

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКА НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**



МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ
до виконання
розрахунково-графічної роботи
з навчальної дисципліни
«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

за темою

**«РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО ТРИФАЗНОГО
ДВООБМОТКОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2021

Методичні рекомендації до виконання розрахунково-графічної роботи з навчальної дисципліни «Електричні машини» за темою «Розрахунок силового трифазного двообмоткового масляного трансформатора» (для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ; уклад. : М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. – 26 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. О.Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент

Д. В. Тугай, доктор технічних наук, доцент, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 8 від 28.01.2021.

ЗМІСТ

Загальні рекомендації.....	4
1 Вихідні дані до розрахунково-графічної роботи.....	6
2 Розрахунок основних електричних величин.....	5
3 Розрахунок магнітопроводу.....	8
4 Розрахунок обмоток.....	10
5 Розміри активних частин трансформатора.....	20
6 Визначення ваги активних матеріалів.....	21
7 Розрахунок параметрів холостого ходу і короткого замикання.....	22
8 Розрахунок навантажувальних параметрів.....	23
Список використаної літератури.....	23
Додаток А.....	24

ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ

Силовий трансформатор є одним з найважливіших елементів будь-якої електричної мережі. Передача електричної енергії на великі відстані від місця її виробництва до місця споживання вимагає в сучасних мережах не менше п'яти – шестиразової трансформації в підвищувальних і понижуючих трансформаторах. Необхідність розподілу енергії між багатьма дрібними споживачами приводить до значного збільшення числа окремих трансформаторів у порівнянні з числом генераторів. При цьому сумарна потужність трансформаторів у мережі на кожному наступному ступені з більш низькою напругою з метою вільного маневрування енергією вибирається звичайно більшою, ніж потужність попереднього ступеня більш високої напруги. Внаслідок цих причин загальна потужність усіх трансформаторів, встановлених у мережі, в даний час перевищує загальну генераторну потужність приблизно у 8 разів, а в майбутньому може збільшитися.

Через велику поширеність трансформаторів в електроенергетичних установках інженери, які зв'язані з проектуванням і експлуатацією таких установок, повинні бути інформовані в питаннях розрахунку і конструювання силових трансформаторів.

Метою розрахунково-графічної роботи є поглиблене вивчення матеріалу за розділом «Трансформатори», знайомство з елементами сучасної інженерної методики розрахунку силового трансформатора, підготовка студентів до самостійного вирішення завдань при проектуванні, виготовленні та експлуатації трансформаторів.

У процесі виконання і захисту розрахунково-графічної роботи студенти повинні показати:

– знання конструктивних елементів трансформаторів, електротехнічних матеріалів для їхнього виготовлення, методики теоретичного дослідження трансформаторів, основних електромагнітних і конструктивних параметрів, навантажувальних характеристик, послідовності розрахунку силових трансформаторів;

– уміння правильно і обґрунтовано вибирати навантаження, робити розрахунки магнітопроводу, обмоток, ізоляції, визначати основні розміри в подовжньому і поперечному перерізі й одержувати уточнені характеристики розрахунковим шляхом;

– навички застосування навчальної літератури, що рекомендують, і конспектів лекцій для обґрунтування окремих розрахунків і самостійно прийнятих рішень.

Розрахунково-графічну роботу студент виконує за індивідуальним завданням, що видає викладач. Терміни виконання окремих розділів і всієї роботи в цілому зазначені в навчальному графіку. Робота, виконана відповідно до дійсних методичних указівок, оформляється у виді розрахунково-пояснювальної записки на стандартних аркушах білого паперу для письма формату А4 обсягом до 30 сторінок рукописного тексту. Як у чорновому, так і в чистовому варіанті формули за кожним пунктом повинні бути надані як у буквеному вираженні (загальному виді), так і в цифровому, де буквені значення параметрів замінені їх числовими значеннями. Графічна частина роботи являє собою масштабний ескіз подовжнього перерізу активних частин трансформатора (магнітопроводу й обмоток) і виконується на міліметровому папері або ватмані формату А2.

Компонують розрахунково-пояснювальну записку в такому порядку: перший аркуш – титульний, другий аркуш – завдання на виконання розрахунково-графічної роботи, яке повинне бути підписане керівником. Третій аркуш пояснювальної записки – «Зміст», у якому наводиться перелік основних розділів. Далі йде «Вступ», а після нього – змістовна частина. Наприкінці наводяться висновок і список літератури.

1 Вихідні дані до розрахунково-графічної роботи

1.1 Повна номінальна потужність S , кВА.

1.2 Номінальна лінійна напруга обмотки вищої напруги (ВН) U_1 чи U_2 з двома ступенями регулювання ($1,05U$ і $0,95U$).

1.3 Номінальна лінійна напруга обмотки нижчої напруги (НН) U_2 чи U_1 кВ.

1.4 Втрати холостого ходу P_0 , Вт; $P_0 = 2,2 \cdot S$.

1.5 Втрати короткого замикання P_k , Вт; $P_k = 12 \cdot S$.

1.6 Напруга короткого замикання U_k , %; $U_k = 6$ %.

1.7 Струм холостого ходу I_0 , %; $I_0 = 2$ %.

1.8 Схема і група з'єднання обмоток (ліворуч від риски мережна чи первинна обмотка, праворуч – навантажувальна чи вторинна обмотка).

1.9 Навантаження тривале.

1.10 Матеріал магнітопроводу – рулонна холоднокатана електротехнічна сталь марки Э330А товщиною 0,35 мм.

1.11 Матеріал обмоток – мідь.

1.12 Конструктивна схема трансформатора – тристержньовий з концентричними обмотками.

1.13 Число фаз $m = 3$.

1.14 Частота $f = 50$ Гц.

Вихідні дані заносять в таблицю 1.1.

Таблиця 1.1 – Вихідні дані до розрахунково-графічної роботи

S	U_1		U_2	P_0	P_k	U_k	I_0	Схема і група

2 Розрахунок основних електричних величин

2.1 Потужність однієї фази: $S_\phi = \frac{S}{3}$ (кВА).

