обмотки становить 15, для алюмінієвої – 24.

Отримане значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним масляним охолодженням не повинно перевищувати допустимого значення $\Phi_{per} = 1200$ Вт/м².

Подальший розрахунок продовжити з п. 5.10.

5.8. Розрахунок гвинтової обмотки з радіальними каналами (рис. 5.6)

5.8.1. Гвинтова обмотка з радіальними каналами застосовується при густині струму J_{av} більшій

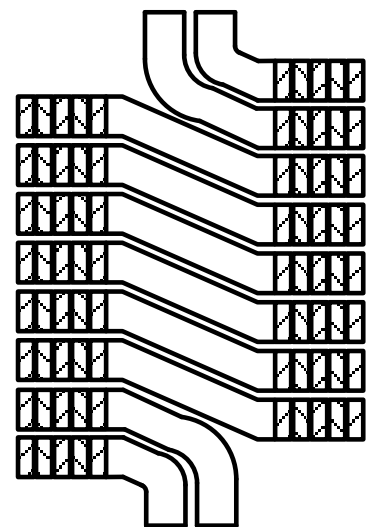


Рисунок 5.6 – Гвинтова обмотка з радіальними охолодними каналами

за 2,5 А/мм² для мідного проводу та більший за 1,8 А/мм² для алюмінієвого проводу.

5.8.2. Осьовий розмір охолодного каналу між витками, мм,

$$l_{cl} = 0,1a'_l,$$

але не менше 4 мм, де a'_l – з п. 4.12.

5.8.3. Найбільший можливий осьовий розмір витка гвинтової обмотки нижчої напруги $h_{cl\max}$ визначається за рис. 5.5.

5.8.4. Попереднє значення осьового розміру витка обмотки нижчої напруги, мм,

$$h'_{cl} = \frac{l'}{N_l + 4} - l_{cl}.$$

При $h'_{cl} \leq h_{cl\max}$ обирається одноходова обмотка з радіальними каналами між витками (рис. 5.7, а).

При $h'_{cl} < 0,5h_{cl\max}$ радіальні канали виконуються через два витка (рис. 5.7, б).

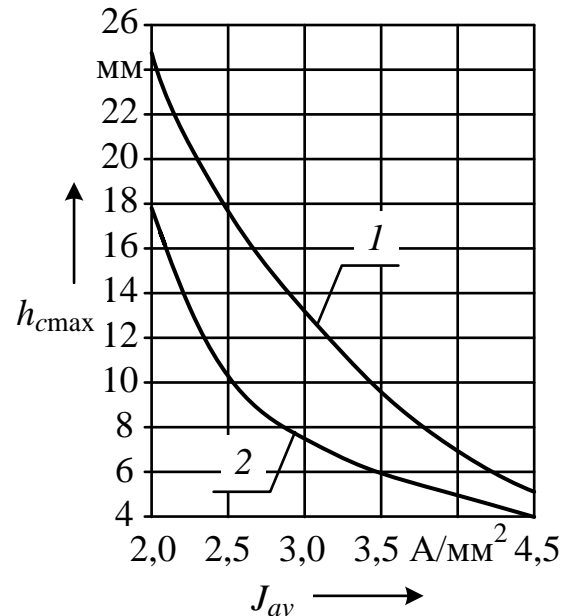


Рисунок 5.5 – Найбільший осьовий розмір витка обмотки з мідного 1 та алюмінієвого 2 проводу

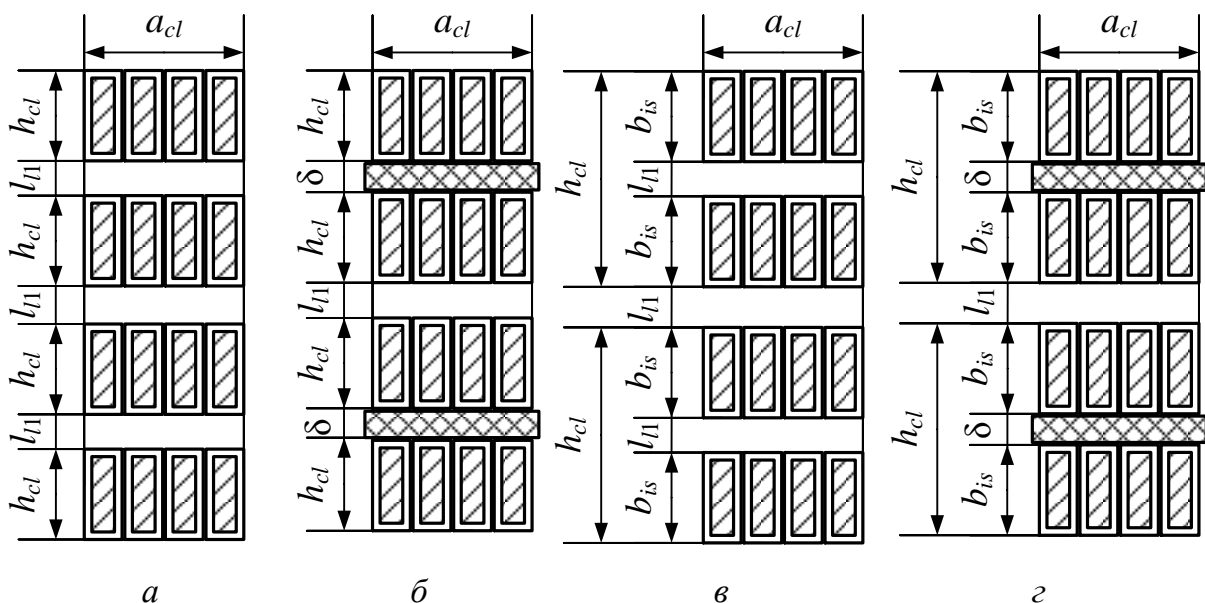


Рисунок 5.7 – Розміри гвинтової обмотки: а – одноходової з охолодними каналами між усіма витками; б – одноходової з охолодними каналами через два витки; в – двоходової з охолодними каналами між усіма витками; г – двоходової без охолодного каналу між двома групами проводів

При $h'_{cl} > h_{cl \max}$ обирається двоходова обмотка з радіальними каналами (рис. 5.7 в) з попереднім значенням осевого розміру витка, мм,

$$h'_{cl} = \frac{l'}{N_l + 1} - l_{cl}.$$

При $h'_{cl} - l_{cl} \leq h_{cl \max}$ обирається двоходова обмотка з ізоляційною прокладкою товщиною $\delta = 1$ мм між двома групами проводів витка (рис. 5.7 з).

5.8.5. Мінімальна кількість паралельних віток n_{bl} одноходової гвинтової обмотки становить 4, двоходової – 8. Проводи паралельних віток розташовуються в радіальному напрямку.

5.8.6. Попереднє значення осевого розміру проводу обмотки нижчої напруги, мм:

- одноходової обмотки

$$b' = h'_{cl} - 0,5;$$

- двоходової обмотки

$$b' = \frac{h'_{cl} - l_{cl}}{2} - 0,5.$$

5.8.7. Попереднє значення площі поперечного перерізу проводу гвинтової обмотки, мм²,

$$S'_l = \frac{S'_{cl}}{n_{bl}}.$$

5.8.8. За отриманими значеннями S'_l та b' за табл. В.1 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_l та розмірами без ізоляції $a \times b$ та в ізоляції $a_{is} \times b_{is}$ (рис. 5.2). Двобічна товщина ізоляції проводу становить 0,5 мм.

Якщо в табл. В.1 провід відсутній, тоді кількість паралельних віток n_{bl} збільшується (кількість паралельних віток гвинтової обмотки – парне число).

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі $n_{bl} \times \frac{a \times b}{a_{is} \times b_{is}}$.

5.8.9. Площа поперечного перерізу витка, мм²,

$$S_{cl} = n_{bl} \cdot S_l.$$

5.8.10. Уточнене значення густини струму обмотки нижчої напруги, А/мм²,

$$J_l = \frac{I_{\phi l N}}{S_{cl}}.$$

5.8.11. Радіальний розмір витка обмотки нижчої напруги (радіальний розмір обмотки), мм:

- одноходової обмотки

$$a_{cl} = a_l = n_{bl} \cdot a_{is} ;$$

- двоходової обмотки

$$a_{cl} = a_l = \frac{n_{bl}}{2} \cdot a_{is} .$$

5.8.12. Осьовий розмір обмотки нижчої напруги (висота обмотки), мм:

- одноходової з охолодними каналами між усіма витками (рис. 5.7, а)

$$l_l = b_{is} \cdot (N_l + 4) + k_{dp} \cdot l_{cl} (N_l + 3) ;$$

- одноходової з каналами через два витки (рис. 5.7, б)

$$l_l = b_{is} \cdot (N_l + 1) + k_{dp} \cdot \left[l_{cl} \cdot \left(\frac{N_l}{2} + 2 \right) + \delta \cdot \frac{N_l}{2} \right] ;$$

- двоходової з охолодними каналами між усіма витками (рис. 5.7, в)

$$l_l = 2b_{is} \cdot (N_l + 1) + k_{dp} \cdot l_{cl} \cdot (2N_l + 1) ;$$

- двоходової з ізоляційною прокладкою між двома групами проводів витка (рис. 5.7, г)

$$l_l = 2b_{is} \cdot (N_l + 1) + k_{dp} \cdot [l_{cl} \cdot N_l + \delta \cdot (N_l + 1)] ,$$

де k_{dp} – коефіцієнт, що враховує сушіння та опресування обмотки, становить 0,95.

5.8.13. Густина теплового потоку на поверхні обмотки нижчої напруги, Вт/м²:

- при наявності охолодних каналів між усіма витками (рис. 5.7, а, в)

$$\Phi_l = k_{el} \cdot N_k \cdot \frac{J_l \cdot I_{\phi l N}}{b_{is} + a_{cl}} ;$$

- при наявності жорсткої ізоляції між витками (рис. 5.7, б, г)

$$\Phi_l = 2k_{el} \cdot N_k \cdot \frac{J_l \cdot I_{\phi l N}}{2b_{is} + a_{cl}} ,$$

де k_{el} – визначається з п. 5.7.13,

N_k – кількість витків в котушці обмотки, для одноходової дорівнює 1, для двоходової – 0,5.

Отримане значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним масляним охолодженням не повинно перевищувати допустимого значення $\Phi_{per} = 1200$ Вт/м².

Подальший розрахунок продовжити з п. 5.10.

5.9. Розрахунок гвинтової обмотки без радіальних каналів (рис. 5.8)

5.9.1. Гвинтова обмотка без радіальних каналів застосовується при густині струму J_{av} меншій за $2,5 \text{ А/мм}^2$ для мідного проводу та меншій за $1,8 \text{ А/мм}^2$ для алюмінієвого проводу.

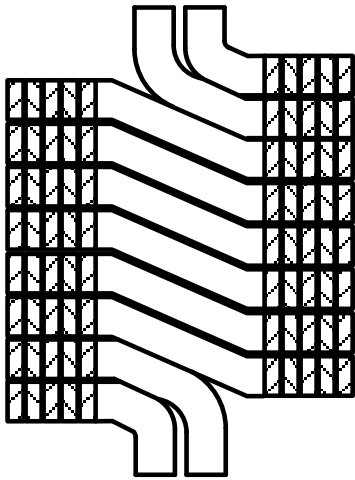


Рисунок 5.8 – Гвинтова обмотка без радіальних охолодних каналів

5.9.2. Радіальний сумарний розмір проводів, необхідний для отримання повного перерізу всіх витків обмотки нижчої напруги, мм,

$$a_{cl} = \frac{N_l \cdot S_{cl}}{0,92 \cdot l'}$$

5.9.3. Найбільший сумарний радіальний розмір металу проводів обмотки нижчої напруги між двома охолодними осьовими каналами трансформатора, мм,

$$a_{cl \max} = \frac{1,6 \cdot \Phi_{per}}{\rho_{75l} \cdot J_l^2} \cdot 10^3,$$

де Φ_{per} – допустиме значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним масляним охолодженням, становить 1200 Вт/м^2 ;

ρ_{75l} – питомий опір матеріалу обмотки при температурі 75°C , для міді становить $0,02135 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$, для алюмінію – $0,049 \text{ Ом} \cdot \text{мм}$.

5.9.4. Кількість шарів обмотки нижчої напруги:

- при $a_{cl} \leq a_{cl \max}$ $n_{ll} = 1$;

- при $a_{cl} > a_{cl \max}$ $n_{ll} = 2$.

5.9.5. Попереднє значення осьового розміру витка обмотки нижчої напруги, мм,

$$h'_{cl} = \frac{l'}{\frac{N_l}{n_{ll}} + 4}$$

Якщо провід з розміром h'_{cl} в табл. В.1.1 відсутній, то обирається двоходова обмотка з попереднім осьовим розміром витка

$$h'_{cl} = \frac{l'}{\frac{N_l}{n_{ll}} + 1}$$

5.9.6. Мінімальна кількість паралельних віток n_{bl} одноходової гвинтової обмотки становить 4, двоходової – 8. Проводи паралельних віток розташовуються в радіальному напрямку.

5.9.7. Попереднє значення осьового розміру проводу обмотки, мм:

- однофазової обмотки

$$b' = h_{cl} - 0,5;$$

- двофазової обмотки

$$b' = \frac{h_{cl}}{2} - 0,5.$$

5.9.8. Попереднє значення площі поперечного перерізу проводу гвинтової обмотки нижчої напруги, мм²,

$$S'_l = \frac{S'_{cl}}{n_{bl}}.$$

5.9.9. За отриманими значеннями S'_l та b' за табл. В.1 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_l та розмірами без ізоляції $a \times b$ та в ізоляції $a_{is} \times b_{is}$ (рис. 5.2). Двобічна товщина ізоляції проводу становить 0,5 мм.

Отримане значення осьового розміру проводу a не повинно перевищувати гранично допустимого радіального розміру проводу, при якому додаткові втрати не перевищують 5 %. Гранично допустимий радіальний розмір проводу визначається за табл. 5.2. У протилежному випадку кількість паралельних віток n_{bl} збільшується (кількість паралельних віток гвинтової обмотки – парне число).

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі $n_{bl} \times \frac{a \times b}{a_{is} \times b_{is}}$.

5.9.10. Площа поперечного перерізу витка обмотки нижчої напруги, мм²,

$$S_{cl} = n_{bl} \cdot S_l.$$

5.9.11. Уточнене значення густини струму обмотки нижчої напруги, А/мм²,

$$J_l = \frac{I_{\phi l N}}{S_{cl}}.$$

5.9.12. Радіальний розмір витка обмотки нижчої напруги (радіальний розмір обмотки нижчої напруги), мм:

- однофазової обмотки

$$a_{cl} = a_l = n_{bl} \cdot a_{is};$$

- двофазової обмотки

$$a_{cl} = a_l = n_{bl} \cdot a_{is} + a_{l1},$$

де a_{l1} – радіальний розмір осьового каналу між шарами обмотки, обирається з табл. 5.3.

5.9.13. Осьовий розмір обмотки нижчої напруги (висота обмотки), мм:

- однофазової обмотки $l_l = b_{is} \cdot \left(\frac{N_l}{n_{ll}} + 4 \right)$;

- двофазової обмотки $l_l = 2b_{is} \cdot \left(\frac{N_l}{n_{ll}} + 1 \right)$;

5.9.14. Густина теплового потоку на поверхні обмотки нижчої напруги, Вт/м²,

$$\Phi_l = k_{el} \cdot n_{bl} \cdot a \cdot \frac{b}{b_{is}} \cdot J_l^2,$$

де k_{el} – визначається з п. 5.7.13.

Отримане значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним масляним охолодженням не повинно перевищувати $\Phi_{per} = 1200$ Вт/м².

5.10. Внутрішній діаметр обмотки нижчої напруги, мм,

$$d_{inl} = d_n + 2a_{11}.$$

5.11. Зовнішній діаметр обмотки нижчої напруги, мм,

$$d_{outl} = d_{inl} + 2a_l.$$

5.12. Середній діаметр обмотки нижчої напруги, мм,

$$d_{avl} = \frac{d_{inl} + d_{outl}}{2}.$$

5.13. Маса металу обмотки нижчої напруги, кг,

$$m_{Mel} = \gamma_{Me} \cdot m \cdot \pi \cdot d_{avl} \cdot N_l \cdot S_{cl},$$

де γ_{Me} – густина металу, з якого виготовлено обмотку, для міді становить $8,9 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, для алюмінію – $2,7 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³.

5.14. Маса металу відведень обмотки нижчої напруги, кг,

$$m_{endl} = \gamma_{Me} \cdot l_{endl} \cdot S_{cl},$$

де l_{endl} – довжина відведень обмотки:

- при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y $l_{endl} = 7,5l_l$;

- при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ $l_{endl} = 14l_l$.

6. РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ВИЩОЇ НАПРУГИ

6.1. Кількість витків обмотки вищої напруги при номінальній напрузі

$$N_{hnom} = N_l \cdot \frac{U_{\phi hN}}{U_{\phi lN}}$$

6.2. Величина змінення напруги при регулюванні, В,

$$\Delta U_{\phi} = 0,05 U_{\phi hN} \cdot 10^3.$$

6.3. Кількість витків обмотки вищої напруги на одній ступені регулювання

$$N_{h\Delta} = \frac{\Delta U_{\phi}}{E_c}.$$

6.4. Кількість витків обмотки вищої напруги на верхній ступені регулювання $N_{h1} = N_{hnom} + N_{h\Delta}$.

6.5. Кількість витків обмотки вищої напруги на нижній ступені регулювання $N_{h2} = N_{hnom} - N_{h\Delta}$.

6.6. Густина струму в обмотці вищої напруги, А/мм²,

$$J_h = 2J_{av} - J_l.$$

6.7. Попереднє значення площі поперечного перерізу витка обмотки вищої напруги, мм²,

$$S'_{ch} = \frac{I_{\phi hN}}{J_h}.$$

6.8. За отриманими значеннями струму $I_{\phi hN}$, напруги U_{lN} , площі поперечного перерізу S'_{ch} обрати тип обмотки за табл. Б.1.

Найчастіше для обмоток вищої напруги застосовуються циліндричні багат шарові обмотки з проводу круглого або прямокутного перерізу або спіральні обмотки.

6.9. Вибір схеми виконання регулювальних відгалужень обмотки вищої напруги (рис. 6.1)

Для циліндричної багат шарової обмотки в трансформаторах номінальною потужністю до 250 кВ·А застосовується схема виконання регулювальних відгалужень, наведена на рис. 6.1, а, вище 250 кВ·А – на рис. 6.1, б.

