

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт
з дисципліни «Інженерне проектування електричних машин
та трансформаторів»
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(освітня програма «Програмні засоби електричної інженерії»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Програмні засоби електричної інженерії») усіх форм навчання / Укл.: Т. П. Солодовнікова, І. М. Коцур, І. Д. Галушко, Г. В. Дьомічева. – Запоріжжя : НУЗП, 2022. – 64 с.

Укладачі: Т. П. Солодовнікова, старш. викл.,
І. М. Коцур, доцент,
І. Д. Галушко, зав. лаб.,
Г. В. Дьомічева, зав. лаб.

Рецензент Д. С. Яримбаш, проф., доктор техн. наук.

Відповідальний за випуск О.О. Чмут, провідний фахівець

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 10
від 23.05.22 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол № 2
від 02.06.2022 р.

ЗМІСТ

Вступ	5
1 Лабораторна робота №1 «Вибір основних електричних величин трансформатора»	6
1.1 Теоретичні відомості	6
1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	11
1.3 Контрольні запитання для самоперевірки	11
1.4 Програма роботи	11
1.5 Порядок виконання лабораторної роботи	12
1.6 Зміст звіту	12
2 Лабораторна робота №2 «Розрахунок основних коефіцієнтів попереднього розрахунку»	13
2.1 Теоретичні відомості	13
2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	21
2.3 Контрольні запитання для самоперевірки	21
2.4 Програма роботи	21
2.5 Порядок виконання лабораторної роботи	21
2.6 Зміст звіту	22
3 Лабораторна робота №3 «Визначення попередніх даних розрахунку трансформатора»	23
3.1 Теоретичні відомості	23
3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	25
3.3 Контрольні запитання для самоперевірки	26
3.4 Програма роботи	26
3.5 Порядок виконання лабораторної роботи	26
3.6 Зміст звіту	26
4 Лабораторна робота № 4 «Розрахунок обмотки низької напруги»	27
4.1 Теоретичні відомості	27
4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	33
4.3 Контрольні запитання для самоперевірки	33
4.4 Програма роботи	33
4.5 Порядок виконання лабораторної роботи	33
4.6 Зміст звіту	34
5 Лабораторна робота № 5 «Розрахунок обмотки високої напруги»	35
5.1 Теоретичні відомості	35

5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	36
5.3 Контрольні запитання для самоперевірки	36
5.4 Програма роботи	37
5.5 Порядок виконання лабораторної роботи	37
5.6 Зміст звіту	37
6 Лабораторна робота № 4 «Розрахунок регулювального шару обмотки високої напруги за схемою «реверс»»	38
6.1 Теоретичні відомості	38
6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи	41
6.3 Контрольні запитання для самоперевірки	41
6.4 Програма роботи	41
6.5 Порядок виконання лабораторної роботи	42
6.6 Зміст звіту	42
Перелік джерел посилання	43
Додаток А. Початкові дані до лабораторних робіт	46
Додаток Б. Приклади розрахунку обмоток трансформатора	52
Б.1 Приклад розрахунку гвинтової обмотки	52
Б.2 Приклад розрахунку котушкової обмотки	55
Б.3 Приклад розрахунку циліндричної багат шарової обмотки	59
Додаток В. Зразок оформлення титульної сторінки	64

ВСТУП

Дисципліна «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» у відповідності з навчальним планом вивчається студентами спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання.

У розділі дисципліни «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів», присвяченому проектуванню силових трансформаторів, детально розглядаються особливості конструювання та розрахунків параметрів та характеристик основних конструктивних складових трансформатора. В цих методичних вказівках наведено лабораторні роботи, метою виконання яких є своєчасне опанування та полегшення подальшого розрахунку курсового проекту.

При роботі над матеріалом дисципліни необхідно користуватись конспектом лекцій, підручниками та методичними вказівками (с. 43). Під час опрацювання та підготовки до здачі лабораторних робіт обов'язково треба звернути увагу на питання для самоперевірки. Якщо відповіді на ці питання становлять труднощі, необхідно відповідні теми опрацювати за іншими підручниками або звернутися за консультацією до викладача.

В кожній лабораторній роботі будуть зроблені конкретні вказівки що до вибору початкових даних.

Для захисту лабораторних робіт студент повинен підготувати звіт та відповісти на контрольні запитання.

В результаті вивчення дисципліни студент буде знати:

- знати принципи роботи електричних машин та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності;
- знати основи теорії електромагнітного поля, методи розрахунку електричних кіл та уміти використовувати їх для вирішення практичних проблем у професійній діяльності;
- обирати і застосовувати придатні методи для аналізу і синтезу електромеханічних та електроенергетичних систем із заданими показниками;
- вміти самостійно вчитися, опановувати нові знання і вдосконалювати навички роботи з сучасним обладнанням, вимірювальною технікою та прикладним програмним забезпеченням.

1 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 1

ВИБІР ОСНОВНИХ ЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: визначити за початковими даними основні електричні величини та ізоляційні відстані.

1.1 Теоретичні відомості

1.1.1 Визначення основних електричних величин [1, гл. 3-4].

Розрахунок трансформатора починається з визначення основних електричних величин.

Потужність на фазу та стрижень, В·А;

$$S_{\phi} = \frac{S \cdot 10^3}{m}, \quad (1.1)$$

де S – потужність трансформатора, В·А;

m – кількість фаз.

Лінійні струми обмоток низької напруги ((НН) індекс 1) та високої напруги ((ВН) індекс 2), А

$$I_{1(2)} = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{1(2)}}, \quad (1.2)$$

де $U_{1(2)}$ – лінійна напруга обмоток НН та ВН відповідно, В.

Фазні струми та напруга за схемою з'єднання обмоток, табл. 1.1:

- «зірка – зірка» (лінійні струми дорівнюють фазним; фазні напруги менш лінійних у $\sqrt{3}$)

$$\begin{aligned} I_{\phi 1} &= I_1; & I_{\phi 2} &= I_2; \\ U_{\phi 1} &= U_1 / \sqrt{3}; & U_{\phi 2} &= U_2 / \sqrt{3}; \end{aligned} \quad (1.3)$$

- «зірка (ВН) – трикутник (НН)»:

$$\begin{aligned} I_{\phi 1} &= I_1 / \sqrt{3}; & I_{\phi 2} &= I_2; \\ U_{\phi 1} &= U_1; & U_{\phi 2} &= U_2 / \sqrt{3}; \end{aligned} \quad (1.4)$$

- «трикутник (ВН) – зірка (НН)»:

$$\begin{aligned} I_{\phi 1} &= I_1; & I_{\phi 2} &= I_2 / \sqrt{3}; \\ U_{\phi 1} &= U_1 / \sqrt{3}; & U_{\phi 2} &= U_2; \end{aligned} \quad (1.5)$$

Таблиця 1.1 – Схеми і групи з'єднання обмоток трифазних двохобмоткових трансформаторів

Умовне позначення	Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів напруги неробочого ходу	
	ВН	НН	ВН	НН
Y/Yn-0				
Yn/Y-0				
Y/D-11				
Yn/D-11				
D/Yn-11				
D/D-0				

- «трикутник – трикутник»

$$\begin{aligned} I_{\phi 1} &= I_1 / \sqrt{3}; & I_{\phi 2} &= I_2 / \sqrt{3}; \\ U_{\phi 1} &= U_1; & U_{\phi 2} &= U_2. \end{aligned} \quad (1.6)$$

1.1.2 Вибір випробувальних напруг обмоток

Ізоляція трансформатора повинна витримувати без пошкоджень електричні, теплові, механічні та фізико-хімічні впливи, яким вона піддається при експлуатації трансформатора.

В експлуатації силовий трансформатор постійно знаходиться у ввімкненому стані, а його ізоляція – під тривалим впливом робочої напруги, яку вона повинна витримувати без будь-яких ушкоджень необмежено довгий час.

Для спрощення розрахунку і стандартизації вимог, що пред'являються до електричної міцності ізоляції готового трансформатора, електричний розрахунок ізоляції проводиться так, щоб вона могла витримати прийнятно-здавальні та типові випробування, передбачені відповідними нормами, табл. 1.2.

Таблиця 1.2 – Випробувальні напруги

Клас напруги, кВ	≤1	3	6	10	15	20
Найбільша робоча напруга, кВ	-	3.6	7.2	12	17.5	24
Випробувальна напруга $U_{\text{випр}}$, кВ	5	18	25	35	45	55
Клас напруги, кВ	35	110	150	220	330	500
Найбільша робоча напруга, кВ	40.5	126	172	252	363	525
Випробувальна напруга $U_{\text{випр}}$, кВ	85	200	230	325	460	630

Визначимо основні ізоляційні відстані в активній частині

Визначимо основні ізоляційні відстані в активній частині за випробувальними напругами обмоток ВН (клас напруги) $U_{\phi 2}$ та НН $U_{\phi 1}$ [1, табл. 4.4-4.5].

Приймаємо конструктивні виконання обмоток, [1, табл. 4.4-4.5].

Основні ізоляційні відстані в активній частині, рис. 1.1:

- радіальний ізоляційний проміжок між стрижнем та обмоткою НН a_{01} м;

- радіальний ізоляційний проміжок між обмотками НН та ВН a_{12} м;
- міжфазний ізоляційний проміжок між обмотками ВН різних фаз a_{22} м;
- ізоляційний проміжок від обмотки ВН до нижнього яра l'_0 м;
- ізоляційний проміжок від обмотки ВН до верхнього яра із пресувальними кільцями l''_0 м;
- товщина циліндра обмотки НН δ_{01} м;
- товщина циліндра обмотки ВН δ_{12} м;
- товщина міжфазної перегородки δ_{22} м;
- відстань між циліндром і обмоткою a_{y1} м;
- виступ циліндра за висоту обмотки НН l_{y1} м;
- виступ циліндра за висоту обмотки ВН l_{y2} м.

Середнє значення ізоляційного проміжку від обмотки ВН до ярем

$$l_0 = \frac{l'_0 + l''_0}{2}. \quad (1.7)$$

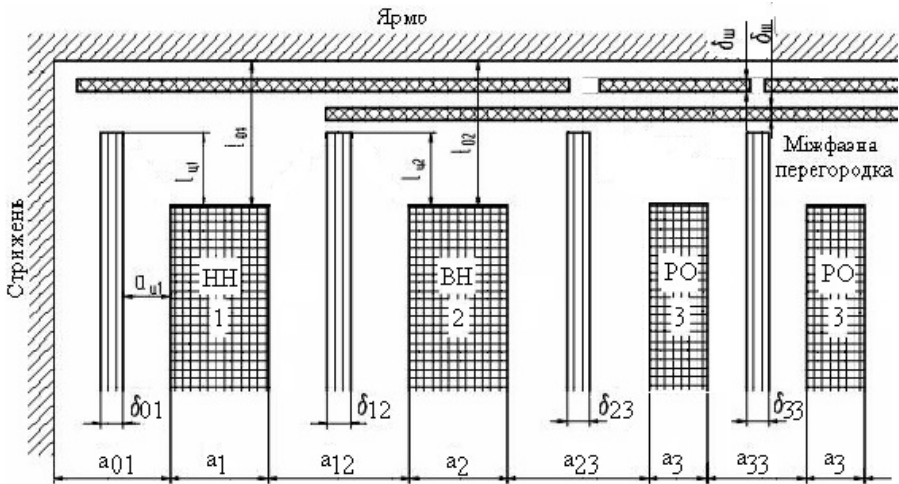


Рисунок 1.1 – Позначення ізоляційних проміжків

1.1.3 Визначення конструктивних параметрів оптимізаційного розрахунку

Для визначення ширини приведенного каналу розсіювання необхідно визначити значення коефіцієнта k [1, табл. 3.3]

$$a_p = a_{12} + a_{o\delta 12}, \quad (1.8)$$

де $a_{o\delta 12}$ – попередня ширина двох обмоток;

$$a_{o\delta 12} = k \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{S / 10^{-3}}. \quad (1.9)$$

Активна та реактивна складові напруги короткого замикання відповідно

$$u_a = \frac{P_k}{10 \cdot S} \quad u_p = \sqrt{u_k^2 - u_a^2}. \quad (1.10)$$

Вибір конструктивної схеми магнітної системи трансформатора.

Обираємо трифазну стрижневу шихтовану магнітну систему за схемою по [1, рис. 2.17]. Пресування стрижнів бандажами із склострічки, що розташовані рівномірно по висоті стрижня (або розклинюванням з обмоткою) та пресувальною пластиною (або без неї); ярем – сталевими балками та напівбандажами. Матеріал магнітної системи – анізотропна електротехнічна холоднокатана сталь.

Індукцію в стрижні B_c ; коефіцієнти заповнення k_z та заповнення кола $k_{кр}$ обирають за [1, табл. 2.2-2.5]. Коефіцієнт заповнення сталлю

$$k_c = k_c \cdot k_{кр}. \quad (1.11)$$

Ярмо багатоступеневе. Коефіцієнт підсилення ярма дорівнює можна прийняти k_y . Індукція у ярмі [1, табл. 2.8]

$$B_y = B_c / k_y. \quad (1.12)$$

Кількість немагнітних зазорів у магнітній системі на косому n'_3 та прямому n''_3 стиках обираємо в залежності від схеми шихтування магнітної системи. Індукція в зазорі на косому та прямому стиках відповідно

$$B'_3 = B_c / \sqrt{2}, \quad B''_3 = B_c. \quad (1.13)$$

Питомі втрати в сталі [1, табл. 8.10] (Вт/кг): в стрижні магнітної системи p_c ; в ярмі магнітної системи p_y .

Питома намагнічуюча потужність [1, табл. 8.17]: в стрижні q_c та ярмі q_y магнітної системи (ВА/кг); для зазорів на косих q'_z та прямих стиках q''_z (ВА/м²).

Коефіцієнт, що враховує відношення основних втрат в обмотках до втрат короткого замикання k_∂ за таблицею [1, табл. 3.6].

Постійні коефіцієнти мідних обмоток: a , b та e' обираємо за таблицями [1, табл. 3.4-3.5].

Коефіцієнт Роговського попередньо зазвичай приймають $k_p = 0.95$.

1.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Вибір основних електричних величин трансформатора». Ознайомитись з матеріалом п. 1.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

1.3 Контрольні запитання для самоперевірки

1.3.1 Призначення та галузь застосування силових трансформаторів. Принцип дії трансформатора.

1.3.2 Класифікація трансформаторів.

1.3.4 Побудувати трикутник напруг, відповідно варіанту.

1.3.5 Формули розрахунку лінійних та фазних струмів обмоток НН та ВН.

1.3.6 Формули розрахунку лінійних та фазних напруг обмоток НН та ВН.

1.3.7 Чим керуються при обранні основних ізоляційних відстаней в активній частині?