2.2 Потужність обмоток одного стержня:

$$S' = \frac{S}{3} \text{ (кВА)}.$$

2.3 Номінальний лінійний струм обмотки НН:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_{HH}} \text{ (А)}.$$

2.4 Номінальний лінійний струм обмотки ВН:

$$I = \frac{S}{\sqrt{3}U_{BH}} \text{ (А)}.$$

2.5 Фазний струм обмотки НН:

при з'єднанні Y $I_{\phi} = I$ (А), (за п. 2.3);

при з'єднанні Δ $I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}$ (А), (за п. 2.3).

2.6 Фазний струм обмотки ВН:

– при з'єднанні Y $I_{\phi} = I$ (А), (за п. 2.4);

– при з'єднанні Δ $I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}$ (А), (за п. 2.4).

2.7 Фазна напруга обмотки НН:

– при з'єднанні Y $U_{\phi} = \frac{U_{HH}}{\sqrt{3}}$ (кВ),

– при з'єднанні Δ $U_{\phi} = U_{HH}$ (кВ).

2.8 Фазна напруга обмотки ВН:

– при з'єднанні Y $U_{\phi} = \frac{U_{BH}}{\sqrt{3}}$ (кВ),

– при з'єднанні Δ $U_{\phi} = U_{BH}$ (кВ).

2.9 Випробувальна напруга обмотки ВН

(табл. 2.1): $U_{випр} =$, кВ.

2.10 Випробувальна напруга обмотки НН

(табл. 2.1): $U_{випр} =$, кВ.

Таблиця 2.1 – Розрахунок основних електричних величин

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

У пп. 2.3–2.10 для всіх струмів і напруг повинні бути додані індекси 1 чи 2: для первинної – 1, для вторинної – 2.

3 Розрахунок магнітопроводу

3.1 Визначення діаметра стержня D

Існує кілька способів визначення D. Оскільки величина D, як і багато інших розмірів, неоднозначна (можна спроектувати трансформатор за однаковими вихідними даними з різним D), то найбільш логічний шлях – орієнтування на дані вітчизняних трансформаторних заводів. З урахуванням цього можна скористатися хоч і не самими точними, але досить простими виразами для розрахунку двох варіантів D:

$$\begin{array}{rcl} D = 101 + 5,17\sqrt{S} - 0,026S & > & 6,10 \text{ кВ} \\ D = 106 + 5,24\sqrt{S} - 0,027S & < & 15,20 \text{ кВ} \\ D = 111 + 5,27\sqrt{S} - 0,027S & > & \\ D = 118 + 5,31\sqrt{S} - 0,027S & < & 35 \text{ кВ} \end{array}$$

Відрізок нормалізованої шкали діаметрів стержня за ДСТ включає наступні D: 160, 180, 200, 220, 240, 260, 280, 300, 320, 340, 360, 380, 400, 420, 440 мм.

Нормалізований діаметр, найближчий до двох, обчислених за наведеними формулами, приймається рівним діаметру стержня.

3.2 Вибір числа ступень (пакетів) стержня

Поперечний переріз стержня представляє симетричну східчасту фігуру, вписаний в коло діаметра D. Чим більше ступенів, тим вище заповнення кола сталлю. У силових трансформаторах число пакетів стержня близьке чи більше 10. Для полегшення будемо користатися меншим числом і умовимося, що при $D < 180$ мм воно дорівнює 4, при $D > 250$ мм – 6, а в інших випадках вибираємо 5 пакетів стержня.

3.3. Розрахунок розмірів пакетів стержня

Оптимальними розмірами пакетів C і b є такі, при яких площа східчастої фігури виходить найбільшою. На рисунку А.1 (дод. А) зображений трипакетний стержень, а в таблиці 3.1 наведені оптимальні розміри.

Таблиця 3.1 – Оптимальні розміри

Число пакетів	C_1 / D	C_2 / D	C_3 / D	C_4 / D	C_5 / D	C_6 / D
3	0.905	0.707	0.424			
4	0.935	0.8	0.6	0.335		
5	0.95	0.847	0.707	0.532	0.312	
6	0.96	0.885	0.775	0.632	0.466	0.28

Нормалізовані розміри C (мм), що дають розкрій сталі при мінімальних відходах: 40, 55, 65, 75, 85, 95, 105, 120, 135, 155, 175, 195, 215, 230, 250, 270, 295, 310, 325, 350, 368, 385, 410, 425, 440.

Розміри C , які підраховують за допомогою таблиці 3.1, замінюють найближчими нормалізованими. За нормалізованими розмірами обчислюють розміри b у такий спосіб:

$$b_1 = \sqrt{D^2 - C_1^2} \quad ; \quad 2b_2 = \sqrt{D^2 - C_2^2} - b_1 ;$$

$$2b_3 = \sqrt{D^2 - C_3^2} - (b_1 + 2b_2) \quad ;$$

$$2b_4 = \sqrt{D^2 - C_4^2} - (b_1 + 2b_2 + 2b_3) \quad \text{і т. д.}$$

Результати розрахунків зводять в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 – Результати розрахунків

Номери пакетів	1	2	3	і т.д.
Ширина пластин оптимальна				
Ширина пластин нормалізована				
Товщина пакетів				

3.4 Розрахунок перерізу стержня

Площа стержня в поперечному перерізі дорівнює сумі площ пакетів за винятком ізоляції між пластинами. Як ізоляцію найчастіше застосовують одношарове покриття пластин лаком. Приймається, що при товщині пластин 0,35 мм лак займає 7 % перетину, що враховується коефіцієнтом заповнення $K_3 = 0,93$, тому

$$F_{cm} = K_3 \cdot (b_1 \cdot C_1 + 2b_2 \cdot C_2 + 2b_3 \cdot C_3 + \dots) \quad (\text{мм}^2).$$

3.5 Розрахунок перерізу ярма

Ярмо в поперечному перерізі звичайно заповнюють таким же способом, як і стержень. Тільки крайній (останній) пакет для кращого пресування ярма за шириною C_k роблять рівним передостанньому пакету, за рахунок якого переріз ярма дещо збільшується:

$$F_{я} = F_{cm} + 2b_k \cdot (C_{k-1} - C_k) \cdot K_3 \quad (\text{мм}^2),$$

де індекс k позначає номер останнього пакета.