Для спіральної безперервної

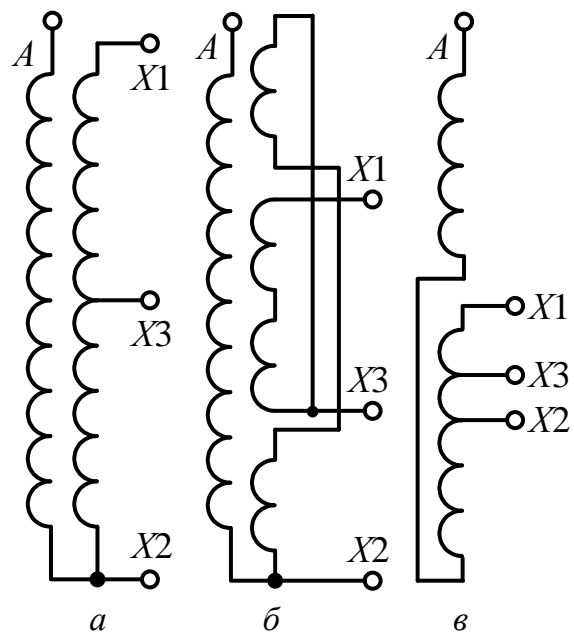


Рисунок 6.1 – Схеми виконання регулювальних відгалужень обмотки вищої напруги

котушкової обмотки застосовується схема виконання регулювальних відгалужень, наведена на рис. 6.1, в.

Для циліндричної багатошарової обмотки з проводу круглого перерізу подальший розрахунок виконувати за п. 6.10, циліндричної багатошарової обмотки з проводу прямокутного перерізу – п. 6.11, спіральної обмотки – п. 6.12.

6.10. Розрахунок циліндричної багатошарової обмотки з проводу круглого перерізу (рис. 6.2)

6.10.1. За отриманим значенням S'_{ch} за табл. В.2 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_h та розмірами без ізоляції d та в ізоляції d_{is} (рис. 6.3). Двобічна товщина ізоляції проводу марки ПБ становить 0,3 мм, марки АПБ – 0,4 мм.

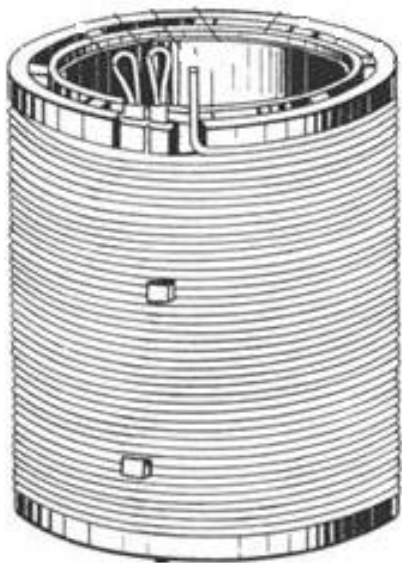


Рисунок 6.2 – Циліндрична багатошарова обмотка з осьовим каналом

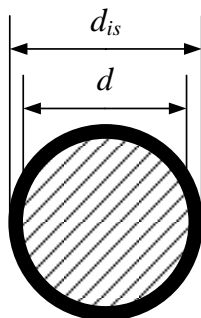


Рисунок 6.3 – Розміри витка обмотки вищої напруги

вищої напруги, мм,

При необхідності виток обмотки поділяється на n_{bh} паралельних виток. В цьому разі провід обирається за площею $S'_h = \frac{S'_{ch}}{n_{bh}}$.

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі $n_{bh} \times \frac{d}{d_{is}}$.

6.10.2. Площа поперечного перерізу витка обмотки вищої напруги, мм²,

$$S_{ch} = n_{bh} \cdot S_h.$$

6.10.3. Уточнене значення густини струму обмотки вищої напруги, А/мм²,

$$J_h = \frac{I_{\phi h N}}{S_{ch}}.$$

6.10.4. Кількість витків в шарі обмотки вищої напруги $N_{lh} = \frac{l_l}{n_{bh} \cdot d_{is}} - 1$.

Отримане значення заокруглити до найближчого меншого цілого числа.

6.10.5. Осьовий розмір (висота) обмотки

$$l_h = n_{bh} \cdot d_{is} \cdot (N_{lh} + 1).$$

6.10.6. Кількість шарів в обмотці вищої напруги

$$n_{lh} = \frac{N_{h1}}{N_{lh}}.$$

Отримане значення заокруглити до найближчого більшого цілого числа.

6.10.7. Робоча напруга двох шарів обмотки вищої напруги, В,

$$U_{lh} = 2N_{lh} \cdot E_c.$$

6.10.8. Товщина ізоляції між двома шарами обмотки вищої напруги δ_{lh} обирається з табл. 6.1.

Таблиця 6.1. – Нормальна міжшарова ізоляція в багатошарових циліндричних обмотках

Робоча напруга двох шарів обмотки вищої напруги U_{lh} , В	Кількість шарів кабельного паперу на його товщину, δ_{lh} , мм	Виступ міжшарової ізоляції на торцях обмотки на один бік, мм
до 1000	2×0,12	10
від 1001 до 2000	3×0,12	16
від 2001 до 3000	4×0,12	16
від 3001 до 3500	5×0,12	16
від 3501 до 4000	6×0,12	22
від 4001 до 4500	7×0,12	22
від 4501 до 5000	8×0,12	22
від 5001 до 5500	9×0,12	22

Примітка. При номінальній потужності трансформатора більшій за 1000 кВ·А міжшарова ізоляція має бути не меншою за 4×0,12 мм.

6.10.9. Мінімальна ширина охолодного каналу між котушками обмотки вищої напруги a_{h1} вибирається з табл. 5.3.

Кількість котушок обмотки вищої напруги $n_h = 2$.

Кількість шарів внутрішньої котушки становить від 1/3 до 2/5 загальної кількості шарів n_{lh} .

6.10.10. Радіальний розмір обмотки вищої напруги, мм:

- для обмотки без екрана (при класах напруги 1, 3, 6, 10, 15 кВ)

$$a_h = n_{lh} \cdot d_{is} + \delta_{lh} (n_{lh} - 1) + a_{h1};$$

- для обмотки з екраном товщиною 5 мм (при класах напруги 20 та 35 кВ)

$$a_h = n_{lh} \cdot d_{is} + \delta_{lh} (n_{lh} - 1) + a_{h1} + 2\delta_{lh} + 5.$$

Подальший розрахунок продовжити з п. 6.13.

6.11. Розрахунок циліндричної багатошарової обмотки з проводу

прямокутного перерізу (рис. 6.2)

6.11.1. Радіальний сумарний розмір витків, необхідний для отримання повного перерізу всіх витків обмотки вищої напруги, мм,

$$a_{ch} = \frac{N_{h1} \cdot S'_{ch}}{0,92 \cdot l_l}.$$

6.11.2. Попереднє значення радіального розміру проводу обмотки вищої напруги, мм,

$$a' = \frac{a_{ch}}{n_{lh}},$$

де n_{lh} – кількість шарів обмотки вищої напруги, обирається таким чином, щоби отримане значення a' не перевищувало гранично допустимий радіальний розмір проводу, при якому додаткові втрати не перевищують 5 %. Гранично допустимий радіальний розмір проводу визначається з табл. 5.2.

При неможливості виконання умови гранично допустимого розміру кількість паралельних віток обмотки вищої напруги n_{bh} збільшується. Починати розрахунок від $n_{bh} = 1$.

6.11.3. Попереднє значення площі поперечного перерізу проводу циліндричної обмотки вищої напруги, мм², $S'_h = \frac{S'_{ch}}{n_{bh}}$.

6.11.4. За отриманими значеннями S'_h та a' за табл. В.1 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_h та розмірами без ізоляції $a \times b$ та в ізоляції $a_{is} \times b_{is}$ (рис. 5.2). Двобічна товщина ізоляції проводу становить 0,5 мм.

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі $n_{bl} \times \frac{a \times b}{a_{is} \times b_{is}}$.

6.11.5. Площа поперечного перерізу витка обмотки вищої напруги, мм²,

$$S_{ch} = n_{bh} \cdot S_h.$$

6.11.6. Уточнене значення густини струму обмотки вищої напруги, А/мм²,

$$J_h = \frac{I_{\phi h N}}{S_{ch}}.$$

6.11.7. Кількість витків в шарі обмотки вищої напруги

$$N_{lh} = \frac{l_l}{n_{bh} \cdot b_{is}} - 1.$$

Отримане значення заокруглити до найближчого меншого цілого числа.

6.11.8. Кількість шарів в обмотці вищої напруги $n_{lh} = \frac{N_{h1}}{N_{lh}}$.

Отримане значення заокруглити до найближчого більшого цілого числа.

6.11.9. Робоча напруга двох шарів обмотки вищої напруги, В,

$$U_{lh} = 2N_{lh} \cdot E_c.$$

6.11.10. Товщина ізоляції між двома шарами обмотки вищої напруги δ_{lh} обирається з табл. 6.1.

6.11.11. Найбільший сумарний радіальний розмір металу проводів обмотки вищої напруги між двома охолодними осьовими каналами трансформатора, мм,

$$a_{ch \max} = \frac{1,6 \cdot \Phi_{per}}{\rho_{75h} \cdot J_h^2} \cdot 10^{-3},$$

де Φ_{per} визначається з п. 5.7.13,

ρ_{75h} – питомий опір матеріалу обмотки при температурі 75°C, для міді становить 0,02135 Ом·мкм, для алюмінія – 0,049 Ом·мкм.

6.11.12. Кількість котушок обмотки вищої напруги

$$n_h = \frac{a_{ch}}{a_{ch \max}}.$$

Отримане значення n_h заокруглити до найближчого більшого цілого числа.

6.11.13. Кількість осьових охолодних каналів обмотки вищої напруги

$$n_{kh} = n_h - 1.$$

6.11.14. Радіальний розмір осьового охолодного каналу між котушками обмотки вищої напруги (за наявності охолодних каналів), мм,

$$a_{h1} = 0,01l_l,$$

але не менше 5 мм.

6.11.15. Радіальний розмір обмотки вищої напруги, мм:

- для обмотки без екрана (при класах напруги 1, 3, 6, 10, 15 кВ)

$$a_h = n_{lh} \cdot a_{is} + \delta_{lh} (n_{lh} - 1) + a_{h1} \cdot n_{kh};$$

- для обмотки з екраном товщиною 3 мм (при класах напруги 20 та 35 кВ)

$$a_h = n_{lh} \cdot a_{is} + \delta_{lh} (n_{lh} - 1) + a_{h1} \cdot n_{kh} + 3.$$

6.11.16. Осьовий розмір (висота) обмотки вищої напруги, мм, $l_h = N_{lh} \cdot b_{is}$.

Подальший розрахунок продовжити з п. 6.13.

6.12. Розрахунок спіральної безперервної котушкової обмотки з проводу прямокутного перерізу (рис. 6.4)

6.12.1. Кількість паралельних віток обмотки вищої напруги $n_{bh} = 1$. При невиконанні подальших умов n_{bh} може бути збільшена.

6.12.2. Попереднє значення площі поперечного перерізу проводу обмотки вищої напруги, мм²,

$$S'_h = \frac{S'_{ch}}{n_{bh}}.$$

6.12.3. Найбільший можливий осьовий розмір витка спіральної обмотки вищої напруги $h_{ch\max}$ визначається з рис. 5.5 для значення густини струму J_{av} (з п. 5.1).

6.12.4. За отриманим значеннями S'_{ch} з табл. В.1 обрати стандартний провід з площею поперечного перерізу S_h та розмірами без ізоляції $a \times b$ та в ізоляції $a_{is} \times b_{is}$ (рис. 5.2). Двобічна товщина ізоляції проводу становить 0,5 мм.

Для кожного виду котушок обмотки (регулювання та забезпечення номінальної напруги) розміри проводу $a \times b$ можуть бути різними, але обов'язково має бути однакова площа поперечного перерізу S_h .

Якщо в табл. В.1 провід відсутній, тоді кількість паралельних віток n_{bh} збільшується.

Отримані стандартні розміри витка записуються по формі:

- котушок регулювання $n_{bh} \times \frac{a_{nh\Delta} \times b_{nh\Delta}}{a_{is\ nh\Delta} \times b_{is\ nh\Delta}},$

- котушок забезпечення номінальної напруги $n_{bh} \times \frac{a_{nhB} \times b_{nhB}}{a_{is\ nhB} \times b_{is\ nhB}},$

6.12.5. Площа поперечного перерізу витка обмотки вищої напруги, мм²,

$$S_{ch} = n_{bh} \cdot S_h.$$

6.12.6. Уточнене значення густини струму обмотки вищої напруги, А/мм²,

$$J_h = \frac{I_{\phi h N}}{S_{ch}}.$$

6.12.7. Кількість котушок обмотки вищої напруги:

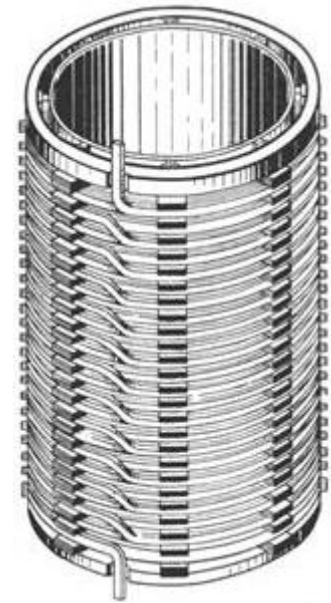


Рисунок 6.4 – Спіральна безперервна котушкова обмотка з проводу прямокутного перерізу

- для обмотки з каналами між усіма котушками

$$n_{h1} = \frac{l_l + b_{h1}}{b_{isnhB} + b_{h1}};$$

- для обмотки з каналами між парами котушок

$$n_{h1} = \frac{2(l_l + b_{h1})}{2b_{isnhB} + b_{h1} + \delta_h},$$

де b_{h1} – осьовий розмір охолодного каналу між котушками, визначається з табл. 5.3, перевіряється після остаточного визначення радіального розміру обмотки a_h (п. 6.12.14).

δ_h – товщина ізоляції між здвоєними котушками, виконується з двох шайб з електрокартону товщиною 0,5 мм, загальна товщина становить 1 мм.

Отримане значення n_{h1} заокруглити до найближчого більшого парного числа.

Спочатку розрахунок виконувати для обмотки з каналами між усіма котушками.

Після розрахунку густини теплового потоку на поверхні обмотки вищої напруги (п. 6.12.15) з конструкцією обмотки визначитись остаточню.

6.12.8. Кількість котушок обмотки вищої напруги для розташування витків однієї ступені регулювання

$$n_{h\Delta} = n_{h1} \cdot \frac{N_{h\Delta}}{N_{h1}}.$$

Отримане значення $n_{h\Delta}$ заокруглити до найближчого більшого парного числа.

6.12.9. Кількість котушок основної частини обмотки вищої напруги

$$n_{hB} = n_{h1} - 2n_{h\Delta}.$$

6.12.10. Кількість витків в одній котушці обмотки вищої напруги для розташування витків однієї ступені регулювання

$$N_{nh\Delta} = \frac{N_{h\Delta}}{n_{h\Delta}}.$$

6.12.11. Кількість витків в одній котушці основної частини обмотки вищої напруги

$$N_{nhB} = \frac{N_{h2}}{n_{hB}}.$$

6.12.12. Осьовий розмір обмотки вищої напруги, мм:

- для обмотки з каналами між усіма котушками

$$l_h = b_{is\ nhB} \cdot n_{hB} + b_{is\ nh\Delta} \cdot 2n_{h\Delta} + k_{dp} [b_{h1} (n_{h1} - 2) + h_r];$$

- для обмотки з каналами між парами котушок

$$l_h = b_{is\ nhB} \cdot n_{hB} + b_{is\ nh\Delta} \cdot 2n_{h\Delta} + k_{dp} \left[b_{h1} (n_{h1} - 2) + h_r \cdot \frac{n_{h1}}{2} + \delta_h \right],$$

де k_{dp} – визначається з п. 5.8.12;

h_r – осьовий розмір охолодного каналу в місці розташування регулювальних витків обмотки вищої напруги, визначається з табл. 6.2.

Отриманий осьовий розмір l_h має збігатися з осьовим розміром l_l (п. 5.7.9 або п. 5.8.12 або п. 5.9.13 залежно від обраного типу обмотки нижчої напруги). В іншому випадку змінити розмір проводу b , та повторити розрахунок обмотки.

Таблиця 6.2 – Розміри охолодного каналу в місці розташування регулювальних витків обмотки вищої напруги

Клас напруги	Розмір охолодного каналу, мм
до 6 кВ	8
10 та 15 кВ	10
20 та 35 кВ	25

6.12.13. Радіальний розмір котушок обмотки вищої напруги, мм:

- однієї ступені регулювання

$$a_{h\Delta} = n_{bh} \cdot N_{nh\Delta} \cdot a_{is\ nh\Delta},$$

- основної частини

$$a_{hB} = n_{bh} \cdot N_{nhB} \cdot a_{is\ nhB},$$

6.12.14. Радіальний розмір обмотки вищої напруги a_h дорівнює найбільшому з $a_{h\Delta}$ та a_{hB} .

6.12.15. Густина теплового потоку на поверхні обмотки вищої напруги, Вт/м²,

- для обмотки з каналами між усіма котушками

$$\Phi_h = k_{el} \cdot N_{nhB} \cdot \frac{J_h \cdot I_{\phi hN}}{b_{is\ nhB} + a_h},$$

- для обмотки з каналами між парами котушок

$$\Phi_h = 2k_{el} \cdot N_{nhB} \cdot \frac{J_h \cdot I_{\phi hN}}{2b_{is\ nhB} + a_h},$$

де k_{el} – визначається з п. 5.7.13.

Отримане значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним оливним охолодженням не повинно перевищувати $\Phi_{per} = 1200 \text{ Вт/м}^2$.

Якщо $\Phi_l \leq 800 \text{ Вт/м}^2$, та обирається обмотка вищої напруги з каналами між парами котушок. Повторити розрахунок від п. 6.12.4.

6.13. Внутрішній діаметр обмотки вищої напруги, мм,

$$d_{inh} = d_{outl} + 2a_{12},$$

де a_{12} визначається з п. 3.2.

6.14. Зовнішній діаметр обмотки вищої напруги, мм,

$$d_{outh} = d_{inh} + 2a_h.$$

6.15. Середній діаметр обмотки вищої напруги, мм,

$$d_{avh} = \frac{d_{inh} + d_{outh}}{2}.$$

6.16. Середній діаметр каналу між обмотками нижчої та вищої напруг, мм,
 $d_{av} = d_{outl} + a_{12}$, де a_{12} визначається з п. 3.2.