1.3.8 На основі чого обирають конструктивну схему магнітної системи трансформатора?

1.4 Програма роботи

1.4.1 Скласти початкові дані.

1.4.2 Розрахувати основні електричні величини.

1.4.3 Визначити та побудувати схему, групу з'єднання обмоток та трикутник напруг.

1.4.4 Визначити основні ізоляційні відстані в активній частині.

1.4.5 Побудувати схему розташування ізоляційних проміжків у вікні магнітної системи.

1.4.6 Визначити конструктивні параметри оптимізаційного розрахунку.

1.4.7 Обрати конструктивну схему магнітної системи трансформатора.

1.5 Порядок виконання лабораторної роботи

1.5.1 При виконанні лабораторних робіт студент повинен одержати у викладача індивідуальний варіант завдання, див. <https://moodle.zp.edu.ua/> дисципліна «ПЕМ та Т» папка «Приклади виконання ЛР».

1.5.2 Розрахувати потужність однієї фази та одного стрижня за (1.1), лінійні струми за (1.2), фазні струми та напруги за (1.3) – (1.6).

1.5.3 Побудувати схему та групу з'єднання обмоток, трикутник напруг, табл.1.1.

1.5.4 Вибрати випробувальні напруги обмоток за табл.1.2. Визначити попередньо конструкцію обмоток. Визначити основні ізоляційні відстані в активній частині.

1.5.5 Побудувати схему розташування ізоляційних проміжків у вікні магнітної системи орієнтуючись на рис. 1.1.

1.5.6 Визначити конструктивні параметри оптимізаційного розрахунку за (1.7) – (1.10).

1.5.7 Обрати конструктивну схему магнітної системи трансформатора та провести розрахунки за пп. 1.1.3.

1.6 Зміст звіту

1.6.1 Початкові дані, які необхідно підготувати до вводу в ЕОМ.

1.6.2 Всі розрахунки та схеми за пп. 1.5.2 – 1.5.7.

1.6.3 Висновки.

2 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 2 РОЗРАХУНОК ОСНОВНИХ КОЕФІЦІЄНТІВ ПОПЕРЕДНЬОГО РОЗРАХУНКУ

Мета роботи: визначення за попередніми даними та емпіричними формулами коефіцієнта β .

2.1 Теоретичні відомості

Магнітопровід трансформатора є основою його конструкції, тому вибір головних розмірів магнітопроводу визначає також і основні розміри обмоток – діаметр і висоту.

Діаметр окружності d (рис. 2.1), в яку вписано ступеневий переріз стрижня, є одним з основних розмірів трансформатора. Другим основним розміром є висота обмоток трансформатора (зазвичай обидві обмотки мають приблизно однакову висоту).

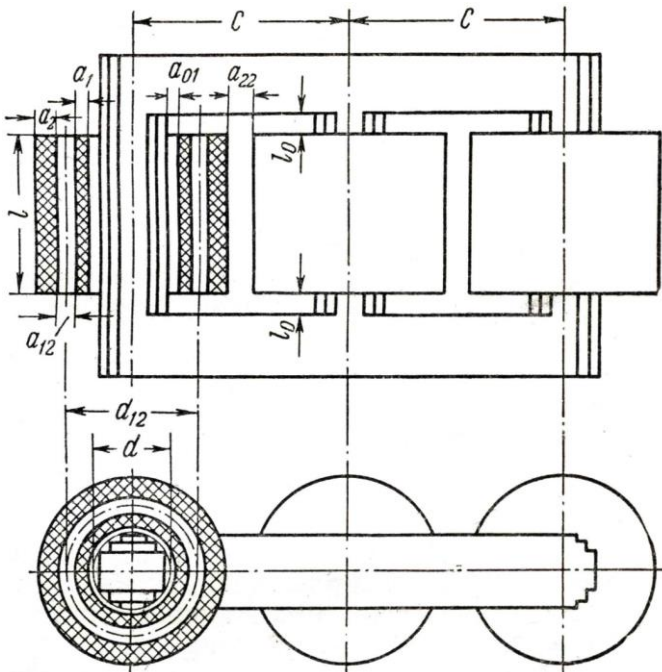


Рисунок 2.1 – Основні розміри трансформатора

Середній діаметр витка двох обмоток або діаметр осьового каналу між обмотками d_{12} зв'язує діаметр стрижня з радіальними розмірами обмоток a_1 і a_2 і осьового каналу між ними a_{12} .

Якщо ці розміри обрані або відомі, то інші розміри, що визначають конфігурацію і обсяг магнітопроводу і обмоток. Наприклад: висота стрижня l_c , відстань між осями сусідніх стрижнів C і інші можуть бути легко знайдені, якщо відомі допустимі ізоляційні відстані від обмоток ВН до заземлених частин і до інших обмоток (a_{12} , a_{22} , L_0).

Два основних розміри обмотки d_{12} і l пов'язані виразом

$$\beta = \frac{\pi \cdot d_{12}}{l}, \quad (2.1)$$

де d_{12} – середній діаметр осьового каналу між обмотками, l – висота обмотки.

Величина β визначає співвідношення між шириною і висотою трансформатора (табл. 2.1). Ця величина може змінюватися від 1.0 до 3.5. При цьому меншим значенням β відповідають трансформатори відносно вузькі і високі, а більшим – широкі і низькі.

Вибір того чи іншого значення буде істотно впливати не тільки на співвідношення розмірів трансформатора, але також на співвідношення мас активних і інших матеріалів, а отже, і на вартість трансформатора.

Крім того, зміна β буде позначатися на технічних характеристиках трансформатора: втратах, напрузі короткого замикання і струмі неробочого ходу, механічній міцності і нагрівостійкості обмоток.

Основний розмір трансформатора – діаметр стрижня магнітопроводу

$$d = 164 \sqrt{\frac{S' \cdot \beta \cdot \alpha_p \cdot k_p}{f \cdot u_{kp} \cdot B_c^2 \cdot k_c^2}}, \quad (2.2)$$

де S' – потужність на одному стрижні в кВА;

α_p – приведена ширина каналу розсіювання;

k_p – коефіцієнт Роговського, $k_p = 0.93 \div 0.97$;

f – частота мережі живлення ($f = 50$ Гц);

u_{kp} – реактивна складова напруги короткого замикання, %;

$$u_{kp} = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2}, \quad u_{ka} = \frac{P_k}{10 \cdot S}, \quad (2.3)$$

де P_k – втрати короткого замикання (КЗ), Вт.

Таблиця 2.1 – Рекомендовані значення β

Рекомендовані значення β для масляних трансформаторів						
Потужність, кВА	алюміній			мідь		
	6 і 10 кВ	25 кВ	110 кВ	6 і 10 кВ	35 кВ	110 кВ
25-100	1.2-1.6	-	-	1.8-2.4	-	-
160-630	1.2-1.6	1.2-1.5	-	1.8-2.4	1.8-2.4	-
1000-6300	1.3-1.7	1.2-1.6	-	2.0-2.6	1.8-2.4	-
6300-16000	-	1.1-1.3	1.1-1.3	-	1.7-2.0	1.6-2.0
25000-80000	-	-	-	-	1.3-1.6	1.5-1.8
Рекомендовані значення β для сухих трансформаторів						
Потужність, кВА	алюміній			мідь		
	до 1 кВ	6 і 10 кВ	-	до 1 кВ	6 і 10 кВ	-
10-160	1.1-1.5	-	-	1.6-2.2	-	-
160-630	-	1.2-1.6	-	-	1.8-2.4	-
1000-1600	-	1.1-1.3	-	-	1.6-2.0	-

Примітки: 1. В таблиці наведено значення β , рекомендовані для трифазних масляних трансформаторів класів напруги 6, 10, 35 і 110 кВ, що відповідають вимогам ГОСТ 12022-76, 11920-85 і 12965-85, і для сучасних трифазних сухих трансформаторів. 2. Рекомендації дані для сталі марок 3404 і 3405 згідно з ГОСТ 21427-83 при товщині сталі 0,30-0,35 мм і при індукціях 1,6-1,65 Тл для масляних і 1,4-1,6 Тл для сухих трансформаторів. 3. Для трансформаторів класу напруги 110 кВ з РПН приймати значення β на 10% нижче нижньої межі, зазначеної в таблиці, тобто приймати 0,9 від 1,6 або 0,9 від 1,5.

Теорія і практика розрахунку трансформаторів дозволили встановити, що вибір величин β , B_c та k_s робить істотний вплив на результати розрахунку трансформатора: маса його активних матеріалів – металу обмоток і сталі магнітопроводу, втрати неробочого ходу і короткого замикання і вартість трансформатора. Вибір цих величин повинен проводитися з урахуванням

характеристик трансформатора, які бажано отримати або які є оптимальними для даного трансформатора.

При розрахунку окремого трансформатора з даної серії характеристики зазвичай бувають заданими, і завдання вибору початкових даних розрахунку спрощується.

Другий основний розмір трансформатора – середній діаметр каналу між обмотками (рис. 2.1), см

$$d_{12} = d + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}, \quad (2.4)$$

де a_{01} – радіальний розмір осевого каналу між стрижнем і обмоткою низької напруги (НН);

a_1 – радіальний розмір обмотки НН, см.

Розрахований діаметр стрижня порівнюється зі значенням орієнтовного діаметра стрижня, в залежності від потужності трансформатора. Потім приймається нормалізоване значення діаметру стрижня за шкалою нормалізованих діаметрів.

Третій основний розмір трансформатора – висота обмотки м

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta}. \quad (2.5)$$

Фактична площа перерізу стрижня $П_{фс}$ обирається за табл. 2.2 та переводиться в квадратні метри.

Таблиця 2.2 – Фактична площа перерізу стрижня $П_{фс}$ ($k_3=0.97$)

Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $П_{фс}$, см ²	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $П_{фс}$, см ²	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $П_{фс}$, см ²	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $П_{фс}$, см ²
0.090	56.7	0.15	161.7	0.25	446.2	0.35	868.6
0.095	62.9	0.16	183.5	0.26	478.0	0.36	910.3
0.100	72.0	0.17	208.5	0.27	515.8	0.37	969.8
0.105	79.3	0.18	232.8	0.28	556.2	0.38	1019.6
0.110	86.2	0.19	262.8	0.29	594.0	0.39	1080.0
0.115	93.9	0.20	277.9	0.30	644.6	0.40	1143.2
0.120	104.9	0.21	308.4	0.31	683.0	0.42	1255.0
0.125	112.3	0.22	342.5	0.32	732.7	0.45	1451.2
0.130	121.9	0.23	376.9	0.33	770.1	0.48	1657.4
0.140	141.5	0.24	407.9	0.34	828.6	0.50	1788.4

Активна площа перерізу стрижня розраховується за формулою

$$P_c = k_3 \cdot P_{\phi c} = k_3 \cdot k_{кр} \frac{\pi d}{4}. \quad (2.6)$$

Напруга одного витка обмотки трансформатора попередньо

$$u_\phi = 4.44 f \cdot B_c \cdot P_c. \quad (2.7)$$

Визначення розмірів стрижня і обмоток, що проводиться на початку розрахунку, є попередніми. Завдання попереднього розрахунку полягає в наближеному визначенні основних розмірів магнітопроводу і обмоток, а також в розрахунку активного перерізу стрижня і напруги одного витка обмотки, що необхідно в подальшому для повного розрахунку трансформатора.

В остаточному розрахунку магнітопроводу, виконаному після повного розрахунку обмоток, перевірки і підгонки до заданої норми характеристик короткого замикання визначають розміри ступенів в перерізі стрижня і ярма і всі інші розміри магнітопроводу; уточнюють активний переріз стрижня та індукцію; підраховують масу сталі, втрати і струм неробочого ходу.

У процесі остаточного розрахунку обмоток і магнітопроводу розміри і величини, приблизно знайдені в попередньому розрахунку, можуть бути дещо змінені. Тому при розрахунку характеристик короткого замикання і неробочого ходу та інших підрахунках, які наводяться після остаточної розкладки обмотки і визначення реальних розмірів магнітопроводу, слід користуватися не попередньо отриманими тут значеннями, а розмірами і величинами, знайденими для реальних обмоток і магнітопроводу.

Розрахунок основних коефіцієнтів попереднього розрахунку проводимо за методикою, наведеною в [1, п. 3.6].

Розраховуємо кратність ударного струму короткого замикання, коефіцієнт приведення механічних розтягувальних напруг.

Обираємо функцію мети, розраховуємо коефіцієнти функції мети за необхідними умовами існування екстремуму класичним методом оптимізації.

Розраховуємо обмеження на критерії оптимальності за припустимими: густиною струму та розтягувальною напругою.

Розраховуємо масу сталі, втрати і струм неробочого ходу, намагнічуючу потужність, масу металу обмоток з відводами

перемикача, середню густину струму та розтягувальну напругу в обмотках.

Розраховуємо діаметр стрижня магнітної системи, середній діаметр та висоту фази, середню відстань між осями стрижнів.

Приклад результатів розрахунків зводимо до таблиці 2.3 та для кращої візуалізації наводимо на рисунках 2.2 – 2.7.