3.6 Вибір індукцій у стержнях і ярмах

Для заданої марки сталі індукцію в стержнях масляних трансформаторів потужністю $S > 160$ кВА рекомендують вибирати в таких межах:

$$B_{cm} = (1,55 \div 1,65) \text{ (Тл)}.$$

При цьому індукція в ярмі виходить рівною

$$B_{я} = B_{cm} \cdot \frac{F_{cm}}{F_{я}}.$$

4 Розрахунок обмоток

4.1 Число витків W

4.1.1 ЕРС витка E_v .

За формулою повної ЕРС трансформатора

$$E_g = 4,44 f \cdot W \cdot \Phi.$$

Вважаємо, що

$$\Phi = B_{cm} \cdot F_{cm}, \quad f = 50 \text{ Гц}, \quad W = 1,$$

і одержуємо

$$E_{\epsilon} = 222 B_{cm} \cdot F_{cm} \cdot 10^{-6} \quad (\text{В}).$$

4.1.2 Число витків обмотки НН

$$W_{HH} = \frac{U_{\Phi(HH)} \cdot 10^3}{E_{\epsilon}},$$

яке округляємо до найближчого парного числа.

4.1.3 Максимальне число витків обмотки ВН

$$W_{\max(BH)} = W_{HH} \frac{U_{\Phi(BH)}}{U_{\Phi(HH)}} \cdot 1,05,$$

яке округляємо до найближчого парного числа.

4.1.4 Число витків регулювального ступеня обмотки ВН

$$W_{рег} = 0,05 W_{BH}$$

з округленням до найближчого цілого числа.

4.1.5 Число витків обмоток з урахуванням ступенів регулювання заносимо в таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 – Число витків обмоток з урахуванням ступенів регулювання

Обмотка ВН			Обмотка НН
$1,05 \cdot W_{BH}$	$1 \cdot W_{BH}$	$0,95 \cdot W_{BH}$	W_{HH}
за п. 4.1.3	4.1.3 – 4.1.4	4.1.3 – 2 (4.1.4)	за п. 4.1.2

4.1.6 Уточнюємо індукцію в стержні і ярмі через зміну (округляємо) числа витків НН:

$$B_{cm} = \frac{U_{\Phi(HH)} \cdot 10^9}{W_{HH} \cdot 222 \cdot F_{cm}} \quad (\text{Тл});$$

$$B_{я} = B_{cm} \frac{F_{cm}}{F_{я}} \quad (\text{Тл}).$$

4.2 Вибір типу обмоток

Найчастіше зустрічаються типи обмоток масляних трансформаторів із прямокутного мідного проводу. Области їхнього застосування наведені в таблицю 4.2.

Таблиця 4.2 – Сфера застосування обмоток

Тип обмотки	Сторона		Межі застосування				Число паралельних проводів	
	більше	менше	S, кВА	I, А	U, кВ	Переріз витка, мм ²	від	до
Циліндрична	НН ВН	ВН НН	до 80 000	от 15–18 до 1 200	до 35	от 5,73 до 400	1	4–8
Гвинтова одно- і дво-ходова	НН	-	≥160	≥300	до 35	≥ (75+ +100)	4	≥12–16
Безперервна котушкова дискова	ВН	НН	≥160	≥15–18	≥3	≥5,73	1	3–5

Відповідно до таблиці 4.2 тип обмотки не встановлюється однозначно, а межі параметрів є приблизними. Однак частіше обмотками НН є гвинтові, а обмотками ВН з урахуванням зручності виконання відгалужень для регулювання напруги – безперервні, що складаються з котушок (дисків).

4.3 Визначення висоти вікна Н (відстані між ярами)

Згідно з даними практики, зразкову величину Н (мм) вибирають між двома значеннями, обчисленими за двома сусідніми формулами:

$$\begin{aligned}
 H &= (238 + 5,56\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{\text{ВН}}=6 \div 10 \text{ кВ}, \\
 H &= (258 + 5,56\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{\text{ВН}}=20 \text{ кВ}, \\
 H &= (271 + 5,89\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{\text{ВН}}=35 \text{ кВ}. \\
 H &= (267 + 5,33\sqrt{S} + 0,02S) \cdot 1,66
 \end{aligned}$$

4.4 Вибір ізоляції обмоток

Ізоляція у трансформаторах поділяється на два типи: головну і поздовжню. До головної відноситься ізоляція між обмотками і заземленими

частинами – магнітопроводом і баком, між обмотками ВН і НН, а також між обмотками ВН сусідніх фаз. До поздовжньої відноситься ізоляція між частинами однієї обмотки, що містить у собі виткову ізоляцію проводів, ізоляцію між шарами циліндричної обмотки, а також ізоляцію між котушками гвинтових і безперервних обмоток. Величини ізоляційних проміжків вибирають за випробувальними напругами (табл. 2.1) з урахуванням найбільших експлуатаційних перенапруг.

4.4.1 Вибір поздовжньої ізоляції

Прямокутний мідний провід вкритий витковою ізоляцією, товщина якої на дві протилежні сторони дорівнює $0,45 \div 0,5$ мм.

У двошаровій циліндричній обмотці міжшаровою ізоляцією служить масляний канал шириною не менше 4 мм при робочій напрузі не вище 1 кВ і $0,6 \div 0,8$ см, плюс 2 шари картону по 1 мм при робочій напрузі від 1 кВ до 6 кВ.

Ізоляцію між котушками безперервних і гвинтових обмоток оцінюють за формулою

$$h_k = \frac{6U}{n_k} \quad (\text{мм}),$$

де U – робоча напруга обмотки, кВ;

n_k – число котушок.

Оскільки найбільш зручним при регулюванні напруги є $n_k = 42$, то в цьому випадку $h_k = \frac{U}{7}$. Однак обраний розмір h_k повинен бути не менше 4 мм.

Посередині обмотки ВН, де звичайно розташовуються регулювальні котушки, напруга підвищується, канал $h_{кр} = 8 \div 12$ мм при $U_{ВН} = 6$ кВ, $10 \div 18$ мм при 10 кВ і $12 \div 25$ мм при 35 кВ залежно від схем регулювання.

4.4.2 Вибір головної ізоляції

На рисунку А.2 (дод. А) позначені основні ізоляційні проміжки, а також радіальні розміри обмоток. У таблицях 4.3 і 4.4 наведені мінімальні ізоляційні відстані (в мм).