6.17. Густина теплового потоку на поверхні обмотки вищої напруги, Вт/м^2 (розраховується тільки для циліндричних обмоток):

$$\Phi_h = \frac{P_k}{4,8n_h \cdot 2\pi d_{avh} \cdot l_h} \cdot 10^6.$$

Отримане значення густини теплового потоку на поверхні обмотки трансформатора з природним масляним охолодженням не повинно перевищувати $\Phi_{per} = 1400 \text{ Вт/м}^2$.

6.18. Маса металу обмотки вищої напруги, кг,

$$m_{Meh} = \gamma_{Me} \cdot m \cdot \pi \cdot d_{avh} \cdot N_{h1} \cdot S_{ch},$$

де γ_{Me} визначається з п. 5.13.

6.19. Маса металу відведень обмотки вищої напруги, кг,

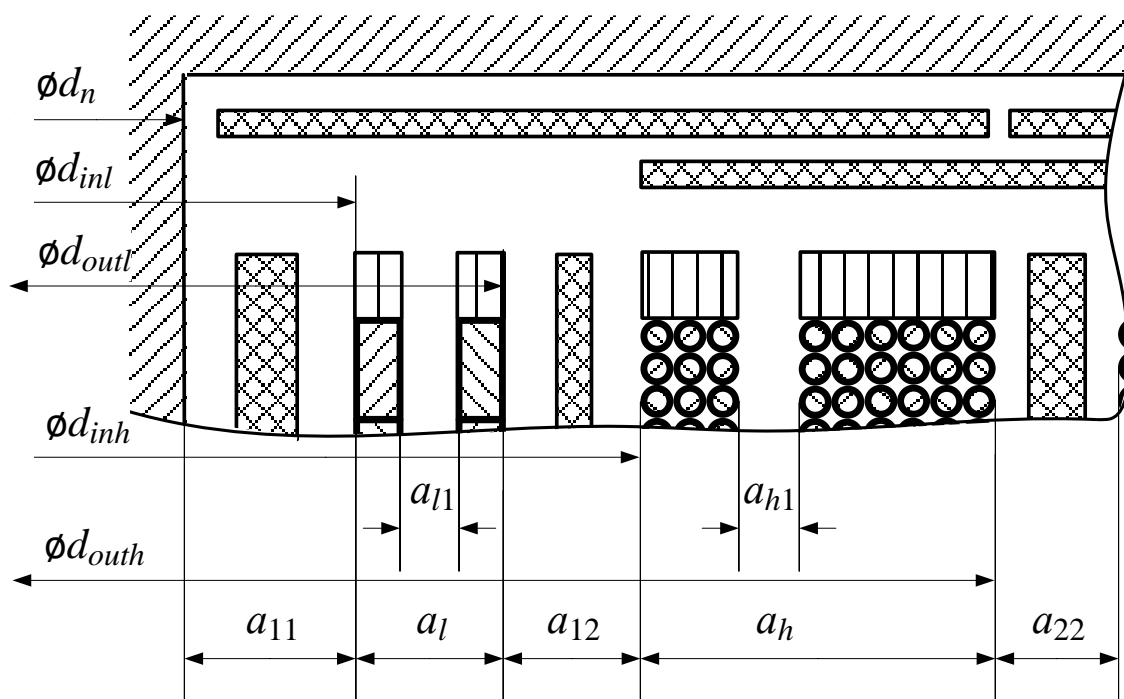
$$m_{endh} = \gamma_{Me} \cdot l_{endh} \cdot S_{ch},$$

де l_{endl} – довжина відведень обмотки:

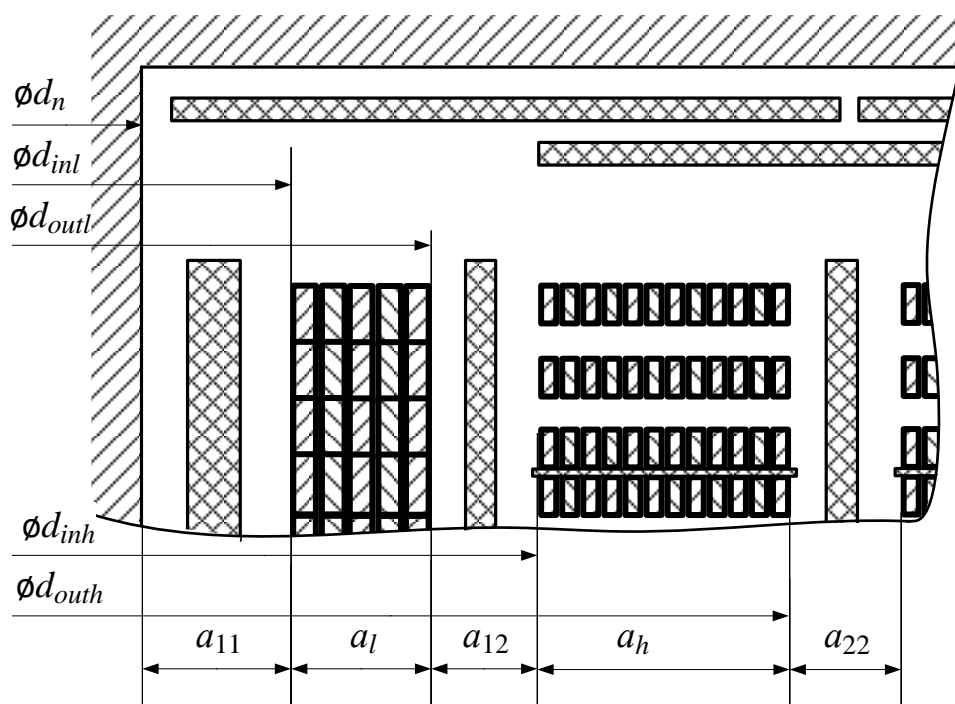
- при з'єднанні фазних обмоток за схемою Y $l_{endh} = 7,5l_h$;

- при з'єднанні фазних обмоток за схемою Δ $l_{endh} = 14l_h$.

6.20. На підставі розрахованих розмірів обмоток виконати рисунок з основними розмірами обмоток (рис. 6.5).



a



б

Рисунок 6.5 – Розміри обмоток трансформатора:

a – обмотка нижчої напруги – циліндрична двошарова з проводу прямокутного перерізу, обмотка вищої напруги – циліндрична багатошарова з проводу круглого перерізу, *б* – обмотка нижчої напруги – гвинтова без радіальних каналів, обмотка вищої напруги – спіральна безперервна котушкова

7. РОЗРАХУНОК ВТРАТ І НАПРУГИ КОРОТКОГО ЗАМИКАННЯ

7.1. Активний опір обмотки нижчої напруги, Ом,

$$R_l = \rho_{75l} \cdot \frac{\pi \cdot d_{avl} \cdot N_l}{S_{cl}} \cdot 10^{-3},$$

де ρ_{75l} – визначається з п. 5.9.3.

7.2. Активний опір обмотки вищої напруги, Ом,

$$R_h = \rho_{75h} \cdot \frac{\pi \cdot d_{avh} \cdot N_{hl}}{S_{ch}} \cdot 10^{-3}.$$

де ρ_{75h} – визначається з п. 6.11.11.

7.3. Основні електричні втрати обмотки нижчої напруги, Вт,

$$P_{ell} = m \cdot I_{\phi l N}^2 \cdot R_l.$$

7.4. Основні електричні втрати обмотки вищої напруги, Вт,

$$P_{elh} = m \cdot I_{\phi h N}^2 \cdot R_h.$$

7.5. Активний опір відведень обмотки нижчої напруги, Ом,

$$R_{endl} = \rho_{75l} \cdot \frac{l_{endl}}{S_{cl}} \cdot 10^{-3}.$$

7.6. Активний опір відведень обмотки вищої напруги, Ом,

$$R_{endh} = \rho_{75h} \cdot \frac{l_{endh}}{S_{ch}} \cdot 10^{-3}.$$

7.7. Основні електричні втрати у відведеннях обмотки нижчої напруги, Вт,

$$P_{elendl} = m \cdot I_{\phi l N}^2 \cdot R_{endl}.$$

7.8. Основні електричні втрати у відведеннях обмотки вищої напруги, Вт,

$$P_{elendh} = m \cdot I_{\phi h N}^2 \cdot R_{endh}.$$

7.9. Коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в обмотці нижчої напруги,

$$k_{adl} = 1 + k_m \left(\frac{b \cdot N_{al} \cdot N_{bl} \cdot K_R}{l_l} \right)^2 \cdot a_{cl}^4 \cdot 10^{-8},$$

де k_m – коефіцієнт матеріалу та форми проводу обмотки: для мідного проводу прямокутного перерізу становить 0,95, для мідного проводу круглого перерізу – 0,44, для алюмінієвого проводу прямокутного перерізу становить 0,37, для алюмінієвого проводу круглого перерізу – 0,17;

N_{al} – кількість провідників обмотки нижчої напруги в радіальному напрямку: для циліндричної обмотки $N_{al} = n_{ll}$, для гвинтової одноходової обмотки

$N_{al} = n_{bl}$, для гвинтової двоходової обмотки $N_{al} = \frac{n_{bl}}{2}$;

N_{bl} – кількість провідників обмотки нижчої напруги в осьовому напрямку: для циліндричної обмотки $N_{bl} = N_{ll}$; для гвинтової одноходової обмотки $N_{bl} = N_l$; для гвинтової двоходової обмотки $N_{bl} = 2N_l$.

7.10. Коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в обмотці вищої напруги:
- з проводу прямокутного перерізу

$$k_{adh} = 1 + k_m \left(\frac{b \cdot N_{ah} \cdot N_{bh} \cdot K_R}{l_h} \right)^2 \cdot a_{ch}^4 \cdot 10^{-8},$$

- з проводу круглого перерізу

$$k_{adh} = 1 + k_m \left(\frac{d \cdot N_{ah} \cdot N_{bh} \cdot K_R}{l_h} \right)^2 \cdot d^4 \cdot 10^{-8},$$

де N_{ah} – кількість провідників обмотки вищої напруги в радіальному напрямку: для циліндричної обмотки $N_{ah} = n_{lh}$; для спіральної обмотки $N_{ah} = n_{bh} \cdot N_{nhb}$;

N_{bh} – кількість провідників обмотки вищої напруги в осьовому напрямку: для циліндричної обмотки $N_{bh} = N_{lh}$; для спіральної обмотки $N_{bh} = n_{h1}$.

7.11. Втрати в стінках бака та елементах конструкції, Вт,

$$P_{\sigma} = k_t \cdot S_N.$$

де k_t – коефіцієнт, що враховує потужність втрат в стінках бака та елементах конструкції, становить 0,00015–0,0002 при $S_N \leq 1000$ кВ·А, 0,00025–0,0004 при $S_N > 1000$ кВ·А.

7.12. Втрати короткого замикання трансформатора, Вт,

$$P_k = k_{adl} \cdot P_{ell} + k_{adh} \cdot P_{elh} + P_{elendl} + P_{elendh} + P_{\sigma}.$$

7.13. Отримане значення втрат короткого замикання не повинно перевищувати значення, отриманого у технічному завданні, більше, ніж на 5 %. В цьому разі обмотки трансформатора спроектовано правильно.

При невиконанні умови необхідно зменшити густину струму в обмотках. При невеликому відхиленні достатньо перерахувати тільки обмотку нижчої напруги.

7.14. Уточнене значення відношення довжини кола середньої лінії обмоток

до їхньої висоти, мм,

$$\beta_c = \frac{\pi \cdot d_{av}}{l_l}.$$

Отримане значення порівняти з отриманим β_n в п. 4.11. При виході отриманого значення β_c за межі значень в табл. 4.1 змінити висоту обмоток.

7.15. Уточнене значення ширини зведеного каналу розсіяння, мм,

$$a_\sigma = a_{12} + \frac{a_l + a_h}{3}.$$

7.16. Коефіцієнт зведення ідеального магнітного поля розсіювання до реального (коефіцієнт Роговського)

$$K_R = 1 - \frac{a_{12} + a_l + a_h}{\pi \cdot l_l} \cdot \left[1 - e^{-\frac{1}{\frac{a_{12} + a_l + a_h}{\pi \cdot l_l}}} \right].$$

7.17. Активна складова напруги короткого замикання

$$u_a = \frac{P_k}{S_N \cdot 10^3}.$$

7.18. Реактивна складова напруги короткого замикання

$$u_r = \frac{2\pi \cdot \mu_0 \cdot f \cdot S_{\phi N} \cdot \beta_c \cdot a_\sigma \cdot K_R}{E_c^2},$$

де μ_0 – магнітна стала, становить $4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м.

7.19. Напруга короткого замикання,

- у відносних одиницях від номінальної напруги

$$u_k = \sqrt{u_a^2 + u_r^2};$$

- у відсотках від номінальної напруги, %,

$$u_{k\%} = \sqrt{u_a^2 + u_r^2} \cdot 100.$$

Отримане значення напруги короткого замикання не повинно відрізнятись від значення, отриманого у технічному завданні, більше, ніж на $\pm 10\%$. В цьому разі розміри обмоток трансформатора визначено правильно.

При невиконанні умови необхідно змінити висоту обмоток: для зменшення напруги короткого замикання рекомендується збільшувати висоту обмоток і навпаки.

8. РОЗРАХУНОК МАГНІТНОЇ СИСТЕМИ

8.1. Розміри пакетів стрижня і ярма для обраного діаметра стрижня d_n (з п. 4.10) обираються з табл. Г.1–Г.3.

Виконати рисунок поперечних перерізів стрижня та ярма за визначеними розмірами (рис. 8.1).

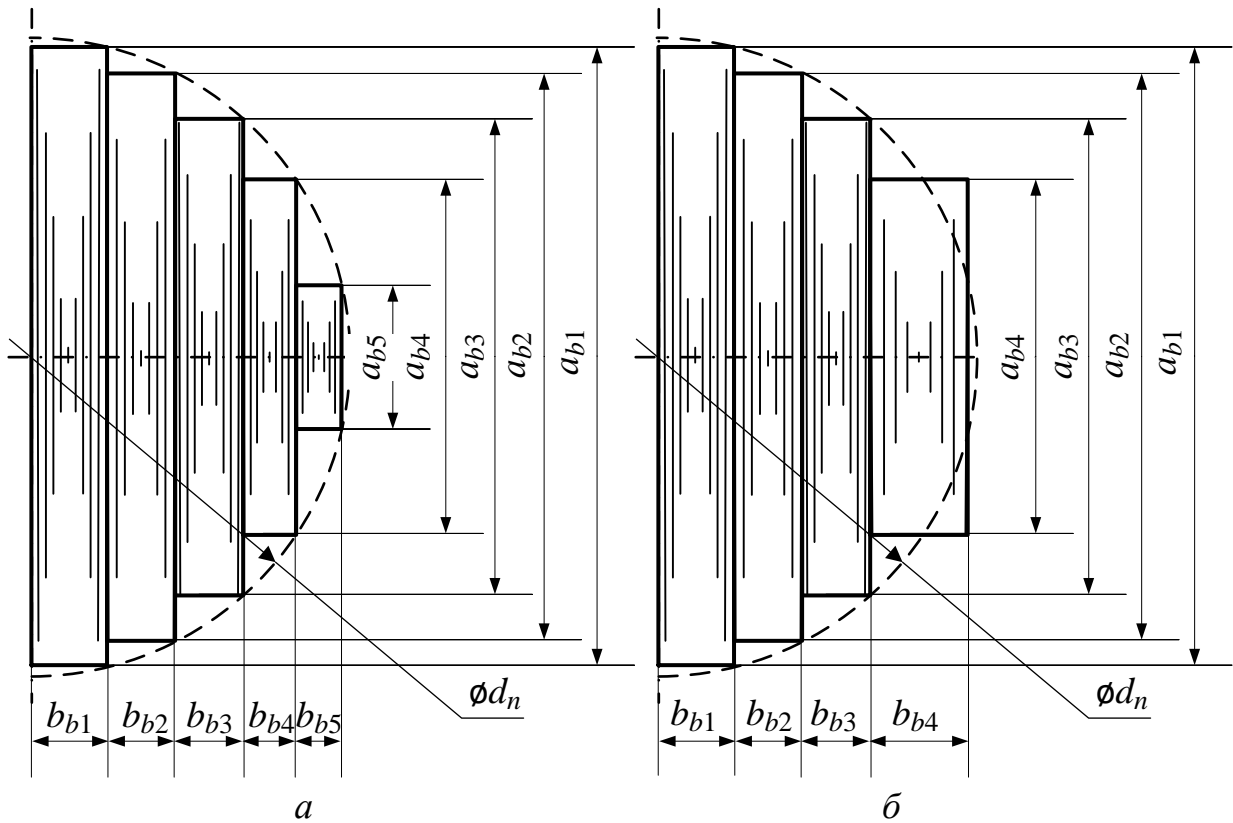


Рисунок 8.1 – Поперечні перерізи стрижня (а) та ярма (б) магнітопроводу трансформатора

8.2. Повна площа поперечного перерізу ярма S_{yf} визначається з табл. 4.5.

8.3. Активна площа поперечного перерізу ярма, мм^2 ,

$$S_y = k_{Fe} \cdot S_{yf}.$$

8.4. Ширина ярма (стрижня), мм ,

$$b_y = 2 \cdot \sum_{i=1}^n b_{bi},$$

де b_i – ширина i -го пакету ярма (стрижня),

n – кількість пакетів ярма (стрижня).

8.5. Довжина стрижня, мм ,

$$l_b = l_1 + 2l_{l2}.$$

8.6. Відстань між осями сусідніх стрижнів, мм ,

$$C = d_{outh} + a_{22}.$$

8.7. Шихтована магнітна система виконується з косими стиками на крайніх стрижнях та прямим на середньому (рис. 8.2). При шихтуванні шари листів магнітопроводу повертаються на 180° .

8.8. Об'єм кута магнітної системи V_c визначається з табл. 8.1.