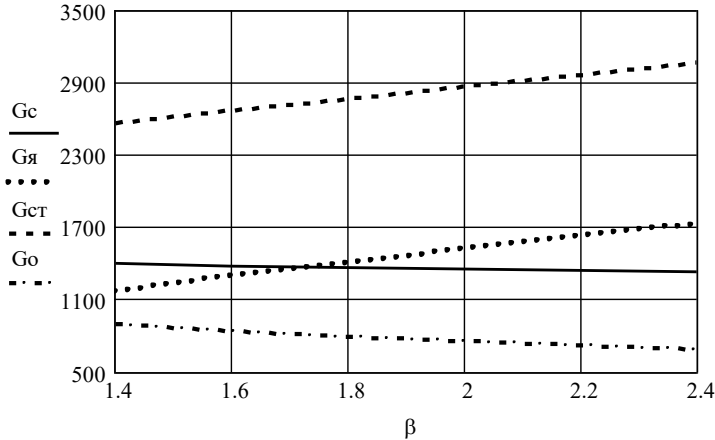


Рисунок 2.2 – Зміни мас сталі стрижнів G_c , ярем $G_{\text{я}}$, магнітної системи $G_{\text{ст}}$ та металу обмоток G_0 зі зміною β

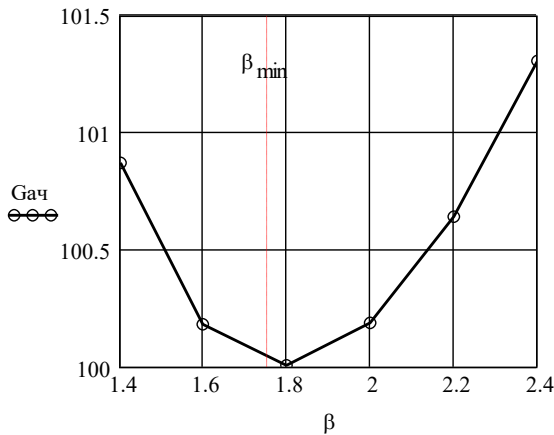
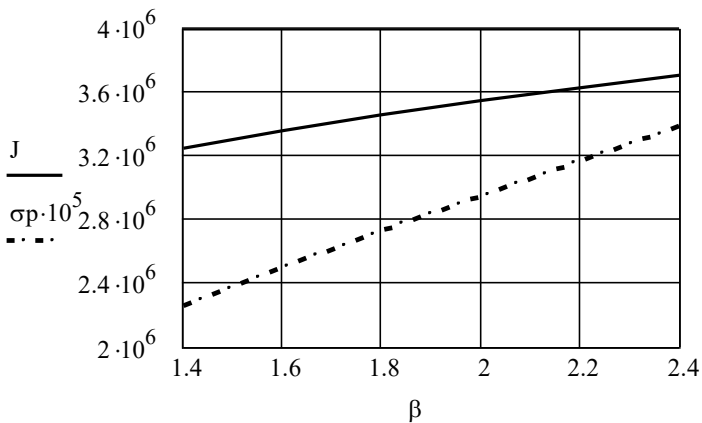


Рисунок 2.3 – Зміна відносної вартості активної частини зі зміною β

Таблиця 2.1 – Результати попереднього розрахунку

"b"	1.4	1.6	1.8	2	2.2	2.4
"x"	1.09	1.12	1.16	1.19	1.22	1.24
"Gc"	1393.87	1373.52	1357.58	1344.94	1334.85	1326.76
"Gя"	1166.79	1286.12	1401.56	1513.66	1622.84	1729.44
"GcГ"	2560.66	2659.64	2759.14	2858.6	2957.69	3056.2
"Gy"	100.92	111.55	121.85	131.87	141.64	151.19
"Px"	4197.78	4392.74	4586.89	4779.61	4970.59	5159.68
"Пс"	0.06	0.06	0.06	0.07	0.07	0.07
"Qx"	17923.45	19301.84	20642.35	21949.16	23225.77	24475.09
"ю"	0.72	0.77	0.83	0.88	0.93	0.98
"Go"	892.44	834.8	787.06	746.67	711.92	681.61
"Gnp"	919.21	859.85	810.67	769.07	733.28	702.06
"Caч"	100.87	100.18	100	100.18	100.64	101.31
"J"	3241125.9	3351150.16	3451294.49	3543409.88	3628854.56	3708657.29
"gp"	22.56	24.94	27.24	29.49	31.67	33.81
"d"	0.28	0.29	0.3	0.31	0.32	0.33
"d12"	0.4	0.41	0.42	0.44	0.45	0.46
"Г"	0.89	0.81	0.74	0.68	0.64	0.6
"C"	0.56	0.58	0.59	0.6	0.62	0.63

**Рисунок 2.4 – Зміна механічних напруг та густини струму зі зміною β**

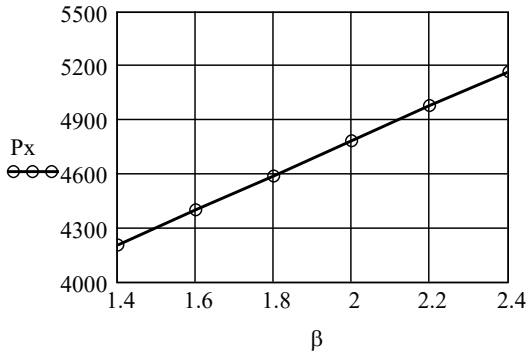


Рисунок 2.5 – Зміна втрат неробочого ходу зі зміною β

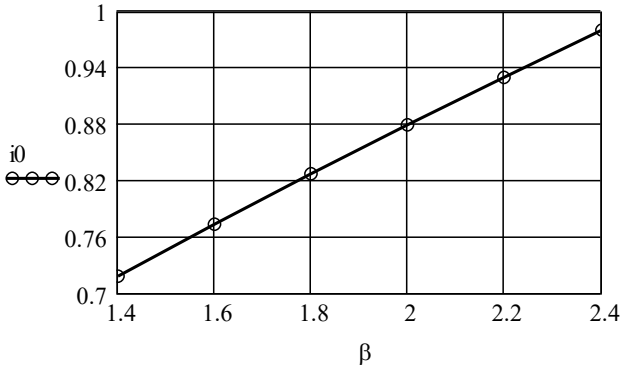


Рисунок 2.6 – Зміна струму неробочого ходу зі зміною β

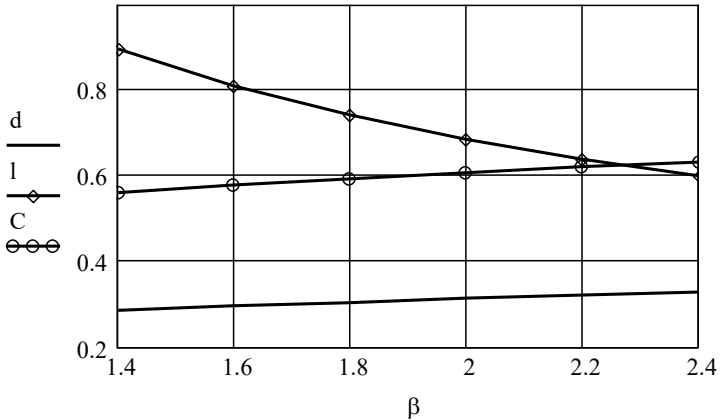


Рисунок 2.7 - Зміна основних розмірів – діаметра стрижня d , висоти обмотки l , та відстані між осями стрижнів трансформатора C зі зміною β

2.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Розрахунок основних коефіцієнтів попереднього розрахунку». Ознайомитись з матеріалом п. 2.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

2.3 Контрольні запитання для самоперевірки

2.3.1 З якою метою виконують попередній розрахунок?

2.3.2 Що представляє собою функція мети?

2.3.3 Що представляють собою «активні матеріали» трансформатора?

2.3.4 Які накладаються обмеження на функцію мети?

2.3.5 Значення коефіцієнта β ?

2.3.6 Як залежать розміри трансформатора від коефіцієнту β ?

2.3.7 Які обмеження накладаються на густину струму та електродинамічні зусилля в обмотках?

2.3.8 З якою метою креслять графік «Зміна відносної вартості активної частини зі зміною β »?

2.4 Програма роботи

2.4.1 Розрахувати основні коефіцієнти попереднього розрахунку.

2.4.2 Обрати функцію мети, розрахувати коефіцієнти функції мети класичним методом оптимізації.

2.4.3 Розрахувати масу сталі: стрижнів, ярм та кутів.

2.4.4 Розрахувати втрати і струм неробочого ходу, намагнічуючу потужність, масу металу обмоток з відводами перемикача, середню густину струму та розтягувальну напругу в обмотках.

2.4.5 Розрахувати діаметр стрижня магнітної системи, середній діаметр та висоту фази, середню відстань між осями стрижнів.

2.4.6 Результати розрахунків звести до таблиці та для рисунків.

2.5 Порядок виконання лабораторної роботи

2.5.1 Початкові дані для подальшого розрахунку взяти з лабораторної роботи №1 (п. 1.5.1).

2.5.2 Провести розрахунок основних коефіцієнтів попереднього розрахунку [1, (3.30), (3.35), (3.36), (3.43), (3.44), (3.52)].

2.5.3 Розрахувати кратність ударного струму короткого замикання, коефіцієнт приведення механічних розтягувальних напруг [1, (3.65)].

2.5.4 Обрати функцію мети

$$\frac{dC'_{aq}}{dx} = 0. \quad (2.8)$$

Розрахувати коефіцієнти функції мети B, C, D [1, (3.55)] за необхідними умовами існування екстремуму класичним методом оптимізації та визначити оптимальне значення коефіцієнту β .

2.5.5 Розрахувати масу сталі [1, (3.34), (3.41), (3.45)], втрати [1, (8.33)] і струм неробочого ходу [1, (8.48)], намагнічуючу потужність [1, (8.46)], масу металу обмоток [1, (3.50)], середню густину струму [1, (3.49)] та розтягувальну напругу в обмотках [1, (3.64)].

2.5.6 Розрахувати діаметр стрижня магнітної системи, середній діаметр та висоту фази, середню відстань між осями стрижнів.

2.5.7 Звести розрахунки до таблиці та побудувати графіки згідно з пунктом 2.1.

2.6 Зміст звіту

2.6.1 Розрахунок основних коефіцієнтів попереднього розрахунку, кратності ударного струму короткого замикання, коефіцієнту приведення механічних розтягувальних напруг.

2.6.2 Результати розрахунку функцію мети.

2.6.3 Результати аналітичного розрахунку мас сталі, дротів; напруги КЗ та струму і втрат неробочого ходу; намагнічуючої потужності; середньої густини струму та розтягувальної напруги в обмотках.

2.6.4 Результати розрахунків діаметру стрижня магнітної системи, середнього діаметру та висоти фази, середньої відстані між осями стрижнів.

2.6.5 Результати розрахунків звести до таблиці та побудувати графіки згідно з результатами п.2.1.

2.6.5 Висновки.

3 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 3 ВИЗНАЧЕННЯ ПОПЕРЕДНІХ ДАНИХ РОЗРАХУНКУ ТРАНСФОРМАТОРА

Мета роботи: визначення за попередніми даними та емпіричними формулами основних характеристик трансформатора.

3.1 Теоретичні відомості

Спираючись на результати розрахунків, які наведено в табл. 2.3 та на рисунках 2.2 – 2.7 вашої лабораторної роботи №2 необхідно обрати діаметр стрижня трансформатора.

Розрахований діаметр стрижня порівнюється зі значенням орієнтовного діаметра стрижня, в залежності від потужності трансформатора, за табл. 3.1, 3.2. Потім приймається нормалізоване значення діаметру стрижня за шкалою нормалізованих діаметрів, табл. 3.3.

Таблиця 3.1 – Орієнтовний діаметр стрижня d , м масляних трансформаторів

Потужність трансформатора S , кВА	до 16		16	25	40-100	160-630		
Орієнтовний діаметр стрижня d , м	до 0,08		0,08	0,09	0,1-0,14	0,16-0,18	0,2	0,22
Потужність трансформатора S , кВА	1000-1600		2500-6300		10000	16000	25000	32000
Орієнтовний діаметр стрижня d , м	0,24-0,26	0,2-0,3	0,32-0,34	0,36-0,38	0,4-0,42	0,45-0,5	0,5-0,56	0,6-0,67
							0,71-0,75	

Примітка. При використанні таблиці для однофазного або триобмоткового трансформатора його потужність помножити на 1,5.

Таблиця 3.1 – Орієнтовний діаметр стрижня d , м сухих трансформаторів

Потужність трансформатора S , кВА	до 400	630-1000	1600
Орієнтовний діаметр стрижня d , м	до 0,22	0,24-0,25	0,28-0,32

Таблиця 3.3 – Нормалізовані значення діаметру стрижня d

Діаметри стрижнів без поперечних охолоджуючих каналів, м												
0.08	0.085	0.09	0.092	0.095	0.1	0.105	0.11	0.115	0.12	0.125	0.13	0.14
0.15	0.16	0.17	0.18	0.19	0.2	0.21	0.22	0.225	0.23	0.24	0.245	0.25
0.26	0.27	0.28	0.29	0.3	0.31	0.32	0.33	0.34	0.35	0.36	0.37	0.38
0.39	0.4	0.42	0.45	0.48	0.5	0.53	0.56	0.6	0.63	0.67	0.71	0.75
Діаметри стрижнів з поперечними охолоджуючими каналами, м												
0,8	0,85	0,875	0,9	0,925	0,95	0,975	1,0	1,03	1,06	1,12	1,15	1,18
1,22	1,25	1,28	1,32	1,36	1,4	1,45	1,5					

Діаметр стрижня магнітопроводу

$$d = A \cdot \sqrt[4]{\beta}. \quad (3.1)$$

Приймаємо нормалізоване значення діаметру стрижня за табл. 3.3, після чого перераховуємо коефіцієнт β та змінну x

$$\beta = \left(\frac{d}{A} \right)^4, \quad (3.2)$$

$$x = \sqrt[4]{\beta}. \quad (3.3)$$

За нормалізованим діаметром стрижня обираємо фактичну площу перерізу стрижня з табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Фактична площа перерізу стрижня $P_{\text{ФС}}$ ($k_3=0.97$)

Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\text{ФС}}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\text{ФС}}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\text{ФС}}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\text{ФС}}$, см^2
0.090	56.7	0.15	161.7	0.25	446.2	0.35	868.6
0.095	62.9	0.16	183.5	0.26	478.0	0.36	910.3
0.100	72.0	0.17	208.5	0.27	515.8	0.37	969.8
0.105	79.3	0.18	232.8	0.28	556.2	0.38	1019.6
0.110	86.2	0.19	262.8	0.29	594.0	0.39	1080.0
0.115	93.9	0.20	277.9	0.30	644.6	0.40	1143.2
0.120	104.9	0.21	308.4	0.31	683.0	0.42	1255.0
0.125	112.3	0.22	342.5	0.32	732.7	0.45	1451.2
0.130	121.9	0.23	376.9	0.33	770.1	0.48	1657.4
0.140	141.5	0.24	407.9	0.34	828.6	0.50	1788.4

Активний переріз стрижня

$$P_c = k_3 \cdot P_{\phi c}, \quad (3.4)$$

де k_3 – коефіцієнт заповнення, п. 1.1;

$P_{\phi c}$ – фактичну площу перерізу стрижня.

Середній діаметр обмоток

$$d_{12} = a \cdot d. \quad (3.5)$$

Висота обмоток

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta}. \quad (3.6)$$

Висота стрижня

$$l_c = l + l'_0 + l''_0. \quad (3.7)$$

Середня відстань між осями стрижнів

$$C = d_{12} + a_{12} + b \cdot d + a_{22}. \quad (3.8)$$

Електрорушійна сила одного витка

$$u_g = 4.44 \cdot f \cdot P_c \cdot B_c. \quad (3.9)$$

Потім за методикою попереднього розрахунку для обраного діаметру стрижня перераховують масу сталі стрижнів, ярем, кута магнітної системи та сталі магнітопроводу; масу металу обмоток та масу дровових матеріалів з відводами перемикача. Проводять розрахунок струму неробочого ходу та механічної напруги в обмотках.