Таблиця 4.3 – Вибір головної ізоляції

S, кВА	25-250	400-630	1000-2500	630-1600	2500-6300	630	630
U _{випр} (ВН)	5	5	5	18, 25,35	18,25,35	45	55
a ₀₁ , мм	4	5	15	15	17,5	20	23

Таблиця 4.4 – Вибір головної ізоляції

S, кВА	100-1000	1000-6300	630	630	100-1000	1000-6300
U _{випр} (ВН)	18,25,35	18,25,35	45	55	85	85
l ₀ , мм	30	50	50	50	75	75
a ₁₂ , мм	9	20	20	20	27	27
a ₂₂ , мм	10	18	18	20	20	30

Обрані розміри головної ізоляції вміщують в таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

l ₀ , см	a ₀₁ , см	a ₁₂ , см	a ₂₂ , см

4.5 Визначення поперечного перерізу ефективного провідника

4.5.1 Щільність струму в обмотках знаходять за формулою

$$\Delta_m = 0,746K_d \cdot \frac{P_k \cdot E_g}{S \cdot d_{12}} \quad (\text{А/мм}^2).$$

тут d₁₂ – середній діаметр каналу a₁₂ у см;
P_k у Вт, S у кВА.

$$d_{12} = D + 2a_{01} + 2a_{HH} + a_{12}.$$

Попередньо приймаємо a_{HH} = 2 см. Додаткові втрати враховують коефіцієнтом K_d, що дорівнює 0,96÷0,92 при S = 160÷630 кВА і 0,91÷0,9 при S = 1000÷10000 кВА. Інші параметри беруть з таблиці 1.1, п. 4.1.1 і таблиці 4.5.

Обчислене Δ_m повинно знаходитися в межах від 2,2÷2,8 до 4÷4,5 А/мм². Значне відхилення свідчить про наявність помилок у розрахунку, або про невдалий вибір деяких параметрів. Якщо самостійна перевірка не дає позитивного результату, необхідна консультація викладача.

4.5.2 Визначення перерізу ефективного провідника

$$S_{n(HH)} = \frac{I_{\Phi(HH)}}{\Delta_m} \quad (\text{мм}^2), \quad S_{n(BH)} = \frac{I_{\Phi(BH)}}{\Delta_m} \quad (\text{мм}^2).$$

У подальших розрахунках беруть участь прямокутні проводи стандартних розмірів, перерізи яких наведені в таблиці 4.6. Ці перерізи трохи менше добутку a на b за рахунок невеликого округлення кутів.

Таблиця 4.6 – Участь прямокутних проводи стандартних розмірів

b (мм)	a (мм)										
	1,35	1,56	1,81	2,1	2,44	2,83	3,28	3,8	4,4	5,1	5,5
4,4	5,73	6,65	7,75	8,76	10,2	12,0	13,9	16,2			
5,1	6,88	7,75	9,02	10,2	11,9	13,9	16,2	18,9	21,5		
5,9	7,76	8,99	10,5	11,9	13,9	16,2	18,9	21,9	25,1	29,2	
6,4		9,77	11,4	12,9	15,1	17,6	20,5	23,8	27,3	31,7	34,3
6,9		10,6	12,3	14,0	16,3	19,0	22,1	25,7	29,5	34,3	37,1
8,0		12,3	14,4	16,3	19,0	22,1	25,7	29,9	34,3	39,9	43,1
9,3		14,3	16,6	19,0	22,3	25,8	30,0	34,8	40,0	46,5	50,3
10,8			19,3	22,2	25,9	30,1	34,9	40,5	46,6	54,2	58,5
12,5				25,8	30,0	34,9	40,5	47,0	54,1	62,9	67,9
14,5					34,9	40,5	47,1	54,6	62,9	74,1	78,9

4.6 Попередня висота обмотки

$$H_0 = H - 2l_0 \quad (\text{мм}),$$

де H – з таблиці 4.3, l_0 – з таблиці 4.5 (перевести в мм).

4.7 Розрахунок обмоток НН і ВН

Розрахунок кожної з цих обмоток виконують в двох варіантах: обмотку НН в одному варіанті розраховують як гвинтову, в іншому – як циліндричну дво- чи одношарову. Обмотку ВН розраховують як безупинну і як циліндричну багат шарову. При користуванні таблиці 4.6 потрібно враховувати, що позначення сторін прямокутника (a – менша сторона, b – велика) умовні. У разі потреби їх можна поміняти місцями. Наприклад, якщо $b_{\text{эл}}$ виходить малим, найближче табличне значення варто шукати не в лівому стовпці, а у верхньому рядку.

4.7.1 Розрахунок циліндричної обмотки

Беремо сторону ефективного проводу в осьовому напрямку:

$$b_{ef} \cong \frac{H_o}{(W / n_c + 1) \cdot 1,03} - 1,5 \quad (\text{мм}),$$

де H_o – розмір обмотки в осьовому напрямку (висота обмотки),

n_c – число шарів;

W – число витків;

1 – додаткове місце для одного витка, тому що обмотка намотується по гвинтовій лінії;

1.03 – коефіцієнт нещільності укладання витків;

1,5 – зразкова товщина віткової ізоляції.

Для обмотки НН $n_c = 2$ (1 чи 4), для обмотки ВН $n_c = 4$ (6). Якщо вони не дадуть позитивного результату, то розрахунок повторюють із значеннями n_c , зазначеними в дужках. Далі визначаємо n_{el} – число елементарних, рівнобіжних в осьовому напрямку проводів, з яких складається елементарний:

$$n'_{el} = \frac{b_{ef}}{14,5} \quad ; \quad n''_{el} = \frac{S_n}{78,9},$$

де b_{ef} (мм); S_n (мм²) 14,5 і 78,9 – максимальні розміри сторони і площі прямокутника в таблиці 4.6.