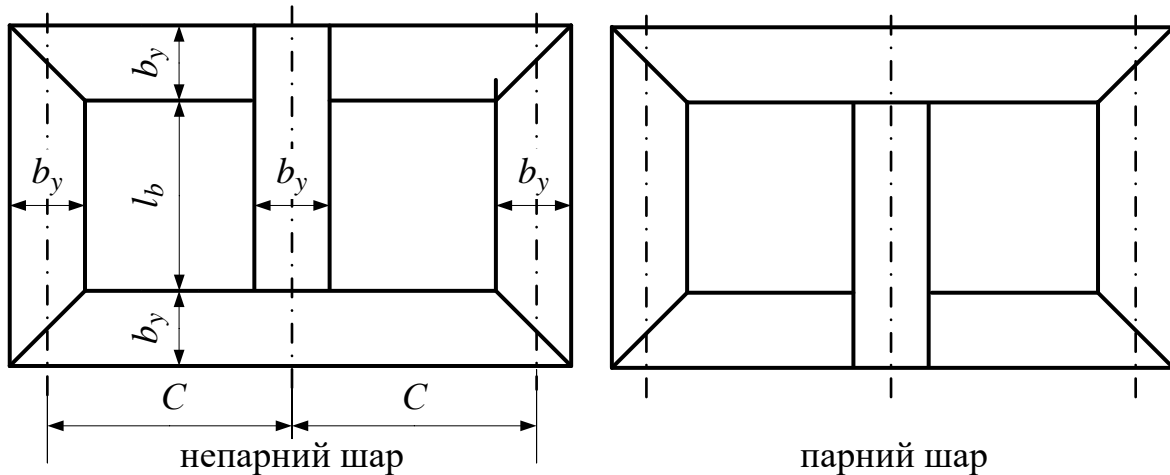


Рисунок 8.2 – Розміри та схема шихтування магнітної системи трансформатора

Таблиця 8.1. – Об'єм кута магнітної системи трансформатора

Діаметр стрижня d_n , мм	Об'єм кута V_c , мм ³	Діаметр стрижня d_n , мм	Об'єм кута V_c , мм ³	Діаметр стрижня d_n , мм	Об'єм кута V_c , мм ³
80	291850	150	2026700	270	11942850
85	356400	160	2408300	280	13335350
90	426150	170	2912050	290	14134650
95	488050	180	3453000	300	15978500
100	585950	190	4118900	310	18342900
105	682950	200	4780600	320	19971500
110	790200	210	5554000	330	19120100
115	781800	220	6421600	340	22539600
120	1033050	230	7440650	350	19417700
125	1156550	240	8386450	360	63243300
130	1298350	250	9469350	370	24457300
140	1617850	260	10617800	380	33510456

8.9. Маса кута магнітної системи, кг,

$$m_c = \gamma_{Fe} \cdot k_s \cdot V_c,$$

де γ_{Fe} – густина сталі, становить $7,65 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³;

k_s визначається з п. 4.9.

8.10. Маса ярем, кг,

$$m_y = 4\gamma_{Fe} \cdot C \cdot S_y + 2m_c.$$

8.11. Маса стрижнів, кг,

$$m_b = 3\gamma_{Fe} \cdot l_b \cdot S_b + 3(\gamma_{Fe} \cdot a_{b1} \cdot S_b - m_c),$$

де a_{b1} – ширина першого пакету стрижня.

8.12. Маса магнітної системи, кг, $m_{mag} = m_y + m_b$.

9. РОЗРАХУНОК ВТРАТ І СТРУМУ НЕРОБОЧОГО ХОДУ

9.1. Магнітна індукція в ярмі, Тл, $B_y = B_b \cdot \frac{S_b}{S_y}$.

9.2. Магнітна індукція в косому стику, Тл, $B_{by} = \frac{B_b}{\sqrt{2}}$.

9.3. Питомі магнітні втрати в елементах магнітної системи трансформатора визначаються з табл. 9.1:

- в стрижні p_b та зазорі «середній стрижень – ярмо» $p_{\delta b}$ за значенням магнітної індукції B_b ;

- в ярмі p_y та зазорах «ярмо – середній стрижень – ярмо» $p_{\delta y}$ – за значенням магнітної індукції B_y ;

- в косому зазорі $p_{\delta by}$ – за значенням магнітної індукції B_{by} .

При визначенні питомих магнітних втрат в зазорах p_{δ} треба мати на увазі, що зазвичай застосовується шихтування в дві пластини як менш трудомістка при виготовленні магнітної системи трансформатора. Але шихтування в одну платину дозволяє зменшити магнітні втрати.

9.4. Втрати неробочого ходу, Вт,

$$P_o = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \left[\left(p_b \cdot m_b + p_y \cdot m_y - 4p_y \cdot m_c + \frac{p_b + p_y}{2} \cdot k_4 \cdot m_c \right) + \right. \\ \left. + \left(4\sqrt{2} \cdot p_{\delta by} \cdot S_b + p_{\delta b} \cdot S_b + 2p_{\delta y} \cdot S_y \right) \cdot 10^{-6} \right],$$

Таблиця 9.1 – Питомі магнітні втрати для холоднокатаної сталі марок 3404 та 3405 товщиною 0,3 та 0,35 мм при частоті 50 Гц

Магнітна індукція В, Тл	Питомі магнітні втрати p , Вт/кг			Питомі магнітні втрати в зазорі p_{δ} , Вт/м ² , при шихтуванні	
	сталь 3404, 0,3 мм	сталь 3404, 0,35 мм	сталь 3405, 0,3 мм	в одну пластину	в дві пластини
0,80	0,300	0,320	0,280	170	215
1,00	0,450	0,475	0,425	265	345
1,20	0,635	0,675	0,610	375	515
1,22	0,659	0,697	0,631	387	536
1,24	0,683	0,719	0,652	399	557
1,26	0,707	0,741	0,673	411	578
1,28	0,731	0,763	0,694	423	589
1,30	0,755	0,785	0,715	435	620
1,32	0,779	0,814	0,739	448	642
1,34	0,803	0,843	0,763	461	664
1,36	0,827	0,872	0,787	474	666
1,38	0,851	0,901	0,811	487	708
1,40	0,875	0,930	0,835	500	730
1,42	0,906	0,964	0,860	514	754
1,44	0,937	0,998	0,869	526	778
1,46	0,968	1,032	0,916	542	802
1,48	0,999	1,066	0,943	556	826
1,50	1,030	1,100	0,970	570	850
1,52	1,070	1,134	1,004	585	878
1,54	1,110	1,168	1,038	600	906
1,56	1,150	1,207	1,074	615	934
1,58	1,190	1,251	1,112	630	962
1,60	1,230	1,295	1,150	645	990
1,62	1,278	1,353	1,194	661	1017
1,64	1,326	1,411	1,238	677	1044
1,66	1,380	1,472	1,268	695	1071
1,68	1,440	1,536	1,344	709	1098
1,70	1,500	1,600	1,400	725	1125
1,72	1,560	1,672	1,460	741	1155
1,74	1,620	1,744	1,520	757	1185
1,76	1,692	1,824	1,588	773	1215

де k_1 – коефіцієнт впливу пресування стрижнів та ярм при складанні, для

трансформаторів номінальною потужністю до 630 кВ·А становить 1,02; від 630 кВ·А до 6300 кВ·А – 1,03–1,05;

k_2 – коефіцієнт впливу перешихтовування верхнього ярма при встановленні обмоток, для трансформаторів номінальною потужністю до 250 кВ·А становить 1,01, від 250 кВ·А до 630 кВ·А – 1,02; від 630 кВ·А до 6300 кВ·А – 1,04–1,08;

k_3 – коефіцієнт впливу механічних напруг при штампуванні пластин, для відпаленої сталі становить 1,05;

k_4 – коефіцієнт збільшення втрат в кутах магнітопроводу; для зазначеної конструкції для сталі товщиною 0,3 мм становить 10,45, для сталі товщиною 0,35 мм – 10,18.

Отримане значення втрат неробочого ходу повинно становити не більше 107,5 % від значення, отриманого у технічному завданні. В цьому разі розміри магнітопроводу трансформатора визначено правильно.

При невиконанні умови необхідно збільшити діаметр стрижня.

9.5. Визначити питомі намагнічувальні потужності в елементах магнітної системи трансформатора з табл. 9.2.

Питомі намагнічувальні потужності визначаються:

-в стрижні q_b та зазорі «середній стрижень – ярмо» $q_{\delta b}$ за значенням магнітної індукції B_b ;

в ярмі q_y та зазорах «ярмо – середній стрижень – ярмо» $q_{\delta y}$ – за значенням магнітної індукції B_y ;

-в косому зазорі $q_{\delta by}$ – за значенням магнітної індукції B_{by} .

9.6. Повна намагнічувальна потужність, Вт,

$$Q_o = k_2 \cdot k_5 \cdot \left[\left(q_b \cdot m_b + q_y \cdot m_y - 4q_y \cdot m_c + \frac{q_b + q_y}{2} \cdot k_6 \cdot m_c \right) + \left(4\sqrt{2} \cdot q_{\delta by} \cdot S_b + q_{\delta b} \cdot S_b + 2q_{\delta y} \cdot S_y \right) \cdot 10^{-6} \right],$$

де k_5 – коефіцієнт впливу пресування стрижнів та ярм при складанні: для трансформаторів номінальною потужністю до 630 кВ·А становить 1,04, від 630 кВ·А до 6300 кВ·А – 1,06–1,1;

k_6 – коефіцієнт збільшення намагнічувальної потужності в кутах магнітопроводу, визначається з табл. 9.3.

Таблиця 9.2 – Питомі намагнічувальні потужності для холоднокатаної сталі

марок 3404 та 3405 товщиною 0,3 та 0,35 мм при частоті 50 Гц

Магнітна індукція В, Тл	Питомі магнітні втрати q , В·А/кг			Питомі магнітні втрати в зазорі q_{δ} , В·А /м ² , для сталі	
	сталь 3404, 0,3мм	сталь 3404, 0,35 мм	сталь 3405, 0,3мм	3404	3405
0,80	0,371	0,375	0,362	280	280
1,00	0,540	0,548	0,525	1000	900
1,20	0,742	0,752	0,722	4000	3700
1,22	0,768	0,782	0,748	4660	4160
1,24	0,793	0,811	0,773	5360	4620
1,26	0,819	0,841	0,799	6040	5080
1,28	0,844	0,870	0,824	6720	5540
1,30	0,870	0,900	0,850	7400	6000
1,32	0,904	0,932	0,880	8200	6640
1,34	0,938	0,964	0,910	9000	7280
1,36	0,972	0,996	0,940	9800	7920
1,38	1,006	1,028	0,970	10600	8560
1,40	1,040	1,060	1,000	11400	9200
1,42	1,089	1,114	1,041	12440	10120
1,44	1,139	1,168	1,082	13480	11040
1,46	1,188	1,222	1,123	14520	11960
1,48	1,238	1,276	1,161	15560	12880
1,50	1,289	1,330	1,205	16600	13800
1,52	1,360	1,408	1,263	17960	14760
1,54	1,431	1,486	1,321	19320	15720
1,56	1,511	1,575	1,383	20700	16800
1,58	1,600	1,675	1,449	22100	18000
1,60	1,688	1,775	1,526	23500	19200
1,62	1,850	1,958	1,645	25100	20480
1,64	2,012	2,131	1,775	26700	21760
1,66	2,289	1,556	1,956	28600	23160
1,68	2,661	3,028	2,188	30800	24680
1,70	3,073	3,400	2,420	33000	27000
1,72	4,013	4,480	3,080	35400	28520
1,74	4,953	5,560	3,740	37800	30840
1,76	6,364	7,180	4,736	40800	33000

Таблиця 9.3. – Значення коефіцієнту збільшення намагнічувальної потужності в кутах магнітопроводу для холоднокатаної сталі марок 3404 та 3405 товщиною

0,3 та 0,35 мм при частоті 50 Гц

Магнітна індукція B_b , Тл	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8
Коефіцієнт k_6	38,5	41,7	42,45	40,5	33,66

9.7. Відносний струм неробочого ходу, %, $i_o = \frac{Q_o}{10S_N}$.

Отримане струму неробочого ходу повинно становити не більше 115 % від значення, отриманого у технічному завданні. В цьому разі розміри магнітопроводу трансформатора визначено правильно.

При невиконанні умови необхідно змінити діаметр стрижня.

9.8. Активна складова струму неробочого ходу, %, $i_{oa} = \frac{P_o}{10S_N}$.

9.9. Реактивна складова струму неробочого ходу, %, $i_{or} = \sqrt{i_o^2 - i_{oa}^2}$.

9.10. При виконанні умов за значеннями втрати неробочого ходу P_o , та короткого замикання P_k , напруги короткого замикання u_k , струму неробочого ходу i_o обрані конструкції та розміри обмоток та магнітопроводу трансформатора можна вважати остаточними.

10. РОЗРАХУНОК МЕХАНІЧНИХ СИЛ В ОБМОТКАХ

10.1. Усталений струм короткого замикання обмотки вищої напруги, А,

$$I_{kst} = \frac{I_{\phi h N}}{u_k}$$

10.2. Максимальний струм короткого замикання обмотки вищої напруги, А,

$$I_{k \max} = \sqrt{2} \cdot \left(1 + e^{-\frac{\pi \cdot u_a}{u_r}} \right) \cdot I_{kst}$$

10.3. Радіальна сила, що діє на обмотку вищої напруги, Н,

$$F_r = \frac{\mu_0}{2} \cdot (I_{k \max} \cdot N_{h2})^2 \cdot \beta_c \cdot K_R$$

10.4. Розтягувальна напруга від радіальних сил в проводі обмотки вищої напруги, Па,

$$\sigma_r = \frac{F_r}{2\pi \cdot N_{h2} \cdot S_h} \cdot 10^6.$$

Отримане значення розтягувальної напруги від радіальних сил в проводі обмотки вищої напруги не повинно перевищувати гранично допустиме значення, яке становить для міді $60 \cdot 10^6$ Па, для алюмінію – $25 \cdot 10^6$ Па.

10.5. Стискальна напруга від радіальних сил в проводі обмотки нижчої напруги, Па,

$$\sigma_{cr} = \frac{F_r}{2\pi \cdot N_l \cdot S_l} \cdot 10^6.$$

Отримане значення стискальної напруги від радіальних сил в проводі обмотки нижчої напруги не повинно перевищувати гранично допустиме значення, яке становить для міді $30 \cdot 10^6$ Па, для алюмінію – $15 \cdot 10^6$ Па.

10.6. Осьові сили, обумовлені співвідношенням висоти та ширини обмотки, Н,

$$F_{ax} = \frac{F_r \cdot a_{\sigma}}{2l_l}.$$

10.7. Найбільша напруга стискання, Па:

- для циліндричної обмотки по середині висоти обмотки нижчої напруги в

ізоляції витків $\sigma_c = \frac{F_{ax}}{2a \cdot n_{ll} \cdot d_{avl}} \cdot 10^6;$

- для гвинтової обмотки в міжвиткових прокладках по середині висоти

обмотки нижчої напруги $\sigma_c = \frac{F_{ax}}{n_r \cdot a_l^2} \cdot 10^6,$

де n_r – кількість рейок між витками обмотки, обирається з табл. 10.1.

Отримане значення найбільшої напруги стискання не повинно перевищувати гранично допустимого значення $20 \cdot 10^6$ Па.

Таблиця 10.1 – Рекомендована кількість рейок між витками або котушками обмотки

Номінальна потужність трансформатора, кВ·А	Кількість рейок
до 100	6
від 100 до 630	8
від 630 до 1600	8–12
від 2500	12–16

10.8. Температура обмотки вищої напруги через 4 с після виникнення

короткого замикання, °С,

$$\theta_c = \frac{2680}{k_{Me} \cdot \left(\frac{u_k}{J_l}\right)^2 - 4} + 90,$$

де k_{Me} – коефіцієнт, що враховує збільшення активного опору обмоток при збільшенні температури та теплоємність метала та ізоляції, становить для міді 12,5, для алюмінія – 5,5.

Отримане значення температури обмотки вищої напруги через 4 с після виникнення короткого замикання не повинно перевищувати гранично допустимого значення температури обмотки, для мідних обмоток становить 250°С, для алюмінієвих – 200°С.

11. ТЕПЛОВИЙ РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА

11.1. Перевищення температури в ізоляції обмотки нижчої напруги, °С,

$$\theta_l = \frac{\Phi_l \cdot \Delta}{\lambda_{is}} \cdot 10^{-3},$$

де Δ – товщина ізоляції проводу на один бік, для проводів марок ПБ і АПБ становить 0,25 мм;

λ_{is} – теплопровідність ізоляції проводу, для проводів марок ПБ і АПБ становить 0,17 Вт/(м·°С).

11.2. Перевищення температури в ізоляції обмотки вищої напруги

11.2.1. Перевищення температури в ізоляції циліндричної багатошарової обмотки вищої напруги з проводу прямокутного та круглого поперечного перерізу

11.2.1.1. Питомі об'ємні втрати на 1 м³ загального об'єму обмотки, Вт/м³:

- для проводу прямокутного поперечного перерізу

$$P_{elh} = \frac{\rho_{75h} \cdot J_h^2 \cdot S_h}{(a_{is} + \delta_{lh}) \cdot b_{is}};$$

- для проводу круглого поперечного перерізу

$$P_{elh} = \frac{\rho_{75h} \cdot J_h^2 \cdot S_h}{(d_{is} + \delta_{lh}) \cdot d_{is}}.$$

11.2.1.2. Середня умовна теплопровідність обмотки без урахування міжшарової ізоляції, Вт/(м·°С):

- для проводу прямокутного поперечного перерізу $\lambda_{lh} = \lambda_{is} \cdot \frac{b \cdot a_{is}}{(b_{is} - b) \cdot b_{is}}$;

- для проводу круглого поперечного перерізу $\lambda_{lh} = \frac{\lambda_{is}}{0,7 \sqrt{\frac{d_{is} - d}{d}}}$.

11.2.1.3. Середня теплопровідність обмотки, Вт/(м·°С):

- для проводу прямокутного поперечного перерізу $\lambda_h = \frac{\lambda_{lh} \cdot \lambda_{is} \cdot (a_{is} + \delta_{lh})}{\lambda_{is} \cdot a_{is} + \lambda_{lh} \cdot \delta_{lh}}$;

- для проводу круглого поперечного перерізу $\lambda_h = \frac{\lambda_{lh} \cdot \lambda_{is} \cdot (d_{is} + \delta_{lh})}{\lambda_{is} \cdot d_{is} + \lambda_{lh} \cdot \delta_{lh}}$.

11.2.1.4. Перевищення температури обмотки вищої напруги, °С,

$$\theta_h = \frac{P_{elh} \cdot a_{\max h}^2}{\lambda_{is}} \cdot 10^{-6},$$

де $a_{\max h}$ – ширина більшої частини котушки, визначається пропорційно кількості шарів зовнішньої котушки (див. п. 6.10.9) від радіального розміру обмотки вищої напруги a_h (див. п. 6.10.10).