У процесі остаточного розрахунку обмоток і магнітопроводу розміри і величини, приблизно знайдені в попередньому розрахунку, можуть бути дещо змінені. Тому при розрахунку характеристик короткого замикання і неробочого ходу та інших підрахунках, які наводяться після остаточної розкладки обмотки і визначення реальних розмірів магнітопроводу, слід користуватися не попередньо отриманими тут значеннями, а розмірами і величинами, знайденими для реальних обмоток і магнітопроводу.

3.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Визначення попередніх даних розрахунку трансформатора». Ознайомитись з матеріалом п. 3.1 та підготувати відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

3.3 Контрольні запитання для самоперевірки

3.3.1 Які обмеження враховують при виборі діаметра стрижня магнітної системи?

3.3.2 Які обмеження існують для густини струму в обмотках НН та ВН для мідного чи алюмінієвого дротів?

3.3.3 Які обмеження існують для електродинамічних сил в обмотках НН та ВН для мідного та алюмінієвого дротів?

3.3.4 Які відхилення припустимі при виборі втрат та струму НХ?

3.3.5 Які відхилення припустимі при виборі втрат та напруги КЗ?

3.3.6 Чим відрізняються напруги витка обмоток НН та ВН?

3.3.7 З якою метою виконують попередній розрахунок трансформатора?

3.4 Програма роботи

3.4.1 Обрати діаметр стрижня трансформатора та перерахувати коефіцієнт β та змінну x .

3.4.2 Перерахувати геометричні розміри обмоток.

3.4.3 Перерахувати масу сталі; масу металу обмоток та масу дровових матеріалів з відводами перемикача.

3.4.4 Провести розрахунок струму неробочого ходу та механічної напруги в обмотках.

3.5 Порядок виконання лабораторної роботи

3.5.1 Початкові дані для подальшого розрахунку взяти з лабораторної роботи №2.

3.5.2 Провести розрахунки за (3.1)–(3.9).

3.5.3 Перерахувати масу сталі; масу металу обмоток та масу дровових матеріалів з відводами перемикача.

3.5.4 Провести розрахунок струму неробочого ходу та механічної напруги в обмотках.

3.6 Зміст звіту

3.6.1 Результати розрахунків за пп. 3.5.2 – 3.5.4.

3.6.2 Висновки.

4 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ НИЗЬКОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: визначення електричних величин, геометричних розмірів та маси обмотки низької напруги.

4.1 Теоретичні відомості

Основним елементом всіх обмоток трансформаторів є виток, який в залежності від струму навантаження може бути виконаний одним дротом круглого, або прямокутного перерізу, або, при досить великих струмах, групою паралельних проводів.

Окремі витки обмотки групуються у котушки. Котушкою називається група послідовно з'єднаних витків обмотки, конструктивно об'єднана та відокремлена від інших таких самих груп або від інших обмоток трансформатора. Обмотка стрижня може складатися з однієї, двох або багатьох котушок. Котушка може складатися з низки шарів або тільки з одного шару витків. Число витків у котушці може бути різним – як цілим, так і дробовим, проте має бути більше одиниці.

Для забезпечення належної електричної міцності обмотки між її витками, котушками, а також між обмоткою та іншими частинами трансформатора повинні бути витримані певні ізоляційні відстані, що залежать від робочої напруги і гарантують обмотку від пробоя ізоляції як при робочій напрузі, так і при можливих перенапругах. У цих проміжках можуть бути встановлені ізоляційні конструкції, або деталі з твердого діелектрика, або проміжки можуть бути заповнені тільки твердим діелектриком – електроізоляційним картоном, кабельним папером і т. д. або тільки ізолюючим середовищем – маслом, повітрям і т.д.

У всіх типах обмоток прийнято розрізняти осьовий і радіальний напрямки. Осьовим вважається напрямок, паралельний осі стрижня трансформатора, на якому встановлюється дана обмотка. Радіальним вважається напрям будь-якого радіусу кола обмотки. У силових трансформаторах з вертикальним розташуванням стрижнів осьовий напрямок збігається з вертикальним, а радіальний – з горизонтальним. У цьому сенсі прийнято говорити також про осьові і радіальні – вертикальні і горизонтальні – канали обмоток.

Задля розрахунку кількості витків обмотки НН скористаємось формулою

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{u_{\epsilon}}, \quad (4.1)$$

де $U_{\phi 1}$ – фазна напруга обмотки НН, В;

u_{ϵ} – ЕРС витка, В.

Прийmemo ціле число витків.

Визначимо остаточно напругу одного витка за формулою

$$u_{\epsilon} = \frac{U_{\phi 1}}{w_1}. \quad (4.2)$$

Для визначення середньої густини струму в обмотках, що забезпечує отримання заданих втрат короткого замикання, можна скористатися формулами, А/м²

$$\begin{aligned} \text{- для мідних дротів} \quad J_{Cu} &= 0.746 \cdot k_{\partial} \frac{P_{K3} \cdot u_{\epsilon}}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4; \\ \text{- для алюмінієвих дротів} \quad J_{Al} &= 0.463 \cdot k_{\partial} \frac{P_{K3} \cdot u_{\epsilon}}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4, \end{aligned} \quad (4.3)$$

де P_{K3} – втрати короткого замикання, Вт;

S – потужність трансформатора, кВА;

k_{∂} – коефіцієнт додаткових втрат в обмотках, відводах, стінах бака і ін., табл. 4.1.

Розрахункові значення густини струму слід звірити з даними табл. 4.2, де наведено орієнтовні значення, що має на меті уникнути грубих помилок в розрахунку.

Переріз витка попередньо

$$I\Gamma'_{\epsilon} = \frac{I_{\phi 1}}{J_{cp}}. \quad (4.4)$$

Завданням проектувальника є розумне поєднання інтересів експлуатації і виробництва. Це завдання вирішується в значній мірі вже при виборі того чи іншого типу обмотки. Тому на вибір типу обмотки, що якнайкраще відповідає вимогам експлуатації і в той же час найбільш простий і дешевий у виробництві, слід звертати особливу увагу.

Таблиця 4.1 – Значення k_D для трифазних трансформаторів

Потужність трансформатора, кВА	до 100	160-630	1000-6300	10000-16000	25000-63000	80000-100000
k_D	0.96	0.96-0.92	0.91-0.9	0.9-0.87	0.86-0.78	0.77-0.75

Примітка. Для сухих трансформаторів потужністю 10-160 кВА приймати $k_D = 0.99-0.96$ і потужністю 250-1600 кВА $k_D = 0.92-0.96$.

Таблиця 4.2 – Середня густина струму в обмотках J , А/м², для сучасних трансформаторів з втратами короткого замикання

Масляні трансформатори					
Потужність, кВА	25-40	63-630	1000-6300	10000-16000	25000-80000
Мідь	1.8-2.2	2.2-3.5	2.2-3.5	2.0-3.5	2.0-3.5
Алюміній	1.1-1.8	1.2-2.5	1.5-2.6	1.5-2.7	-
Сухі трансформатори					
Потужність та напруга	10-160 кВА; 0.5 кВ		160-1600 кВА; 10 кВ		
Обмотка	внутрішня НН	зовнішня ВН	внутрішня НН	зовнішня ВН	
Мідь	2.0-1.4	2.2-2.8	2.0-1.2	2.0-2.8	
Алюміній	1.3-0.9	1.3-1.8	1.4-0.8	1.4-2.0	

Примітки: 1. Для трансформатора з втратами КЗ вказаними в державних стандартах можливий вибір густини струму в масляних трансформаторах до 4.5 А/м² в мідних і до 2.7 А/м² в алюмінієвих обмотках; в сухих трансформаторах – відповідно до 3 і 2 А/м². 2. Густина струму в обмотках з транспонованого дроту вибирається так само, як і для мідного або алюмінієвого дроту. 3. Густина струму в обмотках з алюмінієвої фольги вибирається як для алюмінієвого дроту.

Після визначення середньої густини струму і перерізу витку для кожної з обмоток необхідно зробити вибір типу конструкції обмотки.

Основними критеріями при виборі типу обмотки [1, табл. 5.8] служать наступні величини: струм навантаження одного стрижня, потужність обмоток одного стрижня, номінальна напруга, а також поперечний переріз витка обмотки. Коли ж тип обмотки НН обрано, переходимо до її розрахунку за додатком Б.

Підібрані розміри дротів записуються так:

$$\begin{aligned} &\text{- прямокутний} \quad \text{Марка дроту} - \frac{a \times b}{a' \times b'}, \\ &\text{- круглий} \quad \text{Марка дроту} - \frac{d}{d'}. \end{aligned}$$

Розміри дротів в ізоляції, мм

$$a' = a + 2\delta, \quad b' = b + 2\delta, \quad d' = d + 2\delta. \quad (4.5)$$

де $a \times b$ – розміри дроту без ізоляції, мм;

d – діаметр дроту без ізоляції, мм;

δ – товщина ізоляції на один бік, мм.

Повний переріз витка

$$\Pi_{\text{в}} = n_{\text{пар}} \cdot \Pi_{\text{пр}}, \quad (4.6)$$

де $n_{\text{пар}}$ – кількість паралельних дротів;

$\Pi_{\text{пр}}$ – переріз одного дроту.

Густина теплового потоку q на поверхні обмотки (рис. 4.1) залежить від конструкції обмотки.

Густина теплового потоку q на поверхні обмотки для:

– циліндричної обмотки та гвинтової без радіальних каналів (рис. 4.1, а та б) розраховується за формулами

$$q_{Cu} = \frac{107 J^2 \cdot k_{\partial}}{k_3} b \cdot n \frac{a}{a'} \cdot 10^{-10}, \quad q_{Al} = \frac{172 J^2 \cdot k_{\partial}}{k_3} b \cdot n \frac{a}{a'} \cdot 10^{-10}, \quad (4.7)$$

де n – число прошарків в концентрі, або в ході;

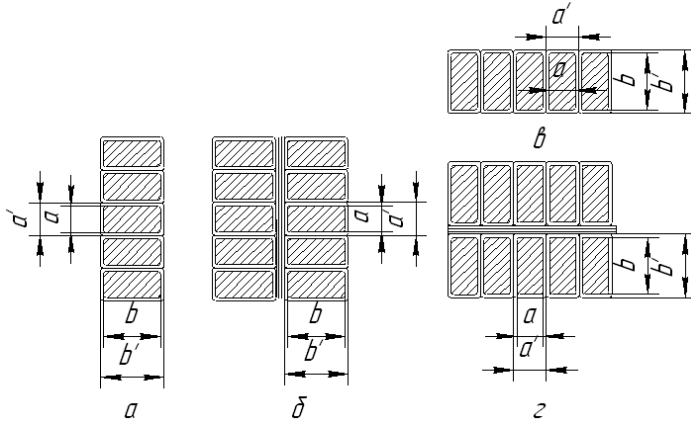
– гвинтової та котушкової обмоток з радіальними каналами (рис. 4.1, в) розраховується за формулами

$$q_{Cu} = \frac{107 \cdot J \cdot I_{\phi} \cdot w_k \cdot k_{\partial}}{k_3 \cdot (b' + a_{\text{пад}})} \cdot 10^{-10}, \quad q_{Al} = \frac{172 \cdot J \cdot I_{\phi} \cdot w_k \cdot k_{\partial}}{k_3 \cdot (b' + a_{\text{пад}})} \cdot 10^{-10}, \quad (4.8)$$

де w_k – для котушкової обмотки – число витків в котушці; для одноходової гвинтової $w_k=1$, для двоходової – $w_k=0.5$;

k_3 – коефіцієнт закриття поверхні, $k_3=0.75$;

– гвинтової та котушкової обмоток із спареними котушками або витками (рис. 4.1, г) розраховується за формулами (4.8) при заміні коефіцієнтів 107 на 214 та 172 на 344 відповідно.



а – циліндрична одношарова обмотка; б – циліндрична двошарова обмотка без охолоджуючого каналу між шарами; в – гвинтова та котушкова з каналами між всіма витками; г – обмотка зі здвоєними котушками або витками

Рисунок 4.1 – До розрахунку густини теплового потоку в обмотках різних типів

Коефіцієнт додаткових втрат при розрахунку густини теплового потоку q на поверхні обмотки визначають для прямокутного та круглого дроту за формулами

$$\begin{aligned} k_{\partial} &= 1 + k \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2, \\ k_{\partial} &= 1 + k_o \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot d^4 \cdot n^2, \end{aligned} \quad (4.10)$$

де k – коефіцієнт, для прямокутних мідних дротів, $k = 0.095$, для алюмінієвих – $k = 0.037$;

k_o – коефіцієнт, для круглих мідних дротів $k_o = 0.044$, для алюмінієвих – $k_o = 0.017$;

n – число дротів обмотки в напрямку, перпендикулярному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання,

β – коефіцієнт (значення β не повинне перевищувати 1):

$$\begin{aligned} \text{дріт прямокутний} \quad \beta &= b \cdot m / l \\ \text{дріт круглий} \quad \beta &= d \cdot m / l' \end{aligned} \quad (4.11)$$

де m – число дротів обмотки в напрямку, паралельному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання.

Після розрахунку отримане q порівнюють із припустимими

значеннями для даного типу обмоток, зазвичай не більше (1200÷1400) Вт/м².

Маса метала обмотки розраховується за формулою

$$G_{oCu} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_e, \quad G_{oAl} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot c \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_e, \quad (4.12)$$

де c – число несучих обмотки стрижнів трансформатора.

Маса дроту обмотки розраховується за формулою

$$G_{np} = G_o \cdot k_{iz}, \quad (4.13)$$

де k_{iz} – коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ у відсотках за рахунок ізоляції, табл. 4.3.

Таблиця 4.3 – Орієнтовне збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції при $2\delta=0.45(0.5)$, мм

$k_{iz}, \%$		а, мм			
		1.40 – 1.80	1.90 – 2.65	2.80 – 3.75	4.00 – 7.00
b, мм	3.75 – 7.50	3.5	3.0	2.5	2.0
	8.00 – 18.00	2.5	2.0	2.0	1.5

Примітки: 1 Дані таблиці помножити при $2\delta=0.96$ мм на 2.5, при $2\delta=1.35$ мм на 3.5, при $2\delta=1.92$ мм на 5. 2 Для дроту марок ПСД та ПСДК данні таблиці помножити при $2\delta=0.45$ мм на 1.7, при $2\delta=0.5$ мм на 2. 3 Для алюмінієвого дроту дані таблиці помножити на 3.3.

Осьовий l та радіальний a_{pad} розміри обмотки визначаються згідно з рисунками та методиками розрахунку.

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки відповідно

$$D' = d + 2a_{01}; \quad (4.14)$$

$$D'' = D' + 2a_{pad}, \quad (4.15)$$

де a_{01} – ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою, (табл. 4.4).