Більше з n'_{el} і n''_{el} округляємо до більшого цілого числа і приймаємо за n_{el} . Потім обчислюємо

$$b'_{el} = \frac{b_{ef}}{n_{el}} \quad ; \quad S'_{el} = \frac{S_n}{n_{el}}.$$

У лівому стовпці таблиці 4.6 відшукуємо розмір (b), найближчий до b'_{el} , який приймаємо за b_{el} . У тому ж рядку знаходимо переріз, найближчий до S'_{el} , який приймаємо за S_{el} . У верхньому рядку того ж стовпця, де S_{el} , знаходимо іншу сторону a_{el} . У висновку уточнюємо осьовий розмір H_o :

$$H_o = n_{el} \cdot (b_{el} + 0,5) \cdot \left(\frac{W}{n_c} + 1\right) \cdot 1,03 \quad (\text{мм})$$

і обчислюємо радіальний розмір a :

$$a = (a_{el} + 1,5) \cdot n_c + a_k \cdot (n_c - 1) \quad (\text{мм}),$$

де $1,5 \div 0,5$ (віткова ізоляція) + 1 (бандаж шару);

$a_k = 4 \div 8$ – масляний канал між шарами.

4.7.2 Розрахунок гвинтової обмотки

Формула для обчислення $b_{ел}$ у загальному вигляді є такою:

$$b_{ел} = \frac{H_o - b_k \cdot (n_x W + n) \cdot 0,95}{n_x \cdot (W + m)} - 0,5 \text{ (мм)},$$

де n_x – число ходів обмотки,

m, n – цілі числа, що враховують місце для одного витка через намотування по гвинтовій лінії і місце для транспозицій. Якщо $n_x = 1$, то $m = 4, n = 3$.

Якщо $n_x = 2$ чи 4 , то $m = n = 1$;

b_k – ширина масляного каналу ($4 \div 5$ мм) за п. 4.4.1;

0,95 – масляні канали встановлюють за допомогою прокладок з електрокартону, які потім підпресовують;

0,5 – виткова ізоляція;

W – число витків обмотки НН.

Спочатку беруть $n_x = 1$. Якщо $b_{ел} > 14,5$, тоді пробують $n_x = 2$. Якщо все одно $b_{ел} > 14,5$, тільки тоді зупиняються на $n_x = 4$. Якщо ж і при $n_x = 4$ $b_{ел} > 14,5$, то приймають $b_{ел} = 14,5$ і $n_x = 4$.

Потім визначаємо число елементарних провідників одного ходу n :

$$n_{елх} = \frac{S_n}{78,9n_x},$$

яке округляємо до більшого цілого числа, і $S_{ел}$:

$$S_{ел} = \frac{S_n}{n_x \cdot n_{елх}}.$$

Обчислене $b_{ел}$ заміняємо найближчим (b) із крайнього лівого стовпця таблиця 4.6. У цьому ж рядку знаходимо і записуємо $S_{ел}$, найближче до обчисленого, для якого у верхньому рядку вибираємо розмір $a_{ел}$.

На закінчення уточнюємо осьовий розмір обмотки H_o :

$$H_o = n_x \cdot (W + m) \cdot (b_{ел} + 0,5) + (n_x W + n) \cdot b_k \cdot 0,95 \quad \text{(мм)},$$

і обчислюємо радіальний розмір:

$$a = 1,03n_{елх} \cdot (a_{ел} + 0,5) \quad (\text{мм}).$$

4.7.3 Розрахунок безперервної спіральної дискової котушкової обмотки

Обчислюємо розмір (b) елементарного проводу:

$$b_{ел} \approx \frac{H_o}{n_k} - b_k - 0,5 \quad (\text{мм}),$$

де b – ширина каналу між котушками ($4 \div 8$ мм);

n_k – число котушок.

Найкраще $n_k = 42$. Якщо при цьому $b_{ел} > 14,5$ мм, то можна взяти $n_k = 84$. Якщо $n_{ел} < 2$ мм, тоді прийдеться брати $n_k = 21$, хоча при непарному числі котушок не можна домогтися їхнього симетричного розташування уздовж стержня при регулюванні напруги. За знайденим $b_{ел}$ у таблиці 4.6 підбирають переріз, найближчий до $S_{п}$, що є $S_{ел}$, а $n_{ел} = 1$. Якщо ж $S_{п}$ помітно більше табличного, то беруть $n_{ел} = 2$ (можна 3 чи 4 до 5) і обчислюють:

$$S_{ел} = \frac{S_n}{n_{ел}} \quad (\text{мм}^2)$$

і аналогічно заміняють табличним, а потім у таблиці знаходять $a_{ел}$. Після того, як розміри обмотувального проводу встановлені, уточнюють:

$$H_o = (b_{ел} + b_k + 0,5) \cdot n_k \quad (\text{мм}).$$

Розподіл витків на котушках визначають у такий спосіб. Число витків на котушку знаходять у вигляді правильного дробу:

$$\frac{W_{\max}}{n_k} = N + \frac{n}{n_k},$$

де W_{\max} за п. 4.1.3, N – ціле число, n – парне число ($n < n_k$).

Тоді маємо:

$(n_k - n)$ котушок по N витків;

n котушок по $(N + 1)$ витків.

Радіальний розмір обмотки

$$a = (a_{ел} + 0,5) \cdot n_{ел} \cdot (N + 1) \quad (\text{мм}).$$

4.8 Щільність струму в обмотках

$$\Delta_{M(HH)} = \frac{I_{\Phi(HH)}}{S_{ел} \cdot n_{елх} \cdot n_x} \quad \left(\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right), \quad I_{\Phi(HH)} \text{ по п. 2.5,}$$

$S_{ел}, n_{елх}, n_x$ по п. 4.7.2,

$$\Delta_{M(BH)} = \frac{I_{\Phi(BH)}}{S_{ел} \cdot n_{ел}} \quad \left(\frac{\text{А}}{\text{мм}^2} \right), \quad I_{\Phi(BH)} \text{ по п. 2.6,}$$

$S_{ел}, n_{ел}$ по п. 4.7.3.

Тут $S_{ел}$ повинні бути згідно з табл. 4.6, а $n_{ел}$ цілі числа.

4.9 Перевірка й уточнення головного каналу розсіювання
(відстані між обмотками НН і ВН).

4.9.1 Активна складова напруги короткого замикання

$$U_a \% = \frac{P_k}{10S} \% ,$$

де P_k, S у таблиці 1.1.