11.2.2. Перевищення температури в ізоляції спіральної обмотки вищої напруги, °С,

$$\theta_h = \frac{\Phi_h \cdot \Delta}{\lambda_{is}} \cdot 10^{-3}.$$

11.3. Перевищення температури на поверхні обмотки нижчої напруги, °С:

- для циліндричних обмоток (з вертикальними охолодними каналами) та гвинтових обмоток баз радіальних каналів

$$\theta_{ml} = 0,285 \cdot \Phi_l^{0,6};$$

- для гвинтових обмоток з радіальними охолодними каналами

$$\theta_{ml} = k_c \cdot 0,385 \cdot \Phi_l^{0,6},$$

де k_c – коефіцієнт впливу конвекції оливи в радіальних каналах, визначається залежно від відношення осьового розміру охолодного каналу між котушками l_{cl} до радіального розміру котушки a_l з табл. 11.1.

Таблиця 11.1 – Коефіцієнт впливу конвекції оливи в радіальних каналах

Відношення l_{cl} / a_l	0,07– 0,08	0,08– 0,09	0,1	0,11– 0,12	0,13– 0,14	0,15– 0,19	$\geq 0,2$
Коефіцієнт k_c	1,1	1,05	1,0	0,95	0,9	0,85	0,8

11.4. Перевищення температури на поверхні обмотки вищої напруги, °С:

- для циліндричних обмоток $\theta_{mh} = 0,285 \cdot \Phi_h^{0,6}$;

- для спіральних обмоток $\theta_{ml} = k_c \cdot 0,385 \cdot \Phi_h^{0,6}$,

де k_c обирається з п. 11.3.

11.5. Перевищення температури обмоток над температурою трансформаторної оливи, °С:

- для обмотки нижчої напруги $\theta_{wl} = \theta_l + \theta_{ml}$;

- для обмотки вищої напруги $\theta_{wh} = \theta_h + \theta_{mh}$.

Перевищення температури для обмоток оливних трансформаторів має бути не більше за 65°С.

12. РОЗРАХУНОК БАКА ТРАНСФОРМАТОРА

12.1. Бак трансформатора обирається залежно від номінальної потужності трансформатора S_N з табл. 12.1. Розміри бака залежно від головних розмірів трансформатора наведено на рис. А.1.

12.2. Мінімальна ширина бака, мм,

$$B = d_{outh} + s_1 + s_2 + d_h + s_3 + s_4 + d_l,$$

де s_1 – ізоляційна відстань від ізольованого відведення обмотки вищої напруги до самої обмотки, визначається з табл. 12.2;

s_2 – ізоляційна відстань від ізольованого відведення обмотки вищої напруги до стінки бака, прийняти такою, що дорівнює ізоляційній відстані s_1 ;

d_h – діаметр ізольованого відведення обмотки вищої напруги, прийняти таким, що дорівнює 20 мм;

s_3 – ізоляційна відстань від ізольованого відведення обмотки нижчої напруги до обмотки вищої напруги, визначається з табл. 12.2;

s_4 – ізоляційна відстань від ізольованого відведення обмотки нижчої напруги до стінки бака, прийняти такою, що дорівнює ізоляційній відстані s_3 ;

d_l – діаметр ізольованого відведення обмотки нижчої напруги, прийняти таким, що дорівнює 15 мм.

12.3. Мінімальна довжина бака, мм, $A = 2C + B$.

12.4. Глибина бака, мм, $H = l_b + 2h_y + \Delta h + h_{ye}$,

де h_y – висота ярма, дорівнює ширині найширшого пакету ярма a_{b1} ;

Таблиця 12.1 – Типи баків силових оливних трансформаторів

Номінальна потужність трансформатора S_N , кВ·А	Тип бака
до 40	Бак з гладкими стінками
40–630	Бак із хвилястими стінками
63–1600	Бак з увареними охолодними гнутими трубами (трубчастий)
від 100 до 6300	Бак з навісними радіаторами з прямими трубами
від 2500 до 10000	Бак з навісними радіаторами з гнутими трубами

Таблиця 12.2 – Мінімально допустимі ізоляційні відстані між елементами трансформатора

Випробувальна напруга $U_{h\ test}$ або $U_{l\ test}$, кВ	Ізоляційна відстань s_1 , мм	Ізоляційна відстань s_3 , мм
до 25	20	20
35	20	20
45	25	30
55	32	30
85	50	50

Δh – товщина підкладки під нижнє яро, становить 30–50 мм;

h_{ye} – відстань від верхнього яро до кришки бака трансформатора, при класах напруги обмотки вищої напруги до 6 кВ становить 270 мм; для 10 кВ, 15 кВ та 20 кВ – 300 мм; від 35 кВ – 470 мм.

12.5. Периметр бака, мм, $P_t = 2(A - B) + \pi \cdot B$.

12.6. Площа поверхні тепловіддачі бака, яка здійснюється випромінюванням, м²,

$$S_{rad} = k_t \cdot P_t \cdot H \cdot 10^{-6},$$

де k_t – коефіцієнт, що враховує збільшення поверхні тепловіддачі по відношенню до гладкого бака; для гладкого бака дорівнює 1,0; для бака із хвилястими стінками – 1,1–1,2; для трубчастого бака – 1,2–1,5; для бака з навісними радіаторами – 2,0–2,5.

12.7. Допустиме перевищення середньої температури трансформаторної оливи над температурою зовнішнього повітря, °С,

$$\theta_{oil} = \theta_{max} - \max(\theta_{wl}; \theta_{wh}),$$

де θ_{max} – тривало допустиме середнє перевищення температури обмоток над зовнішнім повітрям, приймається таким, що дорівнює $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,

$\max(\theta_{wl}; \theta_{wh})$ – максимальне значення серед θ_{wl} та θ_{wh} (див. п. 11.5).

12.8. Перевищення температури верхніх шарів трансформаторної оливи над температурою зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$, $\theta_{oil1} = 1,2\theta_{oil}$.

Отримане значення θ_{oil1} має бути меншим за $60\text{ }^{\circ}\text{C}$. При невиконанні цієї умови збільшити поверхню тепловіддачі або перейти на іншу конструкцію бака трансформатора.

12.9. Середнє перевищення температури стінки бака над температурою зовнішнього повітря, $^{\circ}\text{C}$,

$$\theta_a = \theta_{oil} - \theta_{oila},$$

де θ_{oila} – перевищення температури оливи над температурою бака трансформатора, для силових трифазних трансформаторів становить $5\text{--}6\text{ }^{\circ}\text{C}$.

12.10. Необхідна площа поверхні тепловіддачі бака, яка здійснюється конвекцією, m^2 ,

$$S_{conre} = \frac{1,05(P_k + P_o)}{2,5\theta_a^{1,25}} - 1,12S_{rad}.$$

Подальший розрахунок виконувати залежно від конструкції бака трансформатора: для гладкого бака за п. 12.11; для бака із хвилястими стінками за п. 12.12; для трубчастого бака за п. 12.13; для бака з навісними радіаторами за п. 12.14.

12.11. Розрахунок гладкого баку

12.11.1. Площа стінок бака, m^2 , $S_a = P_t \cdot H \cdot 10^{-6}$.

12.11.2. Площа кришки з верхньою рамою бака трансформатора, m^2 ,

$$S_{ef} = \left[(A - B) \cdot B + \frac{\pi B^2}{4} + P_t \cdot h_f \right] \cdot 10^{-6},$$

де h_f – висота верхньої рами бака, становить 80 мм .

12.11.3. Площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора, яка здійснюється конвекцією, m^2 ,

$$S_{con} = S_a + k_c \cdot S_{ef}$$

де k_c – коефіцієнт, що враховує затуляння поверхні кришки бака ізоляторами виведень обмоток вищої та різноманітною арматурою трансформатора, для трифазних силових трансформаторів прийняти таким, що дорівнює $0,5$.

Отримана площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора має бути не

меншою за необхідну, $S_{con} \geq S_{conre}$. При невиконанні умови або збільшити поверхню тепловіддачі, або перейти на іншу конструкцію бака трансформатора. Подальший розрахунок продовжити з п. 12.15.

12.12. Розрахунок бака із хвилястими стінками (рис. 12.2)

12.12.1. Мінімальна ширина повітряного каналу між хвилями стінки бака трансформатора, мм,

$$a_w = 2,5c_w,$$

де c_w – мінімальна ширина оливного каналу, для силового трансформатора становить 10 мм.

Отримані значення a_w та c_w уточнюються за креслеником.

12.12.2. Крок хвиль стінки бака, мм,

$$t_w = a_w + c_w + 2\delta_w,$$

де δ_w – товщина стінки бака, становить 0,8–1 мм.

12.12.3. Розгорнута довжина хвилі стінки бака, мм,

$$l_w = 2b_w + t_w - 0,86\delta_w.$$

де b_w – найбільша глибина хвилі, для силового трансформатора становить 300 мм

12.12.4. Кількість хвиль стінок бака $m_w = \frac{2(A - B) + \pi B}{t_w}$.

Отримане значення m_w заокруглити до найближчого меншого парного числа.

12.12.5. Коефіцієнт, що враховує ускладнення конвекції в повітряних

каналах між хвилями стінок бака, $k_w = 1 - \frac{\left(\frac{b_w}{a_w}\right)^2}{190}$.

12.12.6. Площа поверхні стінок бака трансформатора, м²,

$$S_w = k_w \cdot m_w \cdot l_w \cdot H \cdot 10^{-6}.$$

12.12.7. Площа поверхні верхньої рами бака, м²,

$$S_f = t_w \cdot m_w \cdot h_f \cdot 10^{-6},$$

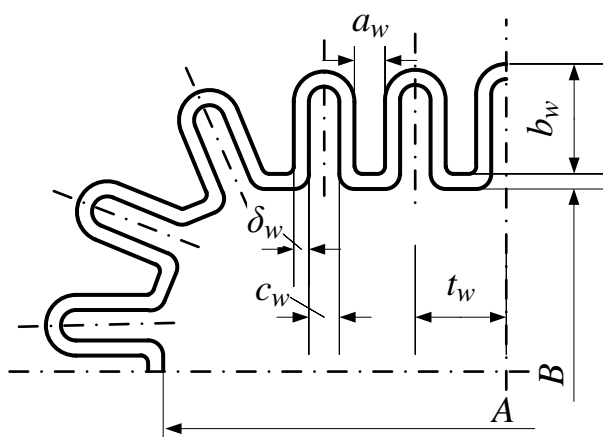


Рисунок 12.2 – Розміри елементів бака із хвилястими стінками

де h_f – висота верхньої рами бака, становить 100 мм.

12.12.8. Площа кришки бака трансформатора, м²,

$$S_e = \left[(A - B) \cdot B + \frac{\pi B^2}{4} \right] \cdot 10^{-6}.$$

12.12.9. Площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора, яка здійснюється конвекцією, м²,

$$S_{con} = S_w + S_f + k_c \cdot S_e$$

де k_c – коефіцієнт, що враховує затуляння поверхні кришки бака ізоляторами виведень обмоток вищої та різноманітною арматурою трансформатора, для трифазних силових трансформаторів прийняти таким, що дорівнює 0,5.

Отримана площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора має бути не меншою за необхідну, $S_{con} \geq S_{conre}$. При невиконанні умови або збільшити поверхню тепловіддачі, або перейти на іншу конструкцію бака трансформатора.

Подальший розрахунок продовжити з п. 12.15.

12.13. Розрахунок трубчастого бака (рис. 12.3)

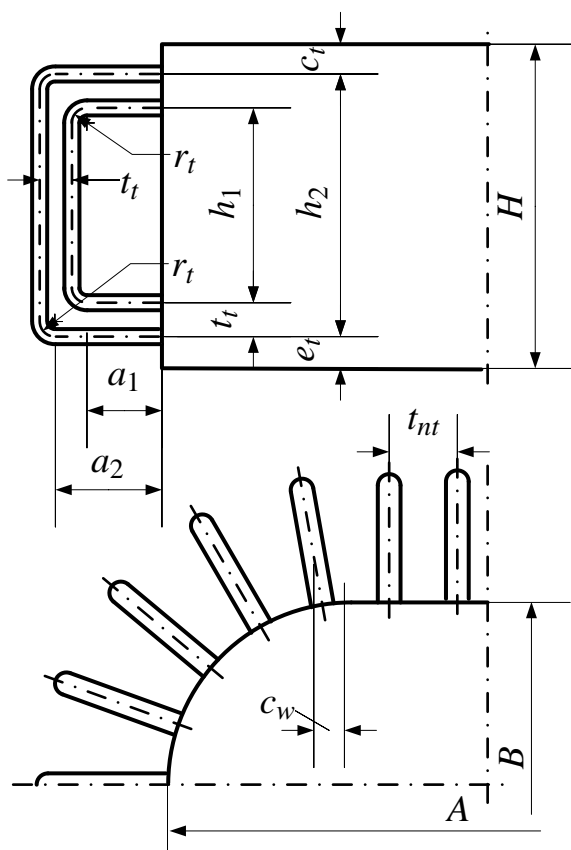


Рисунок 12.3 – Розміри елементів трубчастого бака

12.13.1. Форма та розміри труб, кількість рядів труб n_t , кроки між рядами труб t_t та між трубами в ряду t_{nt} , радіус вигину труби r_t визначаються з табл. 12.3 залежно від номінальної потужності трансформатора S_N .

12.13.2. Довжина прямої ділянки внутрішнього ряду труб $a_{t1} = 50$ мм.

12.13.3. Довжина прямої ділянки подальших рядів труб, мм,

$$a_{t2} = a_{t1} + t_t; a_{t3} = a_{t2} + t_t.$$

12.13.4. Мінімальні відстані від осі труби до кришки c_t та дна e_t бака обирається з табл. 12.4 залежно від форми та кількості рядів труб n_t .

Таблиця 12.3 – Характеристики круглих та овальних труб баків силових трансформаторів

Кількість рядів труб n_t при номінальній потужності S_N , кВ·А			Форма труби	Розміри поперечного перерізу, мм	Площа поперечного перерізу S_t , м ²	Крок, мм		Радіус вигину труби r_t , мм
63–160	250–630	1000–1600				між рядами труб t_t	між трубами в ряду t_{nt}	
1	2	2; 3	кругла	ø50	0,16	75	70	150
1	1	2; 3	кругла	ø30	0,0942	55	50	150
1	1	1; 2	овальна	72×20	0,16	100	50	188

Таблиця 12.4 – Мінімальні відстані від осі труби до кришки та дна бака оливного силового трансформатора

Величина	Значення		
Кількість рядів труб n_t	1	2	3
Мінімальна відстань від осі труби до кришки c_t , мм	60	75	90
Мінімальна відстань від осі труби до дна e_t , мм	70	85	100
<i>Примітка:</i> для труб овального перерізу значення c_t та e_t збільшити на 10 мм кожне			

12.13.5. Відстань між осями труб по висоті бака, мм, від зовнішнього до внутрішнього ряду відповідно:

- при $n_t = 1$ $b_{t1} = H - (c_t + e_t)$;
- при $n_t = 2$ $b_{t2} = H - (c_t + e_t)$, $b_{t1} = b_{t2} - 2t_t$;
- при $n_t = 3$ $b_{t3} = H - (c_t + e_t)$, $b_{t2} = b_{t3} - 2t_t$, $b_{t1} = b_{t2} - 2t_t$.

12.13.6. Розгорнута довжина труби в кожному ряду, мм:

- для першого (внутрішнього) ряду $l_{t1} = b_{t1} + 2a_{t1} + \pi r_t$;
- для другого ряду (при наявності) $l_{t2} = b_{t2} + 2a_{t2} + \pi r_t$;
- для третього ряду (при наявності) $l_{t3} = b_{t3} + 2a_{t3} + \pi r_t$.

12.13.7. Кількість труб в одному ряду $m_t = \frac{2(A - B) + \pi B}{t_{nt}}$.

Отримане значення m_t заокруглити до найближчого меншого парного числа.

12.13.8. Площа поверхні труб бака, m^2 ,

$$S_t = \left[\pi(2a_{t1} + 2r_t + 2t_t(n_t - 1) + d_t) \right] \cdot H \cdot 10^{-6},$$

де d_t – діаметр круглої труби або більший розмір поперечного перерізу овальної труби.

12.13.9. Площа поверхні стінок бака, m^2 ,

$$S_a = \left[2(A - B) + \pi \cdot B \right] \cdot H \cdot 10^{-6}.$$

12.13.10. Площа поверхні верхньої рами бака, m^2 ,

$$S_f = \left[2(A - B) + \pi B \right] \cdot h_f \cdot 10^{-6},$$

де h_f – висота верхньої рами бака, становить 100 мм.

12.13.10. Площа кришки бака трансформатора, m^2 ,

$$S_e = \left[(A - B) \cdot B + \frac{\pi B^2}{4} \right] \cdot 10^{-6}.$$

12.13.11. Площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора, яка здійснюється конвекцією, m^2 ,

$$S_{con} = S_a + S_f + k_c \cdot S_e + k_t \cdot S_t$$

де k_c – коефіцієнт, що враховує затуляння поверхні кришки бака ізоляторами виведень обмоток вищої та різноманітною арматурою трансформатора, для трифазних силових трансформаторів прийняти таким, що дорівнює 0,5;

k_t – коефіцієнт, що враховує покращення тепловіддачі конвекцією поверхонь труб: для однорядного розташування труб ($n_t = 1$) дорівнює 1,4; дворядного ($n_t = 2$) – 1,344; трирядного ($n_t = 3$) – 1,302.

Отримана площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора має бути не меншою за необхідну, $S_{con} \geq S_{conre}$. При невиконанні умови або збільшити поверхню тепловіддачі, або перейти на іншу конструкцію бака трансформатора. Поверхню тепловіддачі можна змінити коригуванням розмірів бака або труб.

Подальший розрахунок продовжити з п. 12.15.

12.14. Розрахунок бака з навісними радіаторами (рис. 12.4, 12.5)

12.14.1. Необхідна площа поверхні тепловіддачі радіаторів, яка здійснюється конвекцією, m^2 ,

$$S_{conrs} = S_{conre} - P_b \cdot H \cdot 10^{-6}.$$

12.14.2. Максимально допустима відстань між осями патрубків радіатора, мм,

$$H_{r\max} = H - 2 \cdot h_r,$$

де h_r – мінімальна відстань від дна та верха бака, для бака з навісними радіаторами становить 170 мм.