Таблиця 4.4 – Ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою

S, кВА	25-250	400-630	1000-2500	630-1600	2500-6300	≥ 6300	
U _{випр} , кВ	5	5*	5	18, 25, 35	18, 25, 35	45	55
a_{01} , мм	4	5	15	15	17.5	20	23

Примітка. Для гвинтових обмоток розмір a_{01} взяти з наступної колонки.

4.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Розрахунок обмотки НН». Ознайомитись з матеріалом п. 4.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

4.3 Контрольні запитання для самоперевірки

4.3.1 В яких межах припустима густина струму в обмотках розташованих ближче до стрижня?

4.3.2 За якими критеріями обирають тип обмотки НН?

4.3.3 Що необхідно зробити, якщо переріз витка перевищує переріз стандартного дроту?

4.3.4 Для чого розраховують густина теплового потоку в обмотці?

4.3.5 Які типи обмоток застосовують для обмоток НН?

4.3.6 Які типи обмоток найбільш стійкі для електродинамічних навантажень при КЗ?

4.3.7 Які типи обмоток найбільш прості в конструктивному виконанні?

4.4 Програма роботи

4.4.1 Скласти початкові дані для обмотки НН.

4.4.2 Обрати конструкцію обмотки НН.

4.4.3 Розрахувати геометричні розміри обмотки НН.

4.4.4 Побудувати ескіз обмотки НН.

4.4.5 Розрахувати масу обмотки НН.

4.5 Порядок виконання лабораторної роботи

4.5.1 Початкові дані для подальшого розрахунку взяти з попередніх лабораторних робіт та розрахувати за (4.1)-(4.4).

4.5.2 Враховуючі обмеження, обрати конструкцію обмотки НН [1, табл. 5.8].

4.5.3 Враховуючи (4.4), вибрати марку дроту для обмотки НН, кількість паралельних дротів, їх розміри (4.5).

4.5.4 Побудувати ескіз обмотки НН з урахуванням пп. 4.5.3.

4.5.5 Провести розрахунок обраного типу обмотки за дод. Б.

4.6 Зміст звіту

4.6.1 Розрахунок початкових даних обмотки НН.

4.6.2 Опис конструкції обмотки НН.

4.6.3 Ескіз обмотки НН.

4.6.4 Результати розрахунку обмотки НН.

4.6.5 Висновки.

5 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5 РОЗРАХУНОК ОБМОТКИ ВИСОКОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: визначення електричних величин, геометричних розмірів та маси обмотки високої напруги.

5.1 Теоретичні відомості

5.1.1 Розрахуємо кількість витків обмотки ВН

$$w_{H2} = \frac{U_{\phi 2}}{u_g}, \quad (5.1)$$

де $U_{\phi 2}$ – фазна напруга обмотки ВН, В;

u_g – ЕРС витка, В.

Прийmemo ціле число витків.

Для визначення приблизної густини струму в обмотках ВН скористаємось формулою

$$J'_2 = 2 \cdot J_{cp} - J_1. \quad (5.2)$$

де J_{cp} , J_1 – середня густина та густина струму обмотки НН, А/м².

Переріз витка попередньо

$$I'_{22} = \frac{I_{\phi 2}}{J'_2} \quad (5.3)$$

Після врегулювання густини струму і перерізу витка необхідно зробити вибір типу конструкції обмотки ВН за тими ж критеріями, що і для обмотки НН та виконати її розрахунок за додатком Б.

Для обмоток ВН класом напруги 35 кВ (іноді, за вимогою заказчика, 20 кВ) передбачене виконання збільшених каналів та (або) використання проводів з посиленою ізоляцією на торцях обмотки. Приклад виконання розрахунку таких обмоток наведено за адресою <https://moodle.zp.edu.ua/> дисципліна «ПЕМ та Т» папка «Приклади виконання ЛР» – «5LR IPEM T».

При розподілі по катушках витків із різного дроту, чи з різною товщиною ізоляції необхідно прагнути отримати однакову ширину (радіальний розмір) обмотки по висоті, що приведе до більш рівномірного розподілення електродинамічних сил вздовж обмотки.

5.1.2 Для визначення висоти обмотки з використання проводів з посиленою ізоляцією та збільшених каналів на торцях обмотки можна користуватися наступною формулою

$$l_2 = b'_2 \cdot (n_{\text{ком}2} - n) + n \cdot b''_2 + k \left[h'_{\kappa 2} (n_{\text{ком}2} - (n + 1)) + n \cdot h'_{\kappa 2} \right], \quad (5.4)$$

де b'_2 , b''_2 – осьові розміри дроту основних котушок та котушок з посиленою ізоляцією обмотки ВН відповідно, мм;

$n_{\text{ком}2}$ – кількість котушок обмотки ВН;

n – кількість збільшених каналів (котушок з посиленою ізоляцією);

k – коефіцієнт записування обмотки;

$h'_{\kappa 2}$, $h''_{\kappa 2}$ – висота каналів між основними котушками та котушками з посиленою ізоляцією обмотки ВН відповідно, мм.

5.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Розрахунок обмотки ВН». Ознайомитись з матеріалом п. 5.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

5.3 Контрольні запитання для самоперевірки

5.3.1 З яких міркувань зазвичай на стрижень намотують спочатку обмотку НН, а потім через охолоджуючий канал обмотку ВН?

5.3.2 За якими критеріями обирають тип обмотки ВН?

5.3.3 Що необхідно зробити, якщо переріз витка перевищує переріз стандартного дроту?

5.3.4 З яких міркувань та за рахунок чого обмежують густину теплового потоку в обмотці?

5.3.5 Які типи обмоток застосовують для обмоток ВН? Які не застосовують та чому?

5.3.6 Які типи обмоток найбільш стійкі для електродинамічних навантажень при КЗ?

5.3.7 Які типи обмоток найбільш прості в конструктивному виконанні?

5.3.8 Чому важливо отримати при розрахунку конструкцій обмоток з одного матеріалу приблизно рівну в них густину струму?

5.4 Програма роботи

- 5.4.1 Скласти початкові дані для обмотки ВН.
- 5.4.2 Враховуючі обмеження обрати конструкцію обмотки ВН.
- 5.4.3 Розрахувати геометричні розміри обмотки ВН.
- 5.4.4 Побудувати ескіз обмотки ВН.
- 5.4.5 Розрахувати масу обмотки ВН.

5.5 Порядок виконання лабораторної роботи

- 5.5.1 Початкові дані для подальшого розрахунку взяти з попередніх лабораторних робіт.
- 5.5.2 Враховуючі обмеження, обрати конструкцію обмотки ВН [1, табл. 5.8].
- 5.5.3 Обрати марку дроту(ів) для обмотки ВН, кількість паралельних дротів, їх розміри.
- 5.5.4 Побудувати ескіз обмотки ВН.
- 5.5.5 Провести розрахунок обраного типу обмотки за дод. Б.

5.6 Зміст звіту

- 5.6.1 Розрахунок початкових даних обмотки ВН.
- 5.6.2 Опис конструкції обмотки ВН.
- 5.6.3 Ескіз обмотки ВН.
- 5.6.4 Результати розрахунку обмотки ВН.
- 5.6.5 Висновки.

6 ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6

РОЗРАХУНОК РЕГУЛЮВАЛЬНОГО ШАРУ ОБМОТКИ ВИСОКОЇ НАПРУГИ ЗА СХЕМОЮ «РЕВЕРС»

Мета роботи: визначення електричних величин, геометричних розмірів та маси регулювального шару обмотки високої напруги.

6.1 Теоретичні відомості

В даних лабораторних роботах регулювання напруги під навантаженням (РПН) для всіх варіантів розраховується за схемою «реверс». Регулювальний шар винесено окремим концентром, який розташовано зовні обмотки ВН через осьовий охолоджуючий канал.

У схемі регулювання напруги передбачають декілька рівнів регулювання напруги вище і нижче номінального значення напруги.

Для нормальної роботи споживачів необхідно підтримувати певний рівень напруги на шинах підстанцій. В електричних мережах передбачаються способи регулювання напруги, одним з яких є зміна коефіцієнта трансформації трансформаторів.

Відомо, що коефіцієнт трансформації визначається як відношення первинної напруги до вторинної.

Обмотки трансформаторів забезпечуються додатковими відгалуженнями, за допомогою яких можна змінювати коефіцієнт трансформації. Перемикання відгалужень може відбуватися: перемиканням без збудження (ПБЗ), тобто після відключення всіх обмоток від мережі, або регулюванням під навантаженням (РПН).

Регулювання під навантаженням дозволяє перемикати відгалуження обмотки трансформатора без розриву ланцюга. Пристрій РПН передбачає регулювання напруги в різних межах залежно від потужності і напруги трансформатора, табл. 6.1.

Регулювальні ступені виконуються назовні обмотки ВН, так як менший за значенням струм дозволяє зменшити ізоляційні відстані між обмотками та спростити конструкцію перемикаючого пристрою, що є достатньо важливими питаннями з економічної точки зору.

Таблиця 6.1

Двохобмоткові трансформатори	
Потужність та напруга	Кількість щаблів та глибина регулювання
1000—6300 кВА, 20 и 35 кВ	$\pm 6 \times 1.5 \% = \pm 9 \%$
2500 кВА, 110 кВ, РПН на стороні НН	$+10 \times 1.5 \% = +15 \%$ $-8 \times 1.5 \% = -12 \%$
6300—125000 кВА, 110 кВ	$\pm 9 \times 1.67 = \pm 16 \%$
Триобмоткові трансформатори	
6300 кВА, 35 кВ	$\pm 6 \times 1.5 \% = \pm 9 \%$
10000—16000 кВА, 35 кВ	$\pm 8 \times 1.5 \% = 12 \%$
6300—80000 кВА, 110 кВ	$\pm 9 \times 1.67 \% = 16 \%$

Визначимо напругу одного рівня регулювання, наприклад, при $U\% = 0.015\%$, продовжуючи до того розглянутий приклад, тобто

$$\Delta U = \frac{U_2}{\sqrt{3}} U\%. \quad (6.1)$$

Число витків на одному щаблі регулювання регулювальної обмотки (РО)

$$w_{iu} = \frac{\Delta U}{u_e}, \quad (6.2)$$

приймаємо $w_{iu} = 14$ витків та перерахуємо фазну напругу одного рівня

$$\Delta U_\phi = u_e \cdot w_c, \quad (6.3)$$

Всього регулювальних витків при кількості щаблів регулювання $n_p = 6$ в даному випадку

$$w_\Sigma = w_{iu} \cdot n_p = 16 \cdot 6 = 96 \text{ витків}, \quad (6.4)$$

Число витків у шарі орієнтовно при положенні дроту пластом чи на ребро відповідно

$$w_{iu} = \frac{l_2}{b'_2 \cdot n_{e2}} - 1, \quad w_{iu} = \frac{l_2}{a'_2 \cdot n_{e2}} - 1. \quad (6.5)$$

Кількість шарів регулювальної обмотки

$$n_{ш} = \frac{w_{\Sigma}}{w_{ш}}. \quad (6.6)$$

Обираємо циліндричну одно(двох)шарову обмотку.

Перевагою є одношарова обмотка, бо має більш простішу конструкцію, тобто менші економічні затрати по проектуванню та виготовленню.

Розрахуємо значення фазних напруг, кількість витків та коефіцієнти трансформації по щаблях регулювання за попереднім прикладом, табл. 6.2.

Таблиця 6.2

"Ступінь"	"Uф2, В"	"Витки"	"K uф"	"K w"	"dK, %"
"+6"	22073.063	997	55.408	55.389	0.035
"+5"	21769.954	983	54.647	54.611	0.066
"+4"	21466.845	969	53.886	53.833	0.099
"+3"	21163.736	955	53.126	53.056	0.132
"+2"	20860.627	941	52.365	52.278	0.166
"+1"	20557.519	927	51.604	51.5	0.201
"Uном"	20254.41	913	50.843	50.722	0.238
"-1"	19951.301	899	50.082	49.944	0.275
"-2"	19648.192	885	49.321	49.167	0.314
"-3"	19345.083	871	48.56	48.389	0.354
"-4"	19041.974	857	47.8	47.611	0.395
"-5"	18738.865	843	47.039	46.833	0.437
"-6"	18435.756	829	46.278	46.056	0.481

Якщо регулювальна обмотка має набагато менші розміри до обмотки ВН, то її розміщують симетрично радіальної осі обмоток НН та ВН доповнюючи осьовий розмір з торців ізоляцією. Якщо осьовий розмір більш менш порівняний з розміром обмотки ВН, то її іноді виконують з розгоном витків, маючи на увазі гвинтову обмотку. Обидві назви використовують при конструюванні регулювального шару обмотки ВН.

Висоту, радіальні розміри обмотки та її масу можна розрахувати за дод. Б.

6.2 Завдання на підготовку до лабораторної роботи

Опрацювати теорію за темою: «Розрахунок обмотки РО за схемою «реверс». Ознайомитись з матеріалом п. 6.1 та підготувати ґрунтовні відповіді на контрольні запитання для самоперевірки.

6.3 Контрольні запитання для самоперевірки

- 6.3.1 Які види регулювання напруги ви знаєте?
- 6.3.2 Як розрахувати напругу на щаблях регулювання?
- 6.3.3 Як розрахувати кількість витків на щаблях регулювання?
- 6.3.4 Чим відрізняється регулювання під навантаженням (РПН) від перемикачання без збудження (ПБЗ)?
- 6.3.5 Як розпізнати, до якої обмотки підключене регулювання?
- 6.3.6 Які відсоткові щаблі регулювання ви знаєте
- 6.3.7 Які типи обмоток найбільш прості в конструктивному виконанні задля регулювальних обмоток?
- 6.3.8 Принцип роботи регулювальної обмотки, яку ввімкнено за схемою «реверс».
- 6.3.9 Як розподіляються електродинамічні зусилля при ввімкненні одного, чи декількох щаблів регулювання при застосуванні схеми «реверс»?
- 6.3.10 Як працює принцип роботи за схемою «реверс». Переваги в плані розподілення електродинамічних зусиль.

6.4 Програма роботи

- 6.4.1 Скласти початкові дані для обмотки РО.
- 6.4.2 Враховуючі обмеження обрати конструкцію обмотки РО.
- 6.4.3 Розрахувати геометричні розміри обмотки РО.
- 6.4.4 Побудувати ескіз обмотки РО.
- 6.4.5 Побудувати таблицю напруг, витків та коефіцієнтів трансформації РО.
- 6.4.6 Розрахувати масу обмотки РО.

6.5 Порядок виконання лабораторної роботи

6.5.1 Початкові дані для подальшого розрахунку взяти з лабораторної роботи №1.

6.5.2 Обрати конструкцію обмотки РО та прорахувати напруги та кількість витків.

6.5.3 Вибрати марку дроту для обмотки РО, кількість паралельних дротів, їх розміри (4.5).