4.9.2 Реактивна складова напруги короткого замикання

$$U_p \% = \sqrt{U_k^2 \% - U_a^2 \%} \quad (U_k \% \text{ у табл. 1.1}).$$

4.9.3 Приймаємо, що на головний канал припадає 95% напруги розсіювання:

$$U_p' \% = 0,95 U_p \% \quad (U_p \% \text{ по п. 4.9.2}).$$

4.9.4 Середній діаметр головного каналу розсіювання

$$d'_{12} = D + 2a_{01} + 2a_{HH} + a_{12} \quad (\text{см}),$$

де a_{01}, a_{12} у таблиці 4.5, D за п. 3.1, a_{HH} по пп. 4.7.2.

4.9.5 Приведений канал розсіювання:

$$\Delta = a_{12} + \frac{a_{HH} + a_{BH}}{3} \quad (\text{см}),$$

де a_{12} в таблиці 4.5, a_{HH} і a_{BH} за пп. 4.7.2 і 4.7.3.

4.9.6 Коефіцієнт Роговського K_P :

$$K_P = 1 - \frac{a_{12} + a_{HH} + a_{BH}}{\pi \cdot H_0},$$

де всі розміри подано в однакових одиницях і H_0 – більше по пп. 4.7.2 і 4.7.3.

4.9.7 Розрахункова напруга розсіювання U''_p %:

$$U''_p \% = \frac{I_{\Phi(HH)} \cdot W_{HH} \cdot d'_{12} \cdot \Delta \cdot K_P}{806 H_0 \cdot E_g},$$

де всі розміри подано в однакових одиницях і за формулою п. 4.1.1.

4.9.8 Збільшення каналу розсіювання для вирівнювання U'_p і U''_p :

$$\Delta a_{12} = \left(\frac{U'_p}{U''_p} - 1 \right) \cdot \frac{d'_{12} \cdot \Delta}{d'_{12} + \Delta} \quad (\text{см}),$$

де d'_{12} і Δ в см.

4.9.9 Уточнюємо ширину головного каналу:

4.9.10

$$a_{12} = a'_{12} + \Delta a_{12} \quad (\text{см}).$$

5 Розміри активних частин трансформатора

5.1 Діаметр стержня D (за п. 3.1)

5.2 Внутрішній діаметр обмотки НН

$$d_H = D + 2a_{01}.$$

5.3 Зовнішній діаметр обмотки НН

$$D_H = d_H + 2a_{HH}.$$

5.4 Внутрішній діаметр обмотки ВН

$$d_B = D_H + 2a_{12}.$$

5.5 Зовнішній діаметр обмотки ВН

$$D_B = d_B + 2a_{BH}.$$

5.6 Відстань між осями стержнів

$$C = D_B + a_{22}$$

5.7 Активна ширина трансформатора

$$A = 3D_B + 2a_{22}.$$

5.8 Висота вікна трансформатора

$$H = H_o + 2l_o .$$

5.9 Відстань між осями верхнього і нижнього ярма

$$H_{оя} = H + C_1 ,$$

де C_1 – з таблиці 3.2.

5.10 Активна висота трансформатора

$$H_{я} = H + 2C_1 .$$

5.11 Вибираємо масштаб і будуємо ескіз поздовжнього і поперечного перерізу трансформатора, на якому проставляємо основні розміри (дод. А рис. А.3).

6 Визначення ваги активних матеріалів

6.1 Вага стержнів магнітопроводу:

$$G_{см} = \gamma_c \cdot \{F_{см} \cdot (3H + 2C_1) + 2[b_2 \cdot C_2 \cdot (C_1 - C_2) + b_3 \cdot C_3 \cdot (C_1 - C_3) + b_4 \cdot c_4 \cdot (C_1 - C_4) + \dots]\} \text{ (кг) ,}$$

де $\gamma_c = 7,65 \cdot 10^{-6}$ кг/мм³, $F_{см}$ у мм², всі розміри в мм, $F_{см}$ за п. 3.4., b і c у таблиці 3.2, H за п. 5.8.

6.2 Вага ярма:

$$G_{я} = \gamma_c \cdot F_{я} \cdot 4C \text{ (кг) ,}$$

де $F_{я}$ за п. 3.5, C за п. 5.6.

6.3 Вага кутів стержня і ярма:

$$G_{смy} = \gamma_c \cdot F_{я} \cdot 2C_1 \text{ (кг) ; } G_{яy} = \gamma_c \cdot F_{я} \cdot 2C_1 \text{ (кг) .}$$

6.4 Вага міді обмотки НН:

$$G_{HH} = 3\gamma_m \cdot \pi \cdot \frac{d_H + D_H}{2} \cdot S_{ел} \cdot n_{елx} \cdot n_x \cdot W_{HH} \text{ (кг) ,}$$

де $\gamma_m = 8,4 \cdot 10^{-6}$; d_H, D_H по п. 5.2 і 5.3, $S_{ел}, n_{ел}$ по п. 4.7.2.

6.5 Вага міді обмотки ВН:

$$G_{BH} = 3\gamma_m \cdot \pi \cdot \frac{d_B + D_B}{2} \cdot S_{ел} \cdot n_{ел} \cdot W_{BH} \text{ (кг) ,}$$

де D_B і d_B за п. 5.5 і 5.4, $S_{ел}$ і $n_{ел}$ за п. 4.7.3.

7 Розрахунок параметрів холостого ходу і короткого замикання

Для розрахунку параметрів холостого ходу необхідні величини питомих втрат у сталі P Вт/кг, питомої потужності, що намагнічує, q ВА/кг сталі і зазорів у шихтованих магнітних системах. Для сталі Э330А і $f = 50$ Гц вони дані в таблиці 7.1 залежно від індукції B Тл (для зазорів q_3 ВА/см²).