12.14.3. Тип та розміри радіаторів з прямими трубами (рис. 12.4) обираються з табл. 12.5, для радіаторів з гнутими трубами (рис. 12.5) – з табл. 12.6. Відстань між осями

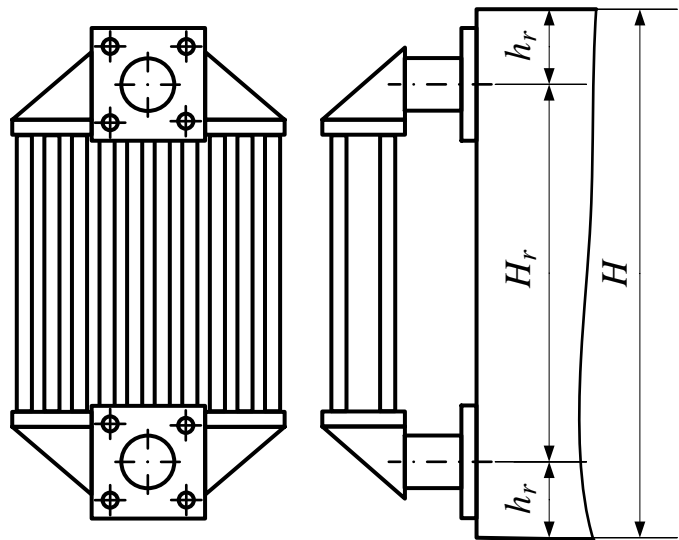


Рисунок 12.4 – Розміри елементів бака з навісними радіаторами з двома рядами прямих труб

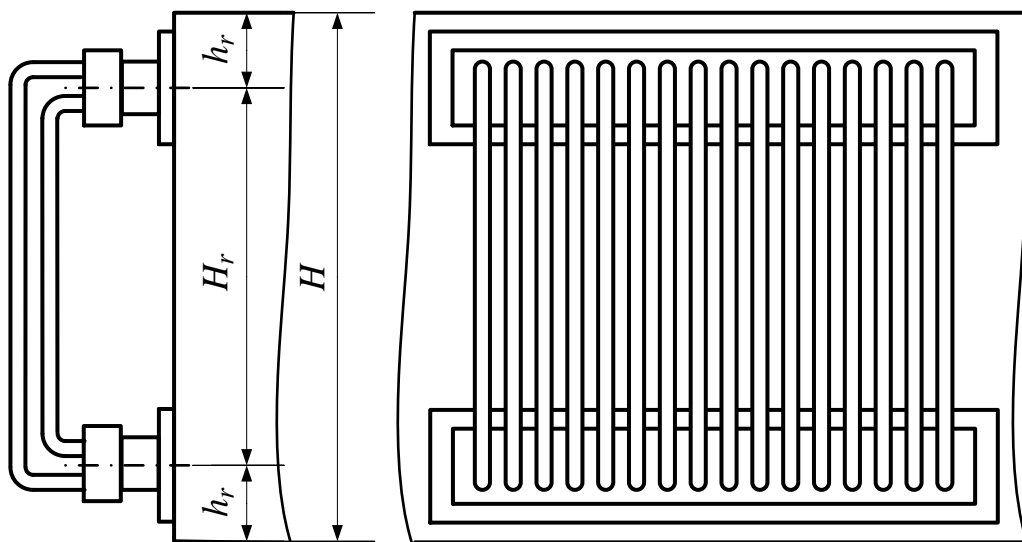


Рисунок 12.5 – Розміри елементів бака з навісними одинарними радіаторами з гнутими трубами

патрубків радіатора має бути меншою за максимально допустиму, $H_r \leq H_{r\max}$.

12.14.4. Площа поверхні тепловіддачі одного радіатора, яка здійснюється конвекцією, m^2 ,

$$S_r = k_t \cdot S_{tr} + S_{cr},$$

де k_t – коефіцієнт, що враховує покращення тепловіддачі конвекцією поверхонь труб: для радіаторів з прямими трубами становить 1,26, з гнутими – 1,4;

S_{cr} – площа поверхні тепловіддачі двох трубних колекторів: для радіаторів з одним рядом прямих труб становить $0,15 m^2$, з двома рядами – $0,34 m^2$; для

одинарного радіатора з гнутими трубами становить 0,72 м², для подвійного – 0,66 м².

Таблиця 12.5 – Тип та розміри радіаторів з прямими трубами

Відстань між осями патрубків радіатора H_r , мм	Площа поверхні тепловіддачі труб радіатора S_{tr} , м ²	Відстань між осями патрубків радіатора H_r , мм	Площа поверхні тепловіддачі труб радіатора S_{tr} , м ²
з одним рядом труб (7 труб в ряду)			
710	0,746	1615	4,961
900	0,958	1800	5,613
1400	4,333	–	–
з двома рядами труб (по 10 труб в ряду)			
710	2,135	2000	6,253
900	2,733	2200	6,893
1150	3,533	2400	7,533

Таблиця 12.6 – Тип та розміри радіаторів з гнутими трубами

Відстань між осями патрубків радіатора H_r , мм	Площа поверхні тепловіддачі труб S_{tr} , м ²		Відстань між осями патрубків радіатора H_r , мм	Площа поверхні тепловіддачі труб S_{tr} , м ²	
	одинарного радіатора	подвійного радіатора		одинарного радіатора	подвійного радіатора
1880	11,45	22,9	3000	17,2	34,4
2000	12,1	24,2	3250	18,5	36,9
2285	13,55	27,1	3750	21,0	42,0
2485	14,55	29,0	4000	22,3	44,6
2685	15,6	31,2	4250	24,6	47,2

12.14.5. Кількість радіаторів

$$m_r = \frac{S_{conrs}}{S_r}$$

Отримане значення m_r заокруглити до більшого цілого числа.

12.14.6. Площа поверхні тепловіддачі стінок бака, м²,

$$S_w = [2(A - B) + \pi \cdot B] \cdot H \cdot 10^{-6}$$

12.14.8. Площа поверхні тепловіддачі верхньої рами бака, м²,

$$S_f = [2(A - B) + \pi B] \cdot h_f \cdot 10^{-6},$$

де h_f – висота верхньої рами бака, становить 100 мм.

12.14.9. Площа кришки бака трансформатора, м²,

$$S_e = \left[(A - B) \cdot B + \frac{\pi B^2}{4} \right] \cdot 10^{-6}.$$

12.14.10. Площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора, яка здійснюється конвекцією, м²,

$$S_{con} = S_w + S_f + k_c \cdot S_e + m_r \cdot S_r$$

де k_c – коефіцієнт, що враховує затуляння поверхні кришки бака ізоляторами виведень обмоток вищої та різноманітною арматурою трансформатора, для трифазних силових трансформаторів прийняти таким, що дорівнює 0,5.

Отримана площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора має бути не меншою за необхідну, $S_{con} \geq S_{conre}$. При невиконанні умови збільшити поверхню тепловіддачі бака трансформатора.

12.15. Площа поверхні тепловіддачі бака трансформатора, яка здійснюється випромінюванням, м² (рис. 12.6):

- для гладкого бака $S_{rad} = S_{con}$;

- для бака із хвилястими стінками

$$S_{rad} = [2(A - B) + \pi(B + 2(b_w + \delta_w))] \cdot (H - 100) \cdot 10^{-6} + S_f + k_c \cdot S_e;$$

- для трубчастого бака

$$S_{rad} = [2(A - B) + \pi(2a_1 + 2r_t + 2t_t \cdot (n_t - 1) + d_t)] \cdot H \cdot 10^{-6} + k_c \cdot S_e;$$

- для бака з радіаторами

$$S_{rad} = P_{rad} \cdot H \cdot 10^{-6},$$

де P_{rad} – периметр поверхні тепловіддачі бака, яка здійснюється випромінюванням, мм. Для бака з навісними радіаторами визначається за креслеником з розташуванням радіаторів з дотриманням мінімальних відстаней: при паралельному розташуванні колекторів для одинарних радіаторів – 100 мм, для подвійних – 160 мм; для при розташуванні колекторів під кутом для одинарних радіаторів – 70 мм, для подвійних – 100 мм.

12.16. Середнє перевищення температури стінки бака трансформатора над температурою зовнішнього повітря, °С,

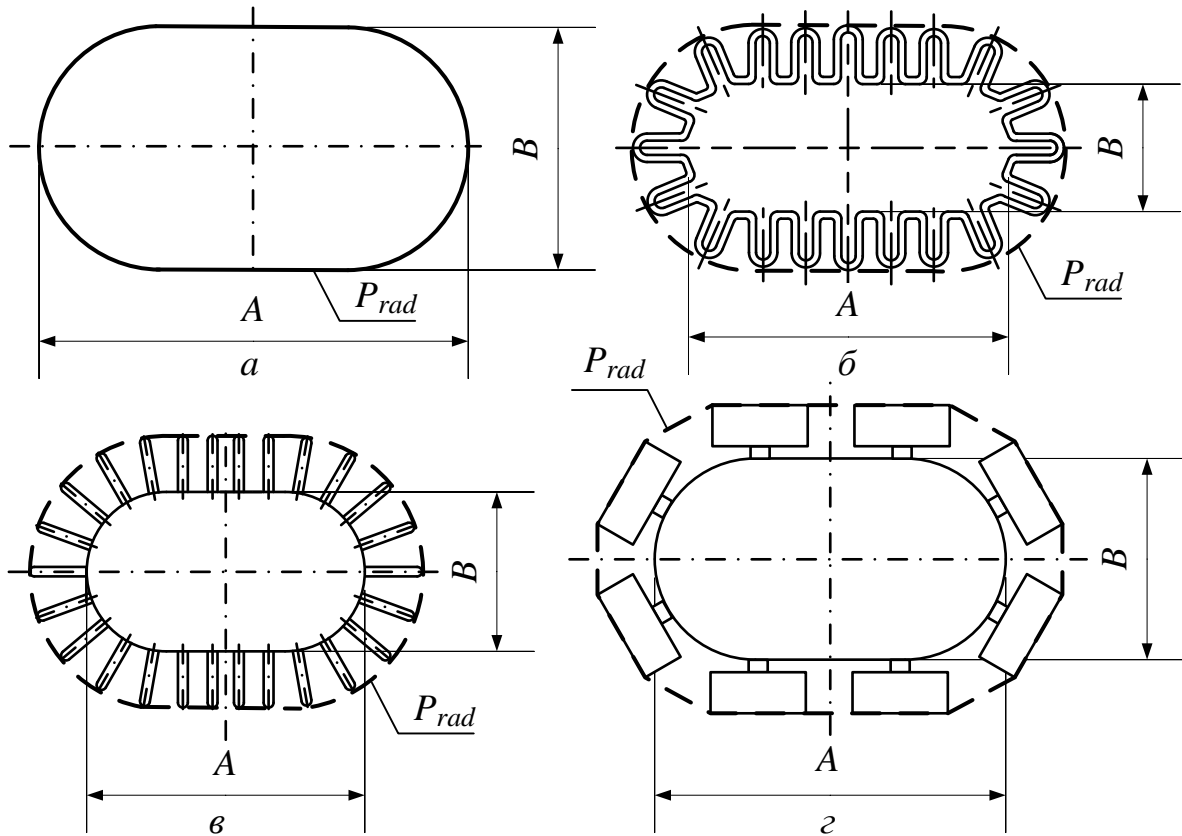


Рисунок 12.6 – Периметр поверхні тепловіддачі, яка здійснюється випромінюванням:
a – для гладкого бака; *б* – для хвилястого бака;
в – для трубчастого бака; *г* – для бака з навісними радіаторами

$$\theta_t = \left(\frac{1,05(P_k + P_o)}{2,8S_{rad} + 2,5S_{con}} \right)^{0,8}.$$

12.17. Середнє перевищення температури оливи біля стінки бака трансформатора над температурою стінки бака, °С,

$$\theta_{oilt} = 0,165 \left(\frac{1,05(P_k + P_o)}{S_c} \right)^{0,6},$$

де S_c – площа поверхні конвекції без урахування площі поверхні стінок бака та коефіцієнтів, що враховують змінення умов конвекції:

-для гладкого бака $S_c = S_a + k_c \cdot S_{ef}$;

- для бака із хвилястими стінками $S_c = \frac{S_w}{k_w} + S_f + k_c \cdot S_e$;

- для трубчастого бака $S_c = S_a + S_f + k_c \cdot S_e + S_t$;

- для бака з радіаторами $S_c = S_w + S_f + k_c \cdot S_e + m_r \cdot (S_{tr} + S_{cr})$.

12.18. Перевищення температури оливи у верхніх шарах над температурою

зовнішнього повітря, °C, $\theta_{oil} = 1,2(\theta_t + \theta_{oilt})$.

12.19. Перевищення температури обмоток над температурою зовнішнього повітря, °C:

- для обмотки нижчої напруги $\theta_l = \theta_{wl} + \theta_{oilt} + \theta_t$;

- для обмотки вищої напруги $\theta_h = \theta_{wh} + \theta_{oilt} + \theta_t$.

Отримані значення температур θ_l та θ_h не повинні перевищувати 65 °C.

13. РОЗРАХУНОК ХАРАКТЕРИСТИК ТРАНСФОРМАТОРА

13.1. Розрахунок магнітної характеристики

13.1.1. Магнітною характеристикою трансформатора є залежність максимального значення магнітного потоку в осерді трансформатора від МРС первинної обмотки при неробочому ході $\Phi_m(F_{po})$. За традицією магнітна характеристика розраховується для знижувального трансформатора, отже, для значень напруги первинної обмотки (0; 0,5; 0,7; 0,9; 1,0; 1,1) $U_{\text{фр}N}$.

При розрахунку магнітної характеристики прийняти величину немагнітних зазорів в косих та прямому стику магнітопроводу трансформатора $\delta = 0,035$ мм.

13.1.2. Магнітний потік, Вб, $\Phi_m = \frac{U_{\text{фр}N}}{\pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot N_p}$.

13.1.3. Магнітна індукція в стрижні, Тл, $B_b = \frac{\Phi_m}{S_b} \cdot 10^9$.

13.1.4. Магнітна індукція в ярмі, Тл, $B_y = \frac{\Phi_m}{S_y} \cdot 10^9$.

13.1.5. Напруженість магнітного поля в стрижні H_b визначається для значення магнітної індукції B_b по кривій намагнічування сталі магнітопроводу трансформатора (табл. 13.1).

13.1.6. Напруженість магнітного поля в ярмі H_y визначається для значення магнітної індукції B_y по кривій намагнічування сталі магнітопроводу трансформатора (табл. 13.1).

Таблиця 13.1 – Крива намагнічування сталі марок 3404 та 3405

B ,	H , А/м
-------	-----------

Тл	0,00	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05	0,06	0,07	0,08	0,09
1,4	100	101	102	103	104	105	106	107	108	109
1,5	110	111	112	113	114	115	122	128	142	155
1,6	172	191	213	238	262	287	327	366	405	453
1,7	506	594	678	778	863	1000	1240	1517	2000	2800
1,8	3500	4250	5000	5500	6000	6500	7000	7500	8000	8500

13.1.7. МРС середнього стрижня магнітної системи, А,

$$F_{middle} = \left(H_b \cdot l_b + H_y \cdot l_y + \frac{B_b}{\mu_0} \cdot \delta \right) \cdot 10^{-3}.$$

13.1.8. МРС крайнього стрижня магнітної системи, А,

$$F_{edge} = \left(H_b \cdot l_b + H_y \cdot (2C + b_y) + \frac{B_y}{\mu_0} \cdot 3\delta \right) \cdot 10^{-3}$$

13.1.9. МРС первинної обмотки при неробочому ході, яка є середнім значенням МРС трьох стрижнів, А,

$$F_{po} = \frac{2F_{edge} + F_{middle}}{3}.$$

13.1.10. Розрахунок магнітної характеристики зводиться в табл. 13.2.

Таблиця 13.2 – Розрахунок магнітної характеристики трансформатора

Величина	Значення					
U_p , кВ	0	$0,5U_{\phi pN}$	$0,7U_{\phi pN}$	$0,9U_{\phi pN}$	$1,0U_{\phi pN}$	$1,1U_{\phi pN}$
Φ_m , Вб	0					
B_b , Тл	0					
B_y , Тл	0					
H_b , А/м	0					
H_y , А/м	0					
F_{middle} , А	0					
F_{edge} , А	0					
F_{po} , А	0					

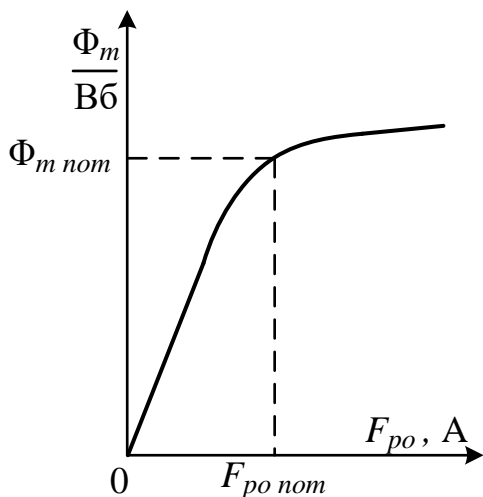


Рисунок 13.1 – Магнітна характеристика трансформатора

13.11.11. Магнітна характеристика наведена на рис. 13.1. На магнітній характеристиці зазначається точка, яка відповідає номінальній напрузі $U_{\phi p N}$, тобто точка з координатами $(\Phi_{m\ nom}; F_{po\ nom})$.

13.2. Розрахунок зовнішньої характеристики

13.2.1. Зовнішньою характеристикою трансформатора є залежність напруги вторинної обмотки від коефіцієнта навантаження $U_s(\beta)$. Вона будується за

виразом

$$U_s = U_{sN} \cdot [1 - \beta(u_a \cdot \cos \varphi_s + u_r \cdot \sin \varphi_s)]$$

для двох значень коефіцієнта потужності вторинної обмотки $\cos \varphi_s = 0,8$ та $1,0$.

Напругою вторинної обмотки U_s вважається напруга тієї обмотки, яка приєднується до навантаження. Розрахунок зовнішньої характеристики здійснити для підвищувального та знижувального трансформаторів. Зовнішні характеристики для підвищувального та знижувального трансформаторів будуються в окремих системах координат.

Розрахунок зовнішньої характеристики зводиться в табл. 13.3 та 13.4. Зовнішня характеристика наведена на рис. 13.2.

Таблиця 13.3 – Розрахунок зовнішньої характеристики підвищувального трансформатора

$\cos \varphi_s$	0,8		1,0	
β	0	1,0	0	1,0
U_{sN} , кВ	U_{hN}		U_{hN}	

Таблиця 13.4 – Розрахунок зовнішньої характеристики знижувального трансформатора

$\cos \varphi_s$	0,8		1,0	
β	0	1,0	0	1,0
U_{sN} , кВ	U_{IN}		U_{IN}	

13.3. Розрахунок характеристики ККД

13.3.1. Характеристика ККД трансформатора $\eta(\beta)$ будується для $\cos\varphi_s = 0,8$ залежно від коефіцієнта навантаження β за виразом

$$\eta = 1 - \frac{P_o + \beta^2 P_k}{\beta S_N \cdot 10^3 \cdot \cos\varphi_s + P_o + \beta^2 P_k}.$$

Коефіцієнту навантаження $\beta = 1,0$ відповідає номінальний ККД η_N .