6.5.4 Побудувати ескіз обмотки РО з урахуванням пп. 4.5.3.

6.5.5 Провести розрахунок обраного типу обмотки за дод. Б.

6.6 Зміст звіту

6.6.1 Розрахунок початкових даних обмотки РО.

6.6.2 Опис конструкції обмотки РО.

6.6.3 Ескіз обмотки РО.

6.6.4 Результати розрахунку обмотки РО.

6.6.5 Висновки.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

Базова

1 Тихомиров, П. М. Расчет трансформаторов : учебн. [для студ. вузов] / П. М. Тихомиров. – М. : Энергия, 2015. – 528 с.

ISBN: 978-5-903034-60-4

2 Грабко В. В., Розводюк М. П., Левицький С. М. Експериментальні дослідження електричних машин. Частина IV. Трансформатори. Навчальний посібник. – Вінниця: ВНТУ, 2008. – 219 с.

3 Іванков В.Ф. Методи моделювання трансформаторів та реакторів : Монографія / В.Ф.Іванков, А.В. Басова, І.В. Хімюк. – К. : Ін-т електродинаміки НАН України, 2017. – 490 с.

ISBN 978-966-02-8297-1

4 Аншин, В. Ш. Сборка трансформаторов / В. Ш. Аншин, З. И. Худяков. – М. : «Высшая школа», 1991. – 287 с.

5 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

6 Чорний О. П., Луговой А. В. и др. Моделювання електромеханічних систем Підручник / Чорний О. П., Луговой А. В., Родькін Д. Й., Сісюк Г. Ю., Садовой О. В. – Кременчук, 2001. – 410 с.

7 Моделювання електромеханічних систем. Математичне моделювання систем асинхронного електроприводу : навчальний посібник / О. І. Толочко. – Київ, НТУУ «КПІ», 2016. – 150 с. Іл.

8 Копылов И. П. Математическое моделирование электрических машин : учебн. [для вузов] / И. П. Копылов – [3-е изд.; перераб. и доп.]. – М.: Высшая школа, 2001. – 327 с. : ил. – 8000 экз. – ISBN 5-06-003861-0.

9 Трещев И. И. Электромеханические процессы в машинах переменного тока : учебн. [для вузов] / И. И. Трещев. – Л.: Энергия 1980. – 284 с. : ил.

10 Сипайлов Г. А. Электрические машины (Специальный курс) / Сипайлов Г. А., Кононенко Е. В., Хорьков Г. А. – М. : Высшая школа, 1987. – 176 с.

11 Математичне моделювання в електроенергетиці : підручник / за ред. М. С. Сегеди. – 2-ге вид. – Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2013. – 606 с.

Допоміжна

12 Васютинский, С.В. Вопросы теории и расчета трансформаторов / С. В. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970. – 432 с.

13 Лейтес, Л. В. Электромагнитные расчеты трансформаторов и реакторов / Л. В. Лейтес. – М. : Энергия, 1981 – 391 с.

14 Солодовнікова, Т.П. Простий розподіл витків між котушками силового трансформатора / Солодовнікова, Т.П. // Збірник НПК «Тиждень науки», 2011, ЗНТУ.

15 Звіти у сфері науки і техніки. Структура та правила оформлювання : ДСТУ 3008:2015. — [Чинний від 2016-18-04]. — К. : ДП «УкрНДНЦ» 2016. — IV, 26 с. — (Національний стандарт України).

16 Солодовнікова, Т. П. Методичні вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (освітня програма «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання. / Укл. : Т. П. Солодовнікова, І. М. Коцур. – Запоріжжя: НУЗП, 2022. – 62 с.

17 Шевченко В.В. Розрахунок характеристик трансформаторів, електричних машин та апаратів. Контрольні питання, розрахункові завдання і методичні вказівки з дисципліни «Електричні машини і апарати» для студентів навчально-наукового інституту енергетики, електроніки та електромеханіки / укладачі: Шевченко В.В., Дунев О.О. – Харків: НТУ «ХПІ», 2019. – 32 с.

18 Трансформаторы силовые масляные общего назначения напряжением до 35 кВ включительно. Технические условия : ГОСТ 11920-93. – М. : изд. стандартов, 1993. – 30 с.

19 Трансформаторы силовые масляные общего назначения классов напряжений 110 и 150 кВ. Технические условия : ГОСТ 129565-93. – М. : изд. стандартов, 1993. – 40 с.

20 Кімстач О.Ю. Коротке замкнення між витками обмоток трансформатора / Кімстач О.Ю., Жежело А.О., Агафонов О.В. //

Актуальные научные исследования в современном мире. Журнал – Переяслав-Хмельницкий, 2019. – Вып. 6(50), ч. 6 – С. 29-34.

21 Faraj, M.A., Mousa, S.K., Shuaieb, W.S., Rifai, D., Ali, K., Abdalla, A.N. Power Transformer Modelling Based on Vector Fitting Method // IJESC, March 2020. Vol. 10. Issue No. 3, pp. 24798-24803.

22 Yasid N.F.M., Alawady A.A., Yousof M.F.M., Talib M.A., Kamarudin M.S. The Effect of short circuit fault in three-phase core-typed transformer // International Journal of Power Electronics and Drive System (IJPEDS). Vol. 11, No. 1, March 2020, pp. 409–416. doi: 10.11591/ijpeds.v11.i1.pp409-416

23 Кімстач, О.Ю. Урахування магнітних втрат потужності при моделюванні перехідних процесів у трансформаторах / Кімстач О.Ю., Загурський В.О. // Вісник Херсонського національного технічного університету. – Херсон: ХНТУ, 2018. – Вип. 2 (65) – С. 182-189.

Додаток А

Початкові дані до лабораторних робіт

Таблиця А.1 – Початкові дані двохобмоткових трансформаторів

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Р _х	Р _к	
1	ТМ-25/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.09	0.525	3.2
2	ТМ-25/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.09	0.525	3.2
3	ТМ-30/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.1	0.7	3
4	ТМ-40/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.14	0.77	3
5	ТМ-40/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.14	0.77	3
6	ТМ-50/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.16	0.95	3
7	ТМ-63/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.175	1.025	2.8
8	ТМ-63/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.175	1.025	2.8
9	ТМ-63/20	20±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	5.3	0.29	1.47	4.43
10	ТМ-63/20	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	5.3	0.29	1.47	4.43
11	ТМ-100/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.25	1.935	2.6
12	ТМ-100/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4	0.25	1.935	2.6
13	ТМ-100/20	20±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.465	1.97	4.16
14	ТМ-100/20	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.465	1.97	4.16
15	ТМЖ-100/35	27.5±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.38	2	2.4
16	ТМ-100/35	35±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.465	1.97	4.16
17	ТМ-100/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.465	1.97	4.16
18	ТМ-160/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.42	2.65	1.8
19	ТМ-160/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.42	2.65	1.8
20	ТМ-160/35	20±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.66	2.65	2.4
21	ТМ-160/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.66	2.65	2.4
22	ТМ-160/35	20±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	0.66	2.65	2.4
23	ТМ-160/35	35±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.66	2.65	2.4
24	ТМ-160/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.66	2.65	2.4
25	ТМ-160/35	35±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	0.66	2.65	2.4
26	ТМ-250/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.56	3.8	1.6
27	ТМ-250/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.56	3.8	1.6
28	ТМ-250/35	20±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.96	3.7	2.3
29	ТМ-250/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.96	3.7	2.3
30	ТМ-250/35	20±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	0.96	3.7	2.3

Продовження таблиці А.1

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Р _х	Р _к	
31	ТМЖ-250/35	27.5±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.82	4.2	2
32	ТМ-250/35	35±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	0.96	3.7	2.3
33	ТМ-250/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	0.96	3.7	2.3
34	ТМ-250/35	35±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	0.96	3.7	2.3
35	ТМ-400/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.73	5.2	1.1
36	ТМ-400/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	4.5	0.73	5.2	1.1
37	ТМ-400/35	20±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	1.35	5.5	2.1
38	ТМ-400/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	1.35	5.5	2.1
39	ТМ-400/35	20±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	1.35	5.5	2.1
40	ТМЖ-400/35	27.5±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	1.1	5.9	1.9
41	ТМ-400/35	35±2·2.5%	0.23	Y/Yn-0	6.5	1.35	5.5	2.1
42	ТМ-400/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	1.35	5.5	2.1
43	ТМ-400/35	35±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	1.35	5.5	2.1
44	ТМН-400 /35	35±4·2.5%	11	Y/D-11	6.5	1.5	5.5	1.8
45	ТМ-630/10	6±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	5.5	1.1	7.4	1
46	ТМ-630/10	10±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	5.5	1.1	7.4	1
47	ТМ-630/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2	7.6	2
48	ТМ-630/35	20±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	2	7.6	2
49	ТМ-630/35	20±2·2.5%	11	Y/D-11	6.5	2	7.6	2
50	ТМЖ-630/35	27.5±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2	7.6	2
51	ТМ-630/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2	7.6	2
52	ТМ-630/35	35±2·2.5%	0.69	Y/D-11	6.5	2	7.6	2
53	ТМ-630/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.45	6.3	1.97
54	ТМ-630/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	2.45	6.3	1.97
55	ТМС-1000/10	3.15±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	8	2.2	12.2	1.4
56	ТМС-1000/10	6.3±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	8	2.2	12.2	1.4
57	ТМС-1000/10	6.3±2·2.5%	0.4	D/Yn-11	8	2.2	12.2	1.4
58	ТМС-1000/10	10.5±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	8	2.2	12.2	1.4
59	ТМ-1000/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2.75	12.2	1.5
60	ТМ-1000/35	20±2·2.5%	0.4	D/Yn-11	6.5	2.75	12.2	1.5
61	ТМ-1000/35	20±2·2.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	2.75	12.2	1.5
62	ТМ-1000/35	20±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
63	ТМ-1000/35	20±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
64	ТМ-1000/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2.75	12.2	1.5

Продовження таблиці А.1

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Р _х	Р _к	
65	ТМ-1000/35	35±2·2.5%	3.15	Y/D-11	6.5	2.75	12.2	1.5
66	ТМ-1000/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
67	ТМ-1000/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
68	ТМН-1000/35	20±6·1.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2.75	12.2	1.5
69	ТМН-1000/35	20±6·1.5%	0.4	D/Yn-11	6.5	2.75	12.2	1.5
70	ТМН-1000/35	20±6·1.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	2.75	12.2	1.5
71	ТМН-1000/35	20±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
72	ТМН-1000/35	20±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
73	ТМН-1000/35	35±6·1.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	2.75	12.2	1.5
74	ТМН-1000/35	35±6·1.5%	0.69	Y/Yn-0	6.5	2.75	12.2	1.5
75	ТМН-1000/35	35±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
76	ТМН-1000/35	35±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	2.75	11.6	1.5
77	ТМ-1600/35	20±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
78	ТМ-1600/35	20±2·2.5%	0.4	D/Yn-11	6.5	3.65	18	1.4
79	ТМ-1600/35	20±2·2.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	3.65	18	1.4
80	ТМ-1600/35	20±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
81	ТМ-1600/35	20±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
82	ТМ-1600/35	35±2·2.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
83	ТМ-1600/35	35±2·2.5%	0.69	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
84	ТМ-1600/35	35±2·2.5%	3.15	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
85	ТМ-1600/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	2.75	16.5	1.4
86	ТМ-1600/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	2.75	16.5	1.4
87	ТМН-1600/35	20±6·1.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
88	ТМН-1600/35	20±6·1.5%	0.4	D/Yn-11	6.5	3.65	18	1.4
89	ТМН-1600/35	20±6·1.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	3.65	18	1.4
90	ТМН-1600/35	20±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
91	ТМН-1600/35	20±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
92	ТМН-1600/35	35±6·1.5%	0.4	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
93	ТМН-1600/35	35±6·1.5%	0.69	Y/Yn-0	6.5	3.65	18	1.4
94	ТМН-1600/35	35±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
95	ТМН-1600/35	35±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	3.65	16.5	1.4
96	ТМ-2500/10	10±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	3.85	23.5	1
97	ТМ-2500/10	6±2·2.5%	3.15	Y/D-11	6.5	3.85	23.5	1
98	ТМ-2500/10	10±2·2.5%	3.15	Y/D-11	6.5	3.85	23.5	1

Продовження таблиці А.1

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Рх	Рк	
99	ТМ-2500/10	10±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	3.85	23.5	1
100	ТМ-2500/35	20±2·2.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	5.1	25	1.1
101	ТМ-2500/35	20±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
102	ТМ-2500/35	20±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
103	ТМ-2500/35	35±2·2.5%	0.69	Y/Yn-0	6.5	5.1	25	1.1
104	ТМ-2500/35	35±2·2.5%	3.15	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
105	ТМ-2500/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
106	ТМ-2500/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
107	ТМН-2500/35	20±6·1.5%	0.69	D/Yn-11	6.5	5.1	25	1.1
108	ТМН-2500/35	20±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
109	ТМН-2500/35	20±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
110	ТМН-2500/35	35±6·1.5%	0.69	Y/Yn-0	6.5	5.1	25	1.1
111	ТМН-2500/35	35±6·1.5%	6.3	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
112	ТМН-2500/35	35±6·1.5%	11	Y/D-11	6.5	5.1	23.5	1.1
113	ТМН-2500/110	110±10·1.5%	6.6	Yn/D-11	10.5	6.5	22	1.5
114	ТМН-2500/110	110±10·1.5%	11	Yn/D-11	10.5	6.5	22	1.5
115	ТМН-2500/110	110±10·1.5%	22	Yn/D-11	10.5	6.5	22	1.5
116	ТМ-4000/10	6±2·2.5%	3.15	Y/D-11	7.5	5.2	33.5	0.9
117	ТМ-4000/10	10±2·2.5%	3.15	Y/D-11	7.5	5.2	33.5	0.9
118	ТМ-4000/10	10±2·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	5.2	33.5	0.9
119	ТМ-4000/35	20±2·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
120	ТМ-4000/35	20±2·2.5%	10.5	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
121	ТМ-4000/35	35±2·2.5%	3.15	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
122	ТМ-4000/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
123	ТМ-4000/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
124	ТМН-4000/35	15.75±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
125	ТМН-4000/35	20±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
126	ТМН-4000/35	20±6·1.5%	11	Y/D-11	7.5	6.7	33.5	1
127	ТМН-4000/35	35±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	5.3	33.5	1
128	ТМН-4000/35	35±6·1.5%	11	Y/D-11	7.5	5.3	33.5	1
129	ТМ-6300/35	20±2·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
130	ТМ-6300/35	20±2·2.5%	10.5	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
131	ТМ-6300/35	35±2·2.5%	3.15	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
132	ТМ-6300/35	35±2·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9