Таблиця 7.1 – Розрахунки параметрів холостого ходу

B	1,48	1,5	1,52	1,54	1,56	1,58	1,6	1,62	1,64	1,66	1,68	1,7	1,72
P	1,07	1,1	1,14	1,18	1,22	1,27	1,32	1,38	1,43	1,49	1,54	1,6	1,67
q	1,87	1,97	2,1	2,23	2,4	2,6	2,8	3,12	3,44	4	4,8	5,6	7,76
q ₃	1,79	1,95	2,15	2,35	2,59	2,87	3,15	3,51	3,78	4,31	4,83	5,35	5,93

7.1 Втрати холостого ходу

$$P_0 = 1,1[P_{cm} \cdot (G_{cm} + 0,5G_{cmy}) + P_y \cdot (G_y + 0,5G_{yy})] \quad (\text{Вт}).$$

7.2 Струм, що намагнічує, I_{op} :

$$I_{op} = \frac{q_{cm} \cdot G_{cm} + q_y \cdot G_y + 3q_{3cm} \cdot F_{cm} + 4q_{3y} \cdot F_y}{105} (\%),$$

де p, q з таблиці 7.1, F_{cm}, F_y – з 3.4 і 3.5 у (см²).

7.3 Активна складова струму холостого ходу

$$I_{oa} = \frac{P_0}{10S} (\%).$$

7.4 Струм холостого ходу

$$I_o = \sqrt{I_{op}^2 + I_{oa}^2} (\%).$$

7.5 Втрати і напруги короткого замикання

7.5.1 Коефіцієнт додаткових втрат в одношаровій обмотці

$$K_\phi \approx 1 + 0,08a_{el}^4 \cdot \left(\frac{b_{el}}{b_{el} + 0,5} \cdot K_p \right)^2,$$

де K_p – п. 4.9.6. перерахований відповідно до 4.9.9,

a_{el} – у см, b_{el} – у мм за пп. 4.7.2 і 4.7.3. Аналогічно виконують розрахунок для $K_{\phi HH}$ і $K_{\phi BH}$.

7.5.2 Втрати в обмотках НН і ВН:

$$P_{обм} = 2,4(\Delta_{m(HH)}^2 \cdot G_{HH} \cdot K_{\phi HH} + \Delta_{m(BH)}^2 \cdot G_{BH} \cdot K_{\phi BH}) \quad (\text{Вт}),$$

де Δ_m по п. 4.8, G за пп. 6.4 і 6.5, K_ϕ за п. 7.5.1.

7.5.3 Втрати у відводах обмотки НН:

$$P_{\text{відв}} = 0,05 I_{\text{НН}} \cdot \sqrt[4]{S} (Вт) \quad (S \text{ кВА}, I_{\text{НН}} \text{ по п. 2.3}).$$

7.5.4 Втрати в стінках бака

$$P_{\text{б}} = 0,007 S^{1.5} \quad (Вт).$$

7.5.5 Втрати короткого замикання

$$P_{\text{к}} = P_{\text{обм}} + P_{\text{відв}} + P_{\text{б}} \quad (Вт).$$

7.5.6 Напряга, яка обумовлена потоками розсіювання.

Повторити розрахунок за п. з 4.9.4–4.9.7 включно, однак взяти уточненим за п. 4.9.9. Потім

$$U_p \% = U_p^{\text{н}} \% \cdot 1,05.$$

7.5.7 Напряга короткого замикання

$$U_{\text{к}} = \sqrt{U_a^2 + U_p^2} \quad , \quad \%,$$

де U_a – за п. 4.9.1.

8 Розрахунок навантажувальних параметрів

8.1 Зміна вторинної напруги:

$$\Delta U = U_a \cdot \cos \varphi_2 + U_p \cdot \sin \varphi_2 + \frac{(U_p \cdot \cos \varphi_2 - U_a \cdot \sin \varphi_2)^2}{200} \quad (\%) \quad (U_a, U_p \%).$$

Розрахувати ΔU для $\cos \varphi_2 = 0,6$, $\cos \varphi_2 = 0,8$ і $\cos \varphi_2 = 1$.

8.2 Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \left(1 - \frac{P_0 + P_{\text{к}}}{S \cdot \cos \varphi_2 \cdot 10^3 + P_0 + P_{\text{к}}} \right) \cdot 100 \quad (\%) \quad ,$$

де $P_0, P_{\text{к}}$ у Вт, S у кВА.

Розрахувати η для $\cos \varphi_2 = 0,6$, $\cos \varphi_2 = 0,8$, $\cos \varphi_2 = 1$.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Тихомиров П. М. Расчет трансформаторов / П. М. Тихомиров. – М. : Энергия, 1998. – 544 с.
2. Дымков А. М. Расчет и конструирование трансформаторов / А. М. Дымков. – М. : Высшая Школа, 1971. – 264 с.
3. Петров Г. Н. Электрические машины. Часть 1. Введение. Трансформаторы / Г. Н. Петров. – М. : Энергия, 1974. – 240 с.