Розрахунок характеристики ККД зводиться до табл. 13.5. Характеристика ККД наведена на рис. 13.3.

Таблиця 13.5 Розрахунок характеристики ККД

β	0	0,2	0,4	0,6	0,8	1,0	1,2
η	0					η_N	

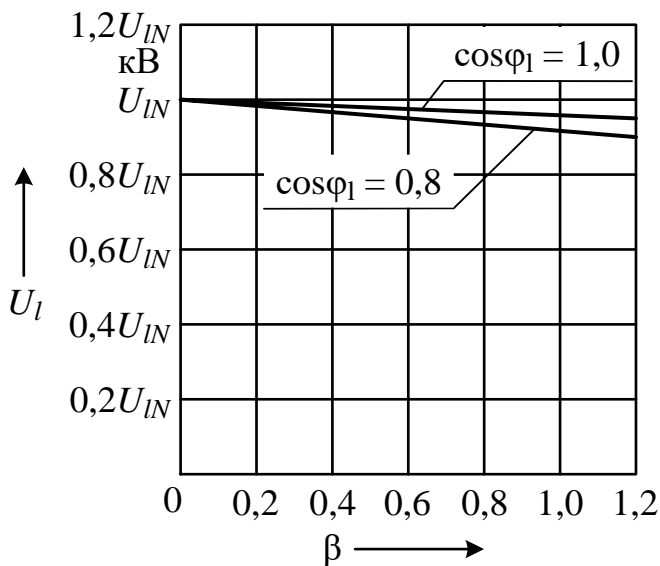


Рисунок 13.2 – Зовнішня характеристика знижувального трансформатора

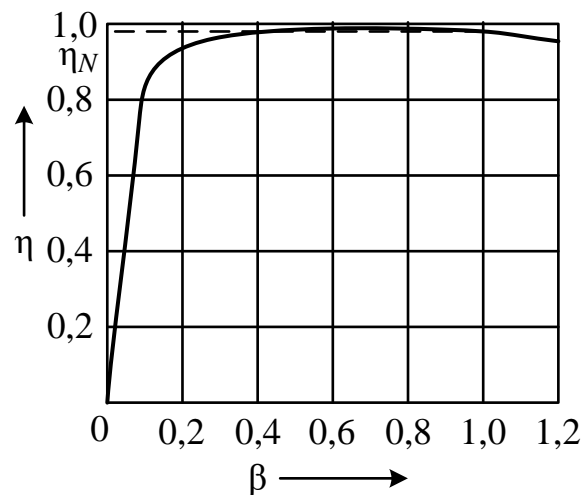
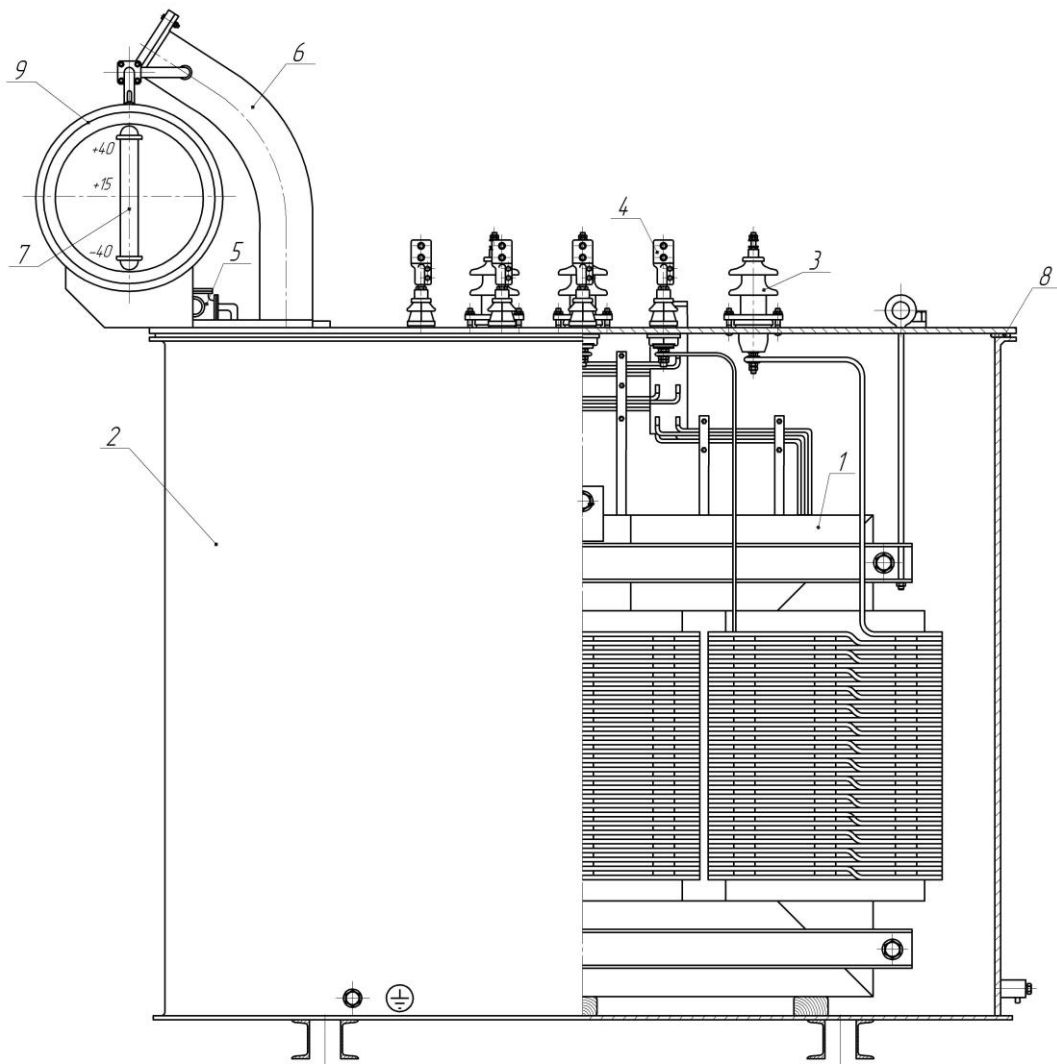


Рисунок 13.3 – Характеристика ККД трансформатора

14. КОНСТРУКЦІЯ СИЛОВОГО ТРИФАЗНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Основними елементами конструкції силових трансформаторів (рис. 14.1) є корпус 1, магнітопровід 2, обмотки 3, пристрій для охолодження 4, введення 5 та захисні пристрої (розширювач 6, вихлопна труба 7 та газове реле 8).

Магнітопровід трансформатора, який створює магнітне коло, складається з листів електротехнічної сталі (шихтується). Листи магнітопроводу стягуються



1 – магнітна система обмотана; 2 – бак; 3 – виведення обмотки вищої напруги;
 4 – виведення обмотки нижчої напруги; 5 – газове реле;
 6 – запобіжна труба; 7 – показчик рівня оливи; 8 – прокладка;
 9 – розширювач; 10 – табличка

Рисунок 14.1 – Конструкція трансформатора

шпильками або заклепками через пресувальні пластини. На шпильки або заклепки надягають ізолювальні трубки для запобігання замиканню листів. Гайки та головки заклепок ізолюються від пресувальних пластин магнітопроводу шайбами з електротехнічного картону.

В силових трансформаторах за способом намотування проводу застосовуються циліндричні та гвинтові обмотки. Циліндричні обмотки виконуються з проводу круглого та прямокутного перерізу, витки при намотці розташовуються впритул один до одного. Використовуються для трансформаторів малої та середньої потужності для обмоток нижчої та вищої напруги. Гвинтові обмотки виконуються з проводу прямокутного перерізу. Кількість паралельних проводів може сягати до шістнадцяти в одному витку. Витки намотуються з повітряними каналами по гвинтовій лінії. Використовуються тільки для обмоток нижчої напруги. Гвинтові обмотки можуть виконуватися з радіальними охолодними каналами або без них.

Обмотки трансформаторів виконуються з ізольованого мідного проводу. При виконанні обмоток слід розрізняти ізоляцію окремих провідників, ізоляцію між шарами та котушками, ізоляцію між обмотками вищої та нижчої напруги та ізоляцію обмоток від стрижня. Для ізоляції обмотувальних проводів застосовують електрокартон, лакову плівку (емаль). Для ізоляції шарів обмотки між собою застосовують прокладки з електрокартону. Котушки ізолюються шайбами або прокладками з електрокартону, бандажуються ізолювальною стрічкою. Для ізоляції обмотки від стрижня та для ізоляції обмотки вищої напруги від обмотки нижчої напруги застосовують жорсткі циліндри, пресовані з бакелізованого паперу, або м'які циліндри з електрокартону.

Кінці обмоток виведені назовні за допомогою виведень, які ізольовані від бака трансформатора.

Активна частина трансформатора (магнітопровід з обмотками) розташовується всередині бака. Конструкція бака визначається потужністю трансформатора та умовами його охолодження. Тому в експлуатації зустрічаються трансформатори, що мають баки з гладкою та ребристою поверхнею, з додатковими радіаторами і без них.

Бак трансформатора з оливним охолодженням є резервуаром для охолодної оливи. У трансформаторобудуванні широко застосовується спеціальна мінеральна (нафтова) олива, яку називають трансформаторною. Трансформаторна олива є доброю ізоляцією між обмотками та металевим корпусом. Крім того, трансформаторна олива, маючи вищу теплопровідність, ніж повітря, добре відводить тепло від активних частин трансформатора до зовнішніх поверхонь бака.

Бак є опорною конструкцією для навісної системи охолодження, високовольтних виведень разом із трансформаторами струму, пристроїв регулювання напруги, розширювача тощо. Також на кришці бака розташовано навісне обладнання: вихлопна труба, газове реле, пристрій регулювання напруги, розширювач і оливопровід, що сполучає розширювач із самим баком.

На стінці бака розташовуються шафи затискачів та шафи керування системи охолодження, до яких проводять кабелі від контрольної та вимірювальної апаратури, а також щита керування. На баку потужних трансформаторів передбачені крани для заливання охолодної оливи та приєднання очисної установки, приєднання вакуум-насоса, зливання оливи з трансформатора та оливоочисної установки, взяття проби масла на аналіз, зливання залишків оливи (спеціальна пробка на дні бака).

Вимоги до транспортабельності також впливають на форму баків силового трансформатора, оскільки разом із транспортером він має вписуватися у відповідний залізничний габарит.

У конструкціях з нижнім роз'ємом бака необхідно перед стропуванням трансформатора переконатися в тому, що конкретні пристрої розраховані на підйом повністю складеного трансформатора.

Для максимального зниження вантажопідйомності підйомних засобів на трансформаторній підстанції конструкція бака залежно від ваги активної частини передбачається верхній бо нижній роз'єм бака для її виймання.

При нижньому роз'ємі (як правило, в потужних трансформаторах) немає необхідності піднімати для огляду активну частину. Для виконання ремонтних робіт на активній частині достатньо підняти верхню знімну частину (дзвін), вага якої не повинна перевищувати 15 % повної ваги трансформатора. Ущільнення роз'єму забезпечується однією або двома паралельно розташованими гумовими прокладками. Герметичність ущільнення досягається болтовим з'єднанням.

Для пересування в межах підстанції залізничними рейками трансформатори обладнуються переставними катками. На баку передбачені пристрої для підйому його краном або домкратами в повністю складеному та залитому оливою стані.

Номінальні дані силових трифазних трансформаторів з оливним охолодженням серії ТМ наведено в табл. Д.1. Зі складальними креслениками силових трифазних трансформаторів Запорізького трансформаторного заводу можна ознайомитись за посиланням [11].

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ

1. Електричні машини і трансформатори : навч. посібник / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва; за ред. д-ра техн. наук, професора В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.
2. Трансформатори силові масляні загального призначення класів напруги 220, 330, 500 і 750 кВ. Технічні умови (ГОСТ 17544–93). З Поправкою. ДСТУ 2103–92. – (Чинний з 25.12.1992).
3. Трансформатори силові масляні загального призначення напругою до 35 кВ включно. Технічні умови (ГОСТ 11920–93). З поправкою. ДСТУ 2105–92. – (Чинний з 25.12.1992).
4. Текстові документи у сфері навчального процесу. Загальні вимоги до виконання. СТЗВО-ХПІ-3.01-2021. – (Чинний з 09.12.2021).
5. Літерні позначення величин та параметрів електричних машин: методичні вказівки до використання в навчальному процесі кафедри «Електричні машини» для студентів і викладачів електротехнічних спеціальностей / уклад. Мілих В. І. – Х. : НТУ «ХПІ», 2007. – 32 с.
6. Величини та одиниці. Частина 1. Загальні положення. ДСТУ ISO 8000-1 : 2016. (Чинний з 27.12.2016).
7. Величини та одиниці. Частина 6. Загальні положення. ДСТУ ISO 8000-6 : 2016. (Чинний з 27.12.2016).
8. Конструкторські документи у сфері навчального процесу. Загальні положення. СТВУЗ-ХПІ-3.03-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
9. Конструкторські документи. Формати. Основні написи. Вимоги до виконання. СТВУЗ-ХПІ-3.04-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
10. Конструкторські документи. Креслення. Вимоги до виконання. СТВУЗ-ХПІ-3.05-2002. – (Чинний з 03.12.2002).
11. Офіційний сайт Запорізького трансформаторного заводу ТОВ «ЕЛІЗ». Режим доступу : <http://ua.eliz.zp.ua/transformators-power/>.

ДОДАТОК А – Розміри трансформатора

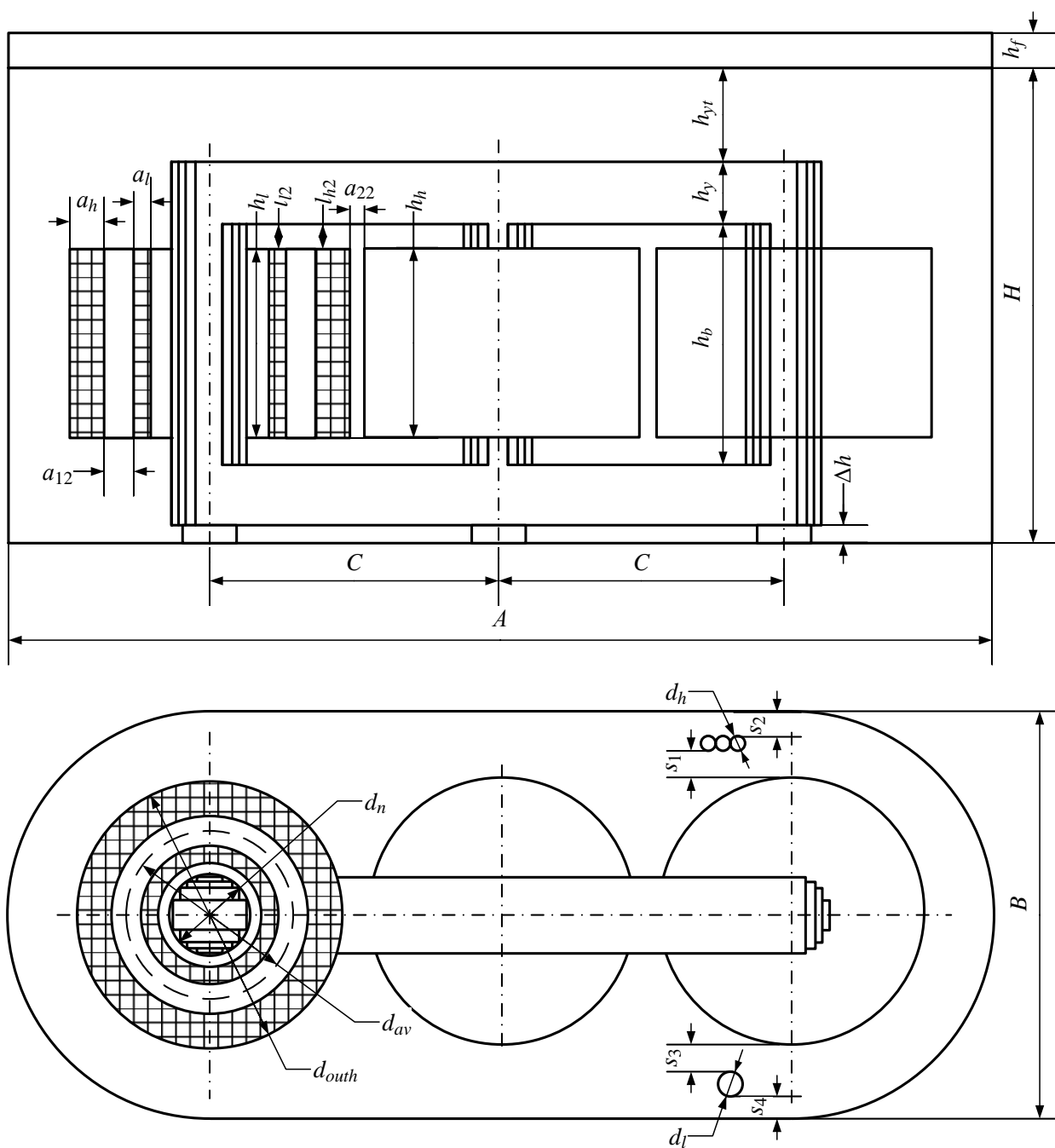


Рисунок А.1.1 – Основні розміри трансформатора

ДОДАТОК Б – Межі застосування типів обмоток трансформатора

Таблиця Б.1 – Основні властивості та нормальні межі застосування різних типів обмоток трансформатора

Межі застосування, включно			Тип обмотки	Застосування		Матеріал обмоток	Площа поперечного перерізу витка, S_{cl} або S_{ch} , мм ²	Кількість паралельних виток	Схема регулювання напруги	Основні переваги	Основні вади
S_N , кВ·А	I_{hN} або I_{IN} , А	U_{hN} або U_{IN} , кВ		головне	допоміжне						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
до 630	15–800	до 6	Циліндрична одно- або двошарова з проводу прямокутного перерізу	обмотка нижчої напруги	обмотка вищої напруги	мідь	5,04–250	1–8	рис.2.1 а,б	проста технологія виготовлення, добре охолодження	мала механічна міцність
до 630	10–660	до 6				алюміній	6,39–300				
630–80000	15–1200	10, 35	циліндрична багатшарова з проводу прямокутного перерізу	обмотка вищої напруги	обмотка нижчої напруги	мідь	5,04–400	1–8	рис.2.1 а,б	добре заповнення вікна магнітної системи, проста технологія виготовлення	зменшена поверхня охолодження у порівнянні з обмотками, що мають радіальні канали
до 25000	10–1200	10–35				алюміній	6,39–500				