Продовження таблиці А.1

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Р _х	Р _к	
133	ТМ-6300/35	35±2·2.5%	10.5	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
134	ТМН-6300/35	13.8±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	8	46.5	0.8
135	ТМН-6300/35	15.75±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	8	46.5	0.8
136	ТМН-6300/35	20±6·1.5%	6.3	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
137	ТМН-6300/35	20±6·1.5%	11	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
138	ТМН-6300/35	35±4·2.5%	6.3	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
139	ТМН-6300/35	35±4·2.5%	11	Y/D-11	7.5	9.4	46.5	0.9
140	ТМ-6300/110	110±2·2.5%	6.6	Yn/D-11	10.5	27.3	55.16	3.72
141	ТМ-6300/110	110±2·2.5%	11	Yn/D-11	10.5	27.3	55.16	3.72
142	ТМ-6300/110	121±2·2.5%	6.3	Yn/D-11	10.5	27.3	55.16	3.72
143	ТМ-6300/110	121±2·2.5%	10.5	Yn/D-11	10.5	27.3	55.16	3.72
144	ТМ-6300/110	121±2·2.5%	15.75	Yn/D-11	10.5	27.3	55.16	3.72
145	ТМН-6300/110	115±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	13	50	1
146	ТМН-6300/110	115±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	13	50	1
147	ТМН-6300/110	115±9·1.78%	22	Yn/D-11	10.5	13	50	1
148	ТМН-6300/110	115±9·1.78%	38.5	Yn/D-11	10.5	13	50	1
149	ТД-10000/35	38.5±2·2.5%	6.3	Yn/D-11	7.5	14.5	65	0.8
150	ТД-10000/35	38.5±2·2.5%	10.5	Yn/D-11	7.5	14.5	65	0.8
151	ТДНС-10000/35	10.5±8·1.5%	3.15	Yn/D-11	14	14.5	85	0.8
152	ТДНС-10000/35	10.5±8·1.5%	6.3	Yn/D-11	14	14.5	85	0.8
153	ТДНС-10000/35	13.8±8·1.5%	3.15	Y/Y-0	14	14.5	85	0.8
154	ТДНС-10000/35	15.75±8·1.5%	3.15	Y/Y-0	14	14.5	85	0.8
155	ТДНС-10000/35	36.75±8·1.5%	3.15	Yn/D-11	14	14.5	85	0.8
156	ТМН-10000/110	115±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	18	60	0.9
157	ТМН-10000/110	115±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	18	60	0.9
158	ТМН-10000/110	115±9·1.78%	22	Yn/D-11	10.5	18	60	0.9
159	ТМН-10000/110	115±9·1.78%	38.5	Yn/D-11	10.5	18	60	0.9
160	ТДН-10000/110	110±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	27	74	0.9
161	ТДН-10000/110	110±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	27	74	0.9
162	ТДН-10000/110	115±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	27	74	0.9
163	ТДН-10000/110	115±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	27	74	0.9
164	ТДН-15000/110	110±9·1.78%	6.3	Yn/D-11	10.5	40	130	0.85
165	ТДН-15000/110	110±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	40	130	0.85
166	ТДН-15000/110	115±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	40	130	0.85

Кінець таблиці А.1

№ варіанта	Тип трансформатора	Номинальна напруга, кВ		Схема та група з'єднань обмоток	Напруга КЗ, %	Втрати, кВт		Струм НХ, %
		ВН	НН			Рх	Рк	
1	2	3	4	5	6	7	8	9
167	ТДН-15000/110	115±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	40	130	0.85
168	ТД-16000/35	38.5±2·2.5%	6.3	Yn/D-11	8	21	90	0.75
169	ТД-16000/35	38.5±2·2.5%	10.5	Yn/D-11	8	21	90	0.75
170	ТДНС-16000/35	10.5±8·1.5%	6.3	D/D-0	10	21	105	0.75
171	ТДНС-16000/35	13.8±8·1.5%	6.3	D/D-0	10	21	105	0.75
172	ТДНС-16000/35	15.75±8·1.5%	6.3	D/D-0	10	21	105	0.75
173	ТДНС-16000/35	18±8·1.5%	6.3	D/D-0	10	21	105	0.75
174	ТДНС-16000/35	36.75±8·1.5%	6.3	Yn/D-11	10	21	105	0.75
175	ТДН-16000/110	115±9·1.78%	6.6	Yn/D-11	10.5	23	85	0.85
176	ТДН-16000/110	115±9·1.78%	11	Yn/D-11	10.5	23	85	0.85
177	ТДН-16000/110	115±9·1.78%	22	Yn/D-11	10.5	23	85	0.85
178	ТДН-16000/110	115±9·1.78%	38.5	Yn/D-11	10.5	23	85	0.85
179	ТДН-16000/150	158±8·1.5%	6.6	Yn/D-11	11	19	88	0.8
180	ТДН-16000/150	158±8·1.5%	11	Yn/D-11	11	19	88	0.8
181	ГДЦ-80000/35	38.5±2·2.5%	6.3	Yn/D-11	9.12	129	359.4	1.5
182	ГДЦ-80000/35	38.5±2·2.5%	10.5	Yn/D-11	9.12	129	359.4	1.5
Початкові дані двохобмоткових трансформаторів з розщепленою обмоткою								
1	2	3	4	5	6	7	8	9
183	ТРДН-25000/35	15.75±8·1.5%	6.3/6.3	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
184	ТРДН-25000/35	15.75±8·1.5%	6.3/10.5	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
185	ТРДН-25000/35	18±8·1.5%	6.3/6.3	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
186	ТРДН-25000/35	18±8·1.5%	6.3/10.5	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
187	ТРДН-25000/35	20±8·1.5%	6.3/6.3	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
188	ТРДН-25000/35	20±8·1.5%	6.3/10.5	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
189	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	6.3/6.3	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
190	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	6.3/6.3	Yn/D-D-11-11	9.5	29	145	0.7
191	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	6.3/10.5	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
192	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	6.3/10.5	Yn/D-D-11-11	9.5	29	145	0.7
193	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	10.5/10.5	D/D-D-0-0	9.5	29	145	0.7
194	ТРДН-25000/35	36.75±8·1.5%	10.5/10.5	Yn/D-D-11-11	9.5	29	145	0.7

195	ТРДН-40000/35	$20 \pm 8 \cdot 1.5\%$	6.3/6.3	D/D-D-0-0	14	39	225	2
196	ТРДН-40000/35	$20 \pm 8 \cdot 1.5\%$	6.3/10.5	D/D-D-0-0	14	39	225	2

Додаток Б

Приклади розрахунку обмоток трансформатора

Б.1 Приклад розрахунку гвинтової обмотки

У відповідності із [1, табл. 5.8] обираємо тип обмотки – обмотка гвинтова з прямокутного дроту. Приймаємо висоту радіального каналу $h_k = 0.004$ м.

Осьовий розмір витка одноходової обмотки

$$h_g = \frac{l}{w + 4} - h_k,$$

$$h_g = \frac{0.616}{21+4} - 0.004 = 0.021 \text{ м.}$$

При $h_g \geq 0.0155$ м (див. табл. Б.1) доцільно використовувати двоходову гвинтову обмотку.

Таблиця Б.1

Матеріал обмотки	Одноходова	Двоходова
Мідь	$h_B \leq 0.0155$	$0.035 \geq h_B \geq 0.0155$
Алюміній	$h_B \leq 0.0185$	$0.045 \geq h_B \geq 0.0185$

Осьовий розмір витка двоходової обмотки

$$h_g = \frac{l}{w + 1} - h_k,$$

$$h_g = \frac{0.616}{21+1} - 0.004 = 0.024 \text{ м.}$$

Орієнтовне значення розміру дроту b_o' з ізоляцією (рис. Б.1)

$$b_o' = (h_g - h_k) / 2,$$

$$b_o' = (0.024 - 0.004) / 2 = 0.01 \text{ м.}$$

Перевіримо отриманий осьовий розмір дроту по припустимій густині теплового потоку $q \leq 1400$ Вт/м² при $k_3 = 1$

$$b_m = \frac{k_3 \cdot q}{1.07 \cdot J^2 \cdot 10^{-8}},$$

$$b_m = \frac{1 \cdot 1400}{1.07 \cdot (3.696 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-8}} = 0.0096 \text{ м.}$$

Враховуючи обмеження, двоходову гвинтову обмотку намотуємо 12 паралельними дротами ($n_{пар} = 12$) марки

ПБ – $12 \times \frac{3.55 \times 9.5}{0.5}$ з перерізом $\Pi_{пр} = 33.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ та товщиною ізоляції на

один бік $\delta = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Розміри голого дроту

$$a = 3.55 \cdot 10^{-3} \text{ м},$$

$$b = 9.5 \cdot 10^{-3} \text{ м}.$$

Розміри дроту в ізоляції

$$a' = a + 2 \cdot \delta,$$

$$b' = b + 2 \cdot \delta,$$

$$a' = 3.55 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3} = 0.004 \text{ м}, \quad b' = 9.5 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0.25 \cdot 10^{-3} = 0.01 \text{ м}.$$

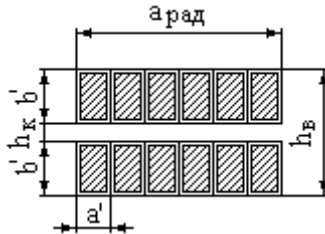


Рисунок Б.1 – Двоходова гвинтова обмотка з рівномірно розподіленою транспозицією з 12 паралельних дротів

Переріз витка обмотки

$$\Pi_{\phi} = n_{пар} \cdot \Pi_{пр},$$

$$\Pi_{\phi} = 12 \cdot 33.2 \cdot 10^{-6} = 398.4 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Густина струму в обмотці по (3.13)

$$J = I_{\phi} / \Pi_{\phi},$$

$$J = 1338.783 / (398.4 \cdot 10^{-6}) = 3.36 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Коефіцієнт усадки обмотки після сушіння та опресування $k=0.95$.

Висота обмотки

$$l = 2b' \cdot (w+1) + k \cdot h_k \cdot (2w+1),$$

$$l = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot (21+1) + 0.95 \cdot 0.004 \cdot (2 \cdot 21+1) = 0.603 \text{ м}.$$

Так як попередньо розраховано висоту обмотки в розмірі 0.616 м, то збільшимо розмір охолоджуючих каналів до $h_k = 0.0043$ м та перерахуємо висоту обмотки

$$l = 2 \cdot 10 \cdot 10^{-3} \cdot (21+1) + 0.95 \cdot 0.0043(2 \cdot 21+1) = 0.616 \text{ м.}$$

Радіальний розмір обмотки (див рис. Б.1)

$$a_{pad} = a' \cdot n_{nap} / 2,$$

$$a_{pad} = 3.55 \cdot 10^{-3} \cdot 12 / 2 = 0.024 \text{ м.}$$

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 4.4, див. примітку) $a_{01} = 0.015$ м.

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки

$$D' = d + 2a_{01},$$

$$D' = 0.28 + 2 \cdot 0.015 = 0.31 \text{ м.}$$

$$D'' = D' + 2a_{pad},$$

$$D'' = 0.31 + 2 \cdot 0.024 = 0.359 \text{ м.}$$

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β при кількості дротів, паралельних лініям магнітної індукції $m = 2w$

$$\beta = \frac{b \cdot m}{l},$$

$$\beta = \frac{0.0095 \cdot 42}{0.616} = 0.648$$

та коефіцієнт додаткових втрат k_d при кількості дротів, перпендикулярних лініям магнітної індукції $n = n_{nap} / 2$

$$k_d = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2,$$

$$k_d = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot 0.648^2 \cdot (3.55 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 6^2 = 1.023.$$

Густина теплового потоку на поверхні обмотки

$$q = \frac{107 \cdot J \cdot I_\phi \cdot w_k \cdot k_d}{k_3 \cdot (b' + a_{pad})} \cdot 10^{-10},$$

$$q = \frac{107 \cdot 3.36 \cdot 10^6 \cdot 1338.783 \cdot 0.5 \cdot 1.023}{0.75 \cdot (0.01 + 0.024)} \cdot 10^{-10} = 956.966 \text{ Вт/м}^2.$$

Маса метала обмотки

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot m \cdot \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_{\epsilon},$$

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0.31 + 0.359}{2} \cdot 21 \cdot 398.4 \cdot 10^{-6} = 234.939 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції із табл. 3.10 - $k_{i3} = 2 \% = 0.02$ в.о. від маси метала обмотки.

Маса дроту з урахуванням ізоляції

$$G_{np} = G_{Cu} \cdot (1 + k_{i3}),$$

$$G_{np} = 234.939 \cdot (1 + 0.02) = 239.637 \text{ кг.}$$

Б.2 Приклад розрахунку котушкової обмотки

У відповідності із [1, табл. 5.8] обираємо тип обмотки – обмотка безперервна котушкова з прямокутного дроту. Приймаємо висоту радіального каналу $h_k = 0.005 \text{ м.}$

Котушкову обмотку намотуємо прямокутним дротом ($n_{nap} = 1$) марки ПБ - $1 \times \frac{4.25 \times 11.2}{0.5}$ з перерізом $\Pi_{np} = 46.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ та товщиною ізоляції на один бік $\delta = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$ Число рейок по колу обмотки – $n_p = 12$.

Розміри голого дроту

$$a = 4.25 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$b = 11.2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розміри дроту в ізоляції

$$a' = a + 2 \cdot \delta,$$

$$b' = b + 2 \cdot \delta,$$

$$a' = (4.25 + 2 \cdot 0.25) \cdot 10^{-3} = 4.75 \cdot 10^{-3} \text{ м,} \quad b' = (11.2 + 2 \cdot 0.25) \cdot 10^{-3} = 11.7 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Переріз витка обмотки

$$\Pi_{\epsilon} = n_{nap} \cdot \Pi_{np},$$

$$\Pi_{\epsilon} = 1 \cdot 46.7 \cdot 10^{-6} = 46.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Густина струму в обмотці

$$J = I_{\phi} / \Pi_{\phi},$$

$$J = 146.629 / (46.7 \cdot 10^{-6}) = 3.14 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Кількість котушок на одному стрижні

$$n_{\text{кот}} = \frac{l}{b' + h_k},$$

$$n_{\text{кот}} = \frac{0.638}{(11.7+5) \cdot 10^{-3}} = 38.188,$$

приймаємо $n_{\text{кот}} = 38$ котушок (число, за технологією намотування, повинно бути парним).

Число витків в котушці орієнтовно

$$w_{\text{кот}} = \frac{w}{n_{\text{кот}}},$$

$$w_{\text{кот}} = \frac{176}{38} = 4.632.$$

Для розрахунку радіального розміру обмотки приймаємо п'ять витків.