ДОДАТОК А

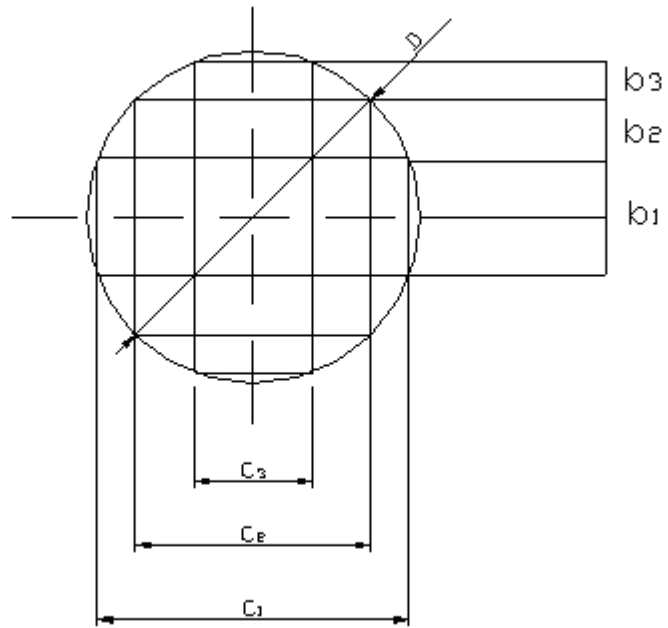


Рисунок А.1

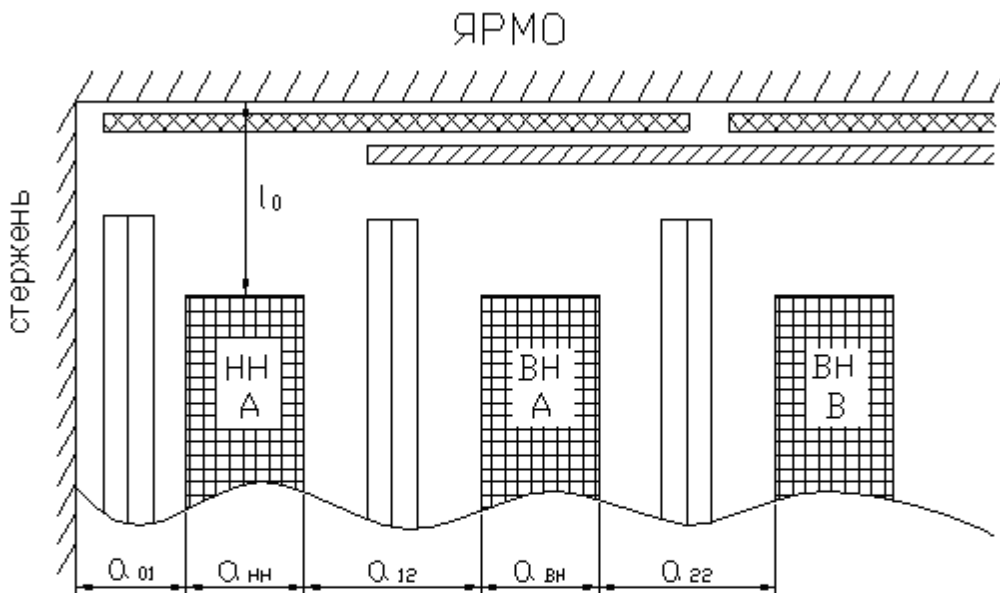


Рисунок А.2

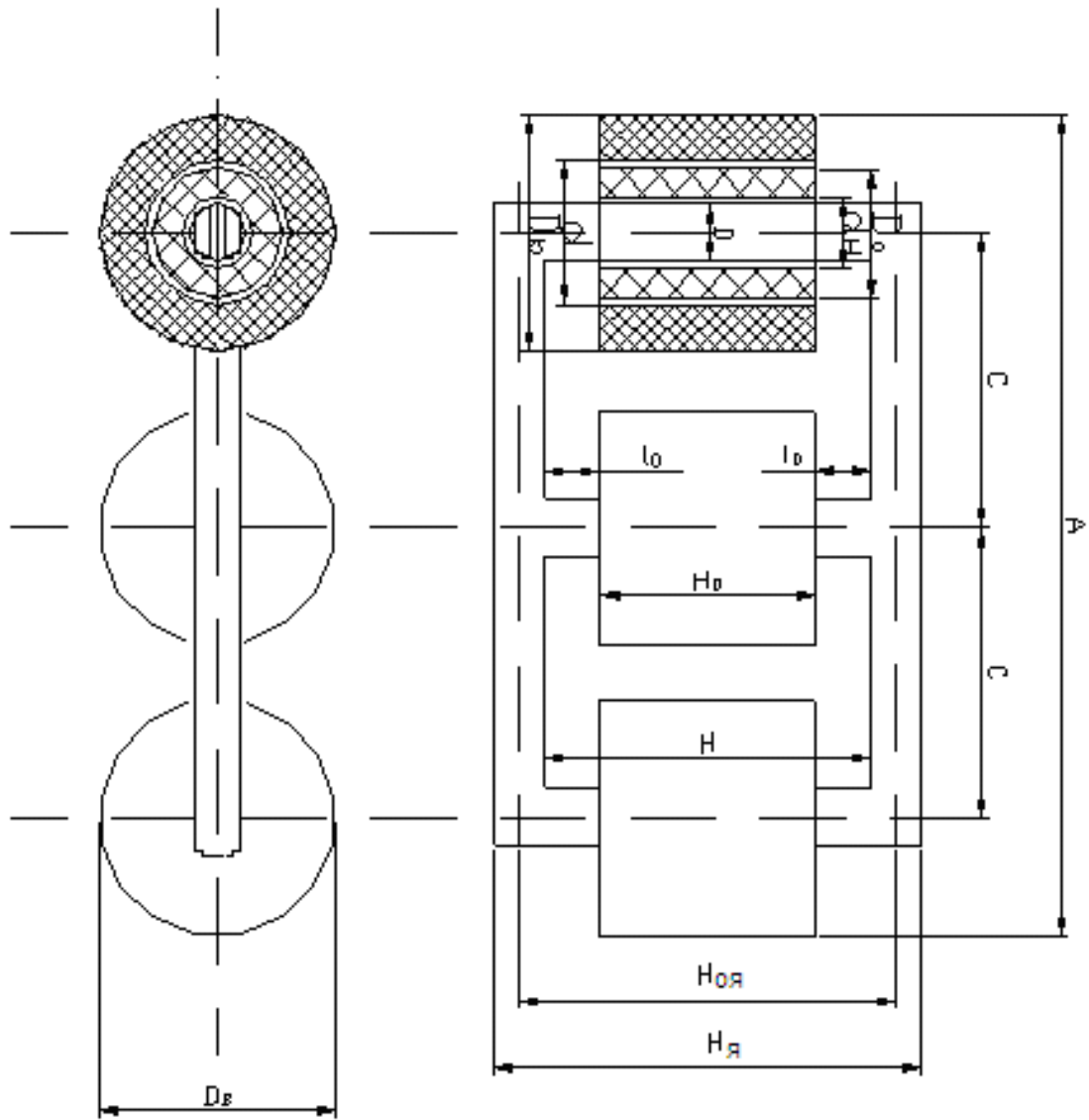


Рисунок А.3

Виробничо-практичне видання

Методичні рекомендації

до виконання
розрахунково-графічної роботи

з навчальної дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

за темою

**«РОЗРАХУНОК СИЛОВОГО ТРИФАЗНОГО
ДВООБМОТКОВОГО МАСЛЯНОГО ТРАНСФОРМАТОРА»**

*(для студентів усіх форм навчання за спеціальністю
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладачі: **ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

Відповідальний за випуск *М. Л. Глєбова*

Технічний редактор О. В. Михайленко

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2021, поз. 268М.

Підп. до друку 10.03.2021. Формат 60 × 84/16.

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,5.

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: rektorat@kname.edu.ua

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.