Закінчення табл. Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
до 630	0,3–100	до 35	циліндрична багатопшарова з проводу круглого перерізу	обмотка вищої напруги	обмотка нижчої напруги	мідь	1,094–42,44	1–2	рис.2.1 а,б	проста технологія виготовлення	погіршення тепловіддачі та зменшення механічної міцності зі зростанням потужності
до 630	2–135	до 35				алюміній	1,37–50,24	1			
від 160	від 300	до 35	гвинтова одно-, дво- або багатопшарова з проводу прямокутного перерізу	обмотка нижчої напруги	–	мідь	від 75	більше 4	–	висока механічна міцність надійна ізоляція, добре охолодження	більш вища вартість у порівнянні з циліндричною обмоткою
від 100	від 150	до 35				алюміній					
від 160	від 15	3–220	спіральна безперервна котушкова з проводу прямокутного перерізу	обмотка вищої напруги	обмотка нижчої напруги	мідь	від 5,04	1–5	рис. 2.1 в, г	висока електрична та механічна міцність, добре охолодження	необхідність перекладання половини котушок при намотуванні
від 100	від 10	3–220				алюміній	від 6,39				

ДОДАТОК В – Стандартні розміри проводів прямокутного та круглого перерізу

Таблиця В.1 – Розміри та площі поперечного перерізу прямокутного проводу

b, мм	a, мм													
	1,40	1,50	1,60	1,70	1,80	1,910	2,00	2,12	2,24	2,36	2,50	2,65	2,80	3,00
Площа поперечного перерізу проводу S , мм ²														
3,75	5,04	–	5,79	–	6,39	–	7,14	–	8,04	–	8,83	–	–	–
4,00	5,39	5,79	6,19	6,44	6,84	7,24	7,64	8,12	8,60	8,89	9,45	10,1	10,7	–
4,25	5,74	–	6,59	–	7,29	–	8,14	–	9,16	–	10,1	–	11,4	–
4,50	6,09	6,54	6,99	7,29	7,74	8,19	8,64	9,18	9,72	10,1	10,7	11,4	12,1	13,0
4,75	6,44	–	7,39	–	8,19	–	9,14	–	10,3	–	11,3	–	12,8	–
5,00	6,79	7,29	7,79	8,14	8,64	9,14	9,64	10,2	10,8	11,3	12,0	12,7	13,5	14,5
5,30	7,21	–	8,27	–	9,18	–	10,2	–	11,5	–	12,7	–	14,3	–
5,60	7,63	8,19	8,75	9,16	9,72	10,3	10,8	11,5	12,2	12,7	13,5	14,3	15,1	16,3
6,00	8,19	–	9,39	–	10,4	–	11,6	–	13,1	–	14,5	–	16,3	–
6,30	8,61	9,24	9,87	10,4	11,0	11,6	12,2	13,0	13,8	14,3	15,2	16,2	17,1	18,4
6,70	9,17	–	10,5	–	11,7	–	13,0	–	14,7	–	16,2	–	18,2	–
7,10	9,73	10,4	11,2	11,7	12,4	13,1	13,8	14,7	15,5	16,2	17,2	18,3	19,3	20,8
7,50	10,3	–	11,8	–	13,1	–	14,6	–	16,4	–	18,2	–	20,5	–
8,00	11,0	11,8	12,6	13,2	14,0	14,8	15,6	16,6	17,6	18,3	19,5	20,7	21,9	23,5
8,50	11,7	–	13,4	–	14,9	–	16,6	–	18,7	–	20,7	–	23,3	–
9,00	12,4	13,3	14,2	14,9	15,8	16,7	17,6	18,7	19,8	20,7	22,0	23,3	24,7	26,5
9,50	13,1	–	15,0	–	16,7	–	18,6	–	20,9	–	23,2	–	26,1	–
10,0	13,8	14,8	15,8	16,6	17,6	18,6	19,6	20,8	22,0	23,1	24,5	26,0	27,5	29,5
10,6	14,6	–	16,8	–	18,7	–	20,8	–	23,4	–	26,0	–	29,1	–
11,2	15,5	16,6	17,7	18,7	19,8	20,9	22,0	23,4	24,7	25,9	27,5	29,1	30,08	33,1
11,8	–	–	18,7	–	20,9	–	23,2	–	26,1	–	29,0	–	32,5	–
12,5	–	18,5	19,8	20,9	22,1	23,4	24,6	26,1	27,6	29,0	30,7	32,6	34,5	37,0
13,2	–	–	–	–	23,4	–	26,0	–	29,2	–	32,5	–	36,4	–
14,0	–	–	–	–	24,8	26,2	27,6	29,3	31,0	32,5	34,5	36,6	38,7	41,5
15,0	–	–	–	–	–	–	29,6	–	33,2	–	37,0	–	41,5	–
16,0	–	–	–	–	–	–	31,6	33,6	35,5	37,2	39,5	41,9	44,3	47,5
17,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	47,2	–
18,0	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–	53,1

Закінчення табл. В.1

b, мм	a, мм										
	3,15	3,35	3,55	3,75	4,00	4,25	4,50	4,75	5,00	5,30	5,60
	Площа поперечного перерізу провідника П, мм ²										
4,50	13,6	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
4,75	14,4	–	–	–	–	–	–	–	–	–	–
5,00	15,2	16,2	17,2	–	–	–	–	–	–	–	–
5,30	16,2	–	18,3	–	–	–	–	–	–	–	–
5,60	17,1	18,2	19,3	20,1	21,5	–	–	–	–	–	–
6,00	18,4	–	20,8	–	23,1	–	–	–	–	–	–
6,30	19,3	20,6	21,8	22,8	24,3	25,9	27,5	–	–	–	–
6,70	20,6	–	23,2	–	25,9	–	29,3	–	–	–	–
7,10	21,8	23,2	24,7	25,8	27,5	29,3	31,1	32,9	34,6	–	–
7,50	23,1	–	26,1	–	29,1	–	32,9	–	36,6	–	–
8,00	24,7	26,3	27,9	29,1	31,1	33,1	35,1	37,1	39,2	41,5	43,9
8,50	26,2	–	29,6	–	33,1	–	37,4	–	41,6	–	46,7
9,00	27,8	29,6	31,4	32,9	35,1	37,4	39,6	41,9	44,1	46,8	49,5
9,50	29,4	–	33,2	–	37,1	–	41,9	–	46,6	–	52,1
10,0	31,0	33,0	35,0	36,6	39,1	41,6	44,1	46,6	49,1	52,1	55,1
10,6	32,8	–	37,1	–	41,5	–	46,8	–	52,1	–	58,5
11,2	34,7	37,0	39,2	41,4	43,9	46,7	49,5	52,3	55,1	58,5	61,9
11,8	36,6	–	41,3	–	46,3	–	52,2	–	58,1	–	65,2
12,5	38,8	41,3	43,8	46,0	49,1	52,3	55,4	58,5	61,6	65,4	69,1
13,2	41,0	–	46,3	–	51,9	–	58,5	–	65,1	–	73,1
14,0	43,6	46,4	49,2	52,0	55,1	58,6	62,1	65,6	69,1	73,3	77,5
15,0	46,7	–	52,7	–	59,1	–	66,6	–	74,1	–	83,1
16,0	49,9	53,1	56,3	59,1	63,1	67,1	71,1	75,1	79,1	83,9	88,7
17,0	53,2	–	59,4	–	67,1	–	75,6	–	84,1	–	94,3
18,0	53,8	59,4	63,0	66,6	71,1	75,6	80,1	84,6	89,1	94,5	99,9

Таблиця В.2 – Розміри та площі поперечного перерізу круглого проводу

Діаметр d , мм	Площа поперечного перерізу S , мм ²	Діаметр d , мм	Площа поперечного перерізу S , мм ²
мідний провід марки ПБ		2,80	6,16
1,18	1,094	3,00	7,07
1,25	1,23	3,15	7,795
мідний провід марки ПБ та алюмінієвий провід марки АПБ		3,35	8,81
		3,55	9,895
1,32	1,37	3,75	11,05
1,40	1,51	4,00	12,55
1,50	1,77	4,10	13,2
1,60	2,015	4,25	14,2
1,70	2,27	4,50	15,9
1,80	2,545	4,75	17,7
1,90	2,805	5,00	19,63
2,00	3,14	5,20	21,22
2,12	3,53	алюмінієвий провід марки АПБ	
2,24	3,94	5,30	22,06
2,36	4,375	6,00	28,26
2,50	4,91	8,00	50,24
2,65	5,515		

ДОДАТОК Г – Розміри магнітопроводів трансформаторів

Таблиця Г.1 – Розміри пакетів стрижнів та ярем трансформаторів для діаметрів стрижня 80–180 мм

Діаметр стрижня d_n , мм	Кількість ступеней в перерізі стрижня n_{lmb}	Кількість ступеней в перерізі ярма n_y	Коефіцієнт заповнення кола стрижня k_{lmb}	Ширина крайнього зовнішнього пакета ярма a_{yn} , мм	Ширина та товщина пакетів магнітної системи $a_{bi} \times b_{bi}$, мм					
80	4	3	0,861	55	75×14	65×9	55×6	40×5	–	–
85	5	4	0,895	50	80×14	70×10	60×6	50×4	40×4	–
90	5	4	0,891	55	85×15	75×10	65×6	55×4	40×5	–
95	5	5	0,887	50	90×15	80×10	65×9	50×5	40×4	–
100	6	5	0,908	55	95×16	85×10	75×7	65×5	55×4	40×4
105	6	5	0,916	50	100×16	90×11	80×7	65×7	50×4	40×4
110	6	5	0,907	65	105×16	95×11	85×7	75×6	65×4	40×7
115	6	5	0,896	65	105×23	95×9	85×6	75×5	65×4	40×6
120	6	5	0,928	60	115×18	105×11	90×10	75×8	60×6	40×4
125	6	5	0,915	65	120×18	105×16	95×6	85×6	65×7	40×6
130	6	5	0,918	65	125×18	110×16	100×8	80×9	65×5	40×6
140	6	5	0,919	65	135×19	120×17	105×10	85×9	65×7	40×5
150	6	5	0,914	85	145×19	135×13	120×13	105×9	85×8	55×7
160	6	5	0,907	85	155×20	135×23	120×10	105×7	85×7	55×7
170	6	5	0,919	85	160×28	145×17	130×10	110×10	85×8	50×8
180	6	5	0,915	85	175×21	155×25	135×13	120×8	95×9	65×8

Примітка: крайній зовнішній пакет ярма має товщину, що дорівнює сумі товщин двох крайніх пакетів стрижня

Таблиця Г.2 – Розміри пакетів стрижнів та ярем трансформаторів для діаметрів стрижня 190–300 мм

Діаметр стрижня d_n , мм	Кількість ступеней в перерізі стрижня n_{lmb}	Кількість ступеней в перерізі ярма n_y	Коефіцієнт заповнення кола стрижня k_{lmb}	Ширина крайнього зовнішнього пакета ярма a_{yn} , мм	Ширина та товщина пакетів магнітної системи $a_{bi} \times b_{bi}$, мм							
					180×30	165×17	145×14	130×8	115×7	100×5	75×7	–
190	7	5	0,924	100	180×30	165×17	145×14	130×8	115×7	100×5	75×7	–
200	7	5	0,918	120	195×22	175×26	155×15	135×11	120×6	105×5	75×7	–
210	7	5	0,922	130	200×32	180×22	160×14	145×8	130×6	110×8	90×6	–
220	8	6	0,929	120	215×23	195×28	175×15	155×12	135×9	120×5	105×4	75×7
230	8	6	0,933	130	220×34	205×19	185×16	165×12	145×9	130×5	115×5	90×6
240	8	6	0,927	135	230×34	215×19	195×17	175×12	155×9	135×8	120×5	95×6
250	8	6	0,929	140	240×35	220×24	200×16	180×12	155×11	140×6	120×6	100×5
260	8	6	0,924	155	250×35	230×25	215×13	195×13	175×10	155×8	120×9	105×6
270	8	6	0,930	155	260×36	240×25	215×20	195×13	170×11	155×5	135×7	105×8
280	8	6	0,927	175	270×37	250×26	230×17	215×9	195×11	175×9	135×13	105×7
290	8	6	0,872	165	280×37	260×27	235×21	210×15	180×13	165×6	145×6	115×8
300	8	6	0,892	175	295×28	270×37	250×18	230×13	215×8	175×18	135×2	105×6

Примітка: крайній зовнішній пакет ярма має товщину, що дорівнює сумі товщин трьох крайніх пакетів стрижня

Таблиця Г.3 – Розміри пакетів стрижнів та ярем трансформаторів для діаметрів стрижня 310–380 мм

Діаметр стрижня d_n , мм	Кількість ступеней в перерізі стрижня n_{lmb}	Кількість ступеней в перерізі ярма n_y	Коефіцієнт заповнення кола стрижня k_{lmb}	Ширина крайнього зовнішнього пакета ярма a_{yl} , мм	Ширина та товщина пакетів магнітної системи $a_{bi} \times b_{bi}$, мм									
					310×39	280×28	260×18	245×10	230×9	210×10	190×9	160×10	135×7	
310	9	7	0,930	190	310×40	295×22	270×24	250×14	230×11	215×7	195×8	155×12	135×5	
320	9	7	0,920	195	320×40	295×34	275×17	265×9	245×11	225×10	205×9	165×11	135×10	
330	9	7	0,932	205	325×50	310×19	295×15	270×19	250×12	230×10	195×14	155×11	135×6	
340	9	7	0,930	195	325×64	310×16	295×13	270×17	250×11	230×9	195×13	155×12	135×4	
350	9	7	0,913	195	350×42	325×35	295×26	270×16	250×10	230×9	195×13	155×9	135×7	
360	9	7	0,934	195	350×60	325×29	295×22	270×15	250×10	230×8	195×12	155×11	135×4	
370	9	7	0,888	195	368×47	350×27	325×24	310×12	295×10	250×23	215×13	155×15	135×6	
380	9	7	0,933	215										

Примітка: крайній зовнішній пакет ярма має товщину, що дорівнює сумі товщин трьох крайніх пакетів стрижня

ДОДАТОК Д– Номінальні дані силових трифазних трансформаторів з оливним охолодженням, що випускаються серійно

Таблиця Д.1 – Номінальні дані трансформаторів серій ТМ

Номінальна потужність, кВ·А	Номінальні напруги, кВ		Втрати, Вт		Напруга короткого замикання,	Струм неробочого холу, %
	обмотки вищої напруги	обмотки нижчої напруги	неробочого ходу	короткого замикання		
10	10±5%	0,4	65	280	4,0	3,4
16	10±5%	0,4	85	500	4,0	3,2
25	10±5%	0,4	130	650	4,5	3,2
40	10±5%	0,4	175	990	4,5	3,0
63	10±5%	0,4	220	1460	4,5	2,8
63	10±5%	0,23	240	1280	4,5	2,8
100	10±5%	0,23	330	1970	4,5	2,6
100	35±5%	0,4	420	1970	6,5	2,6
100	10±5%	0,4	330	1970	4,5	2,6
160	10±5%	0,23	510	2650	4,5	2,4
160	10±5%	0,4	400	3100	4,5	2,4
160	35±5%	0,4	620	4200	5,0	2,4
250	10±5%	0,4	740	3700	4,5	2,3
250	35±5%	0,69	900	3700	6,5	2,3
400	10±5%	0,4	800	500	4,5	2,1
400	10±5%	0,69	950	5500	4,5	2,1
400	35±5%	0,4	1200	5500	6,5	2,1
630	10±5%	0,4	1010	8500	5,5	2,0
630	10±5%	0,69	1310	7600	5,5	2,0
630	35±5%	0,69	1600	7600	6,5	2,0
1000	10±5%	0,4	1400	10600	5,5	1,8
1250	10±5%	0,4	1600	14700	5,5	1,8
1600	10±5%	0,4	2050	16000	6,0	1,8
2500	10±5%	0,4	2800	28000	6,0	1,8
2500	35±5%	0,4; 6,3; 10,5	3800	28500	7,2	2,0
4000	35±5%	0,4; 6,3; 10,5	5300	34000	7,5	2,0
6000	35±5%	0,4; 6,3; 10,5	7000	4650	7,5	2,0

ЗМІСТ

ВСТУП.....	3
1. Технічні умови.....	5
2. Розрахунок номінальних величин	6
3. Вибір типу обмотки та головної ізоляції	6
4. Визначення основних розмірів	8
5. Розрахунок обмотки нижчої напруги.....	12
6. Розрахунок обмотки вищої напруги.....	23
7. Розрахунок втрат і напруги короткого замикання	33
8. Розрахунок магнітної системи	36
9. Розрахунок втрат і струму неробочого ходу	38
10. Розрахунок механічних сил в обмотках.....	42
11. Тепловий розрахунок трансформатора.....	44
12. Розрахунок бака трансформатора	46
13. Розрахунок характеристик трансформатора	57
14. Конструкція трансформатора	60
ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ІНФОРМАЦІЇ.....	64
ДОДАТОК А – Розміри трансформатора	65
ДОДАТОК Б – Межі застосування типів обмоток трансформатора	66
ДОДАТОК В – Стандартні розміри проводів прямокутного та круглого перерізу	68
ДОДАТОК Г – Розміри магнітопроводів трансформаторів	71
ДОДАТОК Д – Номінальні дані силових трифазних трансформаторів з оливним охолодженням, що випускаються серійно	74

Навчальне видання

ПРОЄКТУВАННЯ
СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ
Навчально-методичний посібник
з курсового проєктування
для студентів, що навчаються за спеціальністю
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

Укладачі: ЮР'ЄВА Олена Юріївна
КУНЧЕНКО Тетяна Юріївна

Відповідальний за випуск В. І. Мілих
Роботу до друку рекомендував Б. Г. Любарський
В авторській редакції

План 2023 р., п. 83

Підписано до друку

Друк – ризографія.

Наклад – 100 прим.

. Формат 60x84^{1/16}.

Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 7,1.

Зам. № .

Папір офсетний.

Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП»

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 3657 від 24.12.2009 р.

61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

Друкарня НТУ «ХП», 61002, Харків, вул. Кирпичова, 2