Розкладка витків по котушках з дробовим числом витків

Намотаємо обмотку котушками двох типів: А та Б. Обидва типа котушок будуть мати чотири цілих витки та якусь дробову частину витка, та як середнє число витків в котушках $w_{\text{кот}} = 4.632$. Знаменником дробу обирають число рейок по колу обмотки (табл. Б.2). В нашому випадку $n_p = 12$.

Таблиця Б.2 – Число рейок в обмотках трансформаторів

Потужність, кВА	до 100	100 – 630	1000 – 1600	2500 – 10000	16000 – 63000
Число рейок	6	8	8-12	12-16	16-24

Складемо пропорцію, де 632 тисячні – дробова частина $w_{\text{кот}}$

$$\frac{x}{n_p} = \frac{632}{1000}, \quad x = \frac{12 \cdot 632}{1000} = 7.584.$$

З пропорції видно, що чисельником у дробовому числі витків котушок типу А буде число 7+1, а у дробовому числі витків котушок типу Б буде число 7.

Складемо наступну пропорцію, де 584 тисячні – дробова частина x

$$\frac{A}{n_{\text{ком}}} = \frac{584}{1000}, \quad A = \frac{38 \cdot 584}{1000} = 22.192 .$$

Число котушок: типу $A = 22$, типу $B = n_{\text{ком}} - A = 38 - 22 = 16$.

Перевіримо

$$A \cdot 4 \frac{8}{n_p} + B \cdot 4 \frac{7}{n_p} - w = 0$$

$$22 \cdot 4 \frac{8}{12} + 16 \cdot 4 \frac{7}{12} - 176 = 0$$

Перемножимо число котушок на число витків в них (табл. Б.3)

$$A \cdot 4 \frac{8}{n_p} = 22 \cdot 4 \frac{8}{12} = 102.667$$

$$B \cdot 4 \frac{7}{n_p} = 16 \cdot 4 \frac{7}{12} = 73.333$$

Висота обмотки

$$l = b' \cdot n_{\text{ком}} + k \cdot h_k \cdot (n_{\text{ком}} - 1),$$

де k – коефіцієнт усадки обмотки після сушіння та опресування, $k=0.95$,

$$l = (11.7 \cdot 38 + 0.95 \cdot 5 \cdot (38 - 1)) \cdot 10^{-3} = 0.62 \text{ м.}$$

Таблиця Б.3 – Розподіл витків по котушках обмотки

22 котушки типу А по $4 \frac{8}{12}$ витки	73.333 витки
16 котушок типу Б по $4 \frac{7}{12}$ витки	102.667 витки
Всього 38 котушок	176 витків

Так як попередньо розраховано висоту обмотки в розмірі 0.638 м, то збільшимо розмір чотирьох охолоджуючих каналів по два з

кожного торця обмотки до $h_k = 0.0097$ м та перерахуємо висоту обмотки (рис. Б.2)

$$l = (11.7 \cdot 38 + 0.95 \cdot (5 \cdot (38 - 5) + 4 \cdot 9.7)) \cdot 10^{-3} = 0.638 \text{ м.}$$

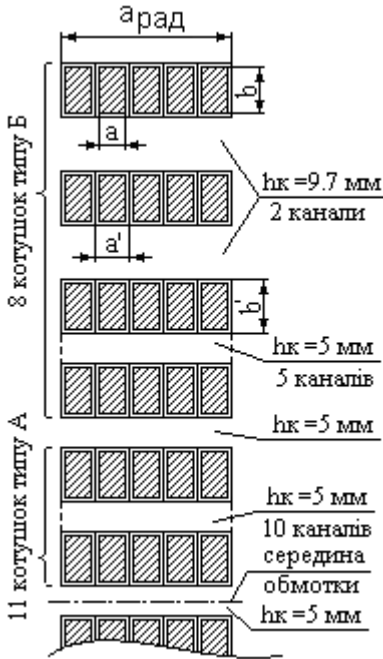


Рисунок Б.2 – Розташування катушок та радіальних каналів

Радіальний розмір обмотки

$$a_{pad} = a' \cdot n_{нар} \cdot w_{кот},$$

$$a_{pad} = 0.00475 \cdot 1 \cdot 5 = 0.024 \text{ м.}$$

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 4.4, див. примітку) $a_{01} = 0.015$ м.

Внутрішній діаметр обмотки

$$D' = d + 2a_{01},$$

$$D' = 0.29 + 2 \cdot 0.015 = 0.32 \text{ м.}$$

Зовнішній діаметр обмотки

$$D'' = D' + 2a_{pad},$$

$$D'' = 0.32 + 2 \cdot 0.024 = 0.367 \text{ м.}$$

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β при кількості дротів, паралельних лініям магнітної індукції $m = n_{кот}$

$$\beta = \frac{b \cdot m}{l},$$

$$\beta = \frac{0.0112 \cdot 38}{0.638} = 0.667$$

та коефіцієнт додаткових втрат k_θ при кількості дротів, перпендикулярних лініям магнітної індукції $n = w_{кот}$

$$k_\theta = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2,$$

$$k_\theta = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot 0.667^2 \cdot (4.25 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 5^2 = 1.034.$$

Густина теплового потоку на поверхні обмотки

$$q = \frac{107 \cdot J \cdot I_{\phi} \cdot w_{\text{ком}} \cdot k_{\delta}}{k_3 \cdot (b' + a_{\text{пад}})} \cdot 10^{-10},$$

$$q = \frac{107 \cdot 3.14 \cdot 10^6 \cdot 146.629 \cdot 5 \cdot 1.034}{0.75 \cdot (0.0117 + 0.024)} \cdot 10^{-10} = 958.319 \text{ Вт/м}^2.$$

Маса метала обмотки

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot m \cdot \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_{\phi},$$

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0.32 + 0.367}{2} \cdot 176 \cdot 46.7 \cdot 10^{-6} = 237.329 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції із табл. 3.10 - $k_{iz} = 1.5 \% = 0.015$ в.о. від маси метала обмотки.

Маса дроту з урахуванням ізоляції

$$G_{np} = G_{Cu} \cdot (1 + k_{iz}),$$

$$G_{np} = 237.329 \cdot (1 + 0.015) = 240.889 \text{ кг.}$$

Б.3 Приклад розрахунку циліндричної багатошарової обмотки

У відповідності із [1, табл. 5.8] обираємо тип обмотки – обмотка багатошарова циліндрична з прямокутного дроту.

Обмотку намотуємо прямокутним проводом ($n_{\text{нар}} = 1$) марки

ПБ – $1 \times \frac{2.5 \times 6.3}{0.5}$ з перерізом $\Pi_{np} = 15.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ та товщиною ізоляції на один бік $\delta = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$

Розміри голого дроту

$$a = 2.5 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$b = 6.3 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розміри дроту в ізоляції

$$a' = a + 2 \cdot \delta,$$

$$b' = b + 2 \cdot \delta,$$

$$a' = (2.5 + 2 \cdot 0.25) \cdot 10^{-3} = 3 \cdot 10^{-3} \text{ м, } b' = (6.3 + 2 \cdot 0.25) \cdot 10^{-3} = 6.8 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Переріз витка обмотки

$$\Pi_{\epsilon} = n_{nap} \cdot \Pi_{np},$$

$$\Pi_{\epsilon} = 1 \cdot 15.2 \cdot 10^{-6} = 15.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Густина струму в обмотці

$$J = I_{\phi} / \Pi_{\epsilon},$$

$$J = 48.485 / (15.2 \cdot 10^{-6}) = 3.19 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Число витків у прошарку

$$w_n = \frac{l}{n_{nap} \cdot b} - 1,$$

$$w_n = \frac{0.638}{1 \cdot 6.3} - 1 = 92.786,$$

приймаємо $w_n = 93$ витки.

Число прошарків в обмотці

$$n_n = \frac{w}{w_n},$$

$$n_n = \frac{531}{93} = 5.71,$$

приймаємо $n_n = 6$ катушок.

Межове значення більшого з двох розмірів дроту, яке припускається при густині теплового потоку $q=1400 \text{ Вт/м}^2$ та при $k_3 = 0.75$

$$b_m = \frac{k_3 \cdot q}{1.07 \cdot n_n \cdot J^2 \cdot 10^{-8}},$$

$$b_m = \frac{0.75 \cdot 1400}{1.07 \cdot (3.139 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-8}} = 0.01 \text{ м}.$$

Обмотка намотується у 6 прошарків: 5 прошарків по 93 витки – 465 витків, шостий прошарок – у 66 витків.

Загальний радіальний розмір металу при намотуванні плазом

$$b_{\mathcal{M}} = a \cdot n_n,$$

$$b_{\mathcal{M}} = 2.5 \cdot 10^{-3} \cdot 6 = 0.015 \text{ м},$$

більш ніж припустимо $b_m > b_m$, тому обмотку поділяємо на два концентри: внутрішній у два прошарки та зовнішній у чотири. Між концентриками виконується осьовий канал охолодження $n_k = 1$ шириною $a_k = 0.007$ м (табл. Б.4).

Напруга двох прошарків обмотки

$$U_{2n} = 2 \cdot w_n \cdot u_\phi,$$

$$U_{2n} = 2 \cdot 93 \cdot 20.716 = 3853.107 \text{ В.}$$

Таблиця Б.4 – Мінімальна ширина вертикальних охолоджуючих каналів в обмотках

Висота обмотки, мм	≤ 300	300÷500	500÷1000	1000÷1500
Мінімальна ширина каналу, мм	4÷5	5÷6	6÷8	8÷10

Міжшарова ізоляція $n_\delta = 6$ прошарків кабельного паперу (табл. Б.5) товщиною $\delta_{ми} = 0.12 \cdot 10^{-3}$ м.

Таблиця Б.5 – Міжшарова ізоляція багатшарових обмоток

Робоча напруга 2-х шарів обмотки, В	Число шарів кабельного паперу на товщину листів, мм	
	Потужність ≤ 630 кВА	Потужність ≥ 1000 кВА
≤ 1000	2×0.12	4×0.12
1001 – 2000	3×0.12	4×0.12
2001 – 3000	4×0.12	4×0.12
3001 – 3500	5×0.12	5×0.12
3501 – 4000	6×0.12	6×0.12
4001 – 4500	7×0.12	7×0.12
4501 – 5000	8×0.12	8×0.12
5001 – 5500	9×0.12	9×0.12

Радіальний розмір обмотки без екрана

$$a_{pad} = a' \cdot n_n + n_\delta \cdot \delta_{ми} \cdot (n_n - 2) + a_k \cdot n_k,$$

$$a_{pad} = (2.5 \cdot 6 + 6 \cdot 0.12 \cdot (6 - 2) + 1 \cdot 6.4) \cdot 10^{-3} = 0.027 \text{ м.}$$

Радіальний розмір обмотки з екраном та його ізоляцією

$$a_{екр} = a_{pad} + \delta_{екр} + 2 \cdot \delta_{ми},$$

де $\delta_{екр}$, $2\delta_{ми}$ – розмір екрану та його ізоляції,

$$\delta_{екр} + 2 \cdot \delta_{ми} = 0.003 \text{ м},$$

$$a_{екр} = 0.027 + 0.003 = 0.03 \text{ м}.$$

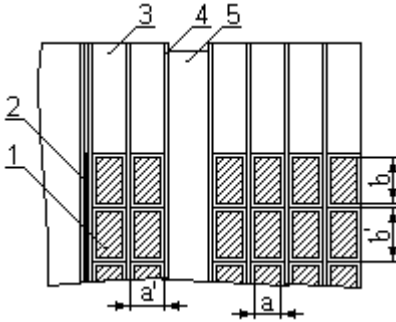
Коефіцієнт усадки обмотки після сушіння та опресування $k=0.95$.

Висота обмотки

$$l = b' \cdot n_{нар} \cdot (w_n + 1),$$

$$l = 0.0068 \cdot 1 \cdot (93 + 1) = 0.639 \text{ м}.$$

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 4.4, див. примітку) $a_{01} = 0.015 \text{ м}$.



- 1 – дріт обмотки;
2 – електростатичний екран;
3 – паперово-бакелітове опорне кільце; 4 – міжшарова ізоляція з кабельного паперу; 5 – рейка із електроізоляційного картону

Рисунок Б.3 – Розріз торцевої частини багатошарової циліндричної обмотки

Внутрішній діаметр обмотки

$$D' = d + 2a_{01},$$

$$D' = 0.29 + 2 \cdot 0.015 = 0.32 \text{ м}.$$

Зовнішній діаметр обмотки

$$D'' = D' + 2a_{екр},$$

$$D'' = 0.32 + 2 \cdot 0.03 = 0.381 \text{ м}.$$

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β при кількості дротів, паралельних лініям магнітної індукції $m = w_n$

$$\beta = \frac{b \cdot m}{l},$$

$$\beta = \frac{0.0063 \cdot 93}{0.639} = 0.917$$

та коефіцієнт додаткових втрат k_δ при кількості дротів, перпендикулярних лініям магнітної індукції $n = n_n$

$$k_{\partial} = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2,$$

$$k_{\partial} = 1 + 0.095 \cdot 10^8 \cdot 0.917^2 \cdot (2.5 \cdot 10^{-3})^4 \cdot 6^2 = 1.011.$$

Густина теплового потоку на поверхні обмотки

$$q = \frac{107 \cdot J^2 \cdot k_{\partial}}{k_3} \cdot 4 \cdot a \frac{b}{b'}, 10^{-10},$$

$$q = \frac{107 \cdot (3.19 \cdot 10^6)^2 \cdot 1.011}{0.75} \cdot 4 \cdot 0.0025 \frac{0.0063}{0.0068} \cdot 10^{-10} = 1359.96 \text{ Вт/м}^2.$$

Маса метала обмотки

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot m \cdot \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_{\phi},$$

$$G_{Cu} = 28 \cdot 10^3 \cdot 3 \cdot \frac{0.32 + 0.381}{2} \cdot 531 \cdot 15.2 \cdot 10^{-6} = 237.468 \text{ кг.}$$

Коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції із табл. 4.3 — $k_{i3} = 3 \% = 0.03$ в.о. від маси метала обмотки.

Маса дроту з урахуванням ізоляції

$$G_{np} = G_{Cu} \cdot (1 + k_{i3}),$$

$$G_{np} = 237.468 \cdot (1 + 0.03) = 244.592 \text{ кг.}$$

Додаток В
Зразок оформлення титульної сторінки

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька політехніка»

Кафедра «Електричні машини»

ЗВІТ
З ЛАБОРАТОРНИХ РОБІТ
з дисципліни **«Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів»**

Виконав

ст. гр. _____

А. В. Шевченко

Перевірів,

старш.викл. _____

Т. П. Солодовнікова