

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання курсової роботи  
з дисципліни

**«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»**

за темою

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

*(для студентів усіх форм навчання напрямку підготовки  
6.050702 – Електромеханіка)*

**Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2016**

Методичні вказівки до виконання курсової роботи з дисципліни «Електричні машини» за темою «Розрахунок силового трифазного двообмоткового масляного трансформатора» (для студентів усіх форм навчання напряму 6.050702 – Електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад. : М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016 – 24 с.

Укладачі: канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,  
канд. техн. наук, доц. О. В. Дорохов,  
д-р техн. наук, проф. В. Б. Фінкельштейн,  
канд. техн. наук доц. Я. Б. Форкун

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,  
протокол № 11 від 26 .04.2016 р.

## ЗМІСТ

Загальні вказівки.....	4
1 Вихідні дані до курсової роботи.....	6
2 Розрахунок основних електричних величин.....	6
3 Розрахунок магнітопроводу.....	7
4 Розрахунок обмоток .....	10
5 Розміри активних частин трансформатора.....	18
6 Визначення ваги активних матеріалів.....	19
7 Розрахунок параметрів холостого ходу і короткого замикання.....	19
8 Розрахунок навантажувальних параметрів.....	21
Додаток 1.....	22
Додаток 2.....	23
Список джерел.....	24

## ЗАГАЛЬНІ ВКАЗІВКИ

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 курсової 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 курсової 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.

Курсову роботу студент виконує за індивідуальним завданням, що видає викладач. Терміни виконання окремих розділів і всієї роботи в цілому зазначені в навчальному графіку. Робота, яка виконана відповідно до дійсних методичних указівок, оформляється у вигляді 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 вигляді), так і в цифровому, де буквені значення параметрів замінені їх числовими значеннями. Графічна частина роботи являє собою масштабний ескіз поздовжнього 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 курсової роботи, яке повинне бути підписане керівником. Третій аркуш пояснювальної записки – «Зміст», у якому наводиться перелік основних розділів. Далі йде «Вступ», а після нього – змістова частина. Наприкінці наводяться висновок і список джерел.

## 1 Вихідні дані до курсової 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 обмотках, праворуч – навантажувальна чи вторинна обмотках);
- 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

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  $\Delta$   $I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}$  (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  $\Delta$   $I_{\phi} = \frac{I}{\sqrt{3}}$  (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  $\Delta$   $U_{\phi} = U_{HH}$  (кВ).

2.8 Фазна напруга обмотки ВН:

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

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

2.9 Випробувальна напруга обмотки ВН

(табл. 2.1):  $U_{випр} =$  , кВ.

Випробувальна напруга обмотки НН

(табл. 2.1):  $U_{випр} =$  , кВ.

Таблиця 2.1

Стаття І. 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 п. 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:

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

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 десяти. 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 1 (Додаток 1) зображений трипакетний стержень, а в таблиці 3.1 наведені оптимальні розміри.

Таблиця 3.1

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

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 0,35мм 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

$$B_y = B_{cm} \cdot \frac{F_{cm}}{F_y}.$$

### 4 Розрахунок обмоток

#### 4.1 Число витків $W$

##### 4.1.1 ЕРС витка $E_B$ .

За формулою повної ЕРС трансформатора

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

Вважаємо, що

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

і одержуємо

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

##### 4.1.2 Число витків обмотки НН

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

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 регульовального 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

Обмотка ВН			Обмотка НН $W_{HH}$
$1,05 \cdot W_{BH}$	$1 \cdot W_{BH}$	$0,95 \cdot W_{BH}$	
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 таблиці 4.2.

Таблиця 4.2

Тип обмотки	Сторона		Межі застосування				Число паралельних проводів	
	більше	менше	S, кВА	I, А	U, кВ	Переріз витка, мм <sup>2</sup>	від	до
Циліндрична	НН ВН	ВН НН	до 80000	от 15-18 до 1200	до35	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 обмотки НН є гвинтові, а обмотки ВН з урахуванням зручності виконання відгалужень для регулювання напруги – безперервні, що складаються з котушок (дисків).

## 4.3 Визначення висоти вікна Н (відстані між ярмами)

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

$$H = (238 + 5,56\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{ВН} = 6 \div 10 \text{ кВ},$$

$$H = (258 + 5,56\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{ВН} = 20 \text{ кВ},$$

$$H = (271 + 5,89\sqrt{S} + 0,01S) \cdot 1,66 > U_{ВН} = 35 \text{ кВ}.$$

$$H = (267 + 5,33\sqrt{S} + 0,02S) \cdot 1,66$$

#### 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  $0,45 \div 05$  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 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 2 (Додаток 1) 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

S, кВА	25-250	400-630	1000-2500	630-1600	2500-6300	630	630
$U_{\text{випр}}$ (НН)	5	5	5	18, 25,35	18,25,35	45	55
$a_{0I}$ , мм	4	5	15	15	17,5	20	23

Таблиця 4.4

S, кВА	100-1000	1000-6300	630	630	100-1000	1000-6300
U <sub>випр</sub> (ВН)	18,25,35	18,25,35	45	55	85	85
L <sub>0</sub> , мм	30	50	50	50	75	75
a <sub>12</sub> , мм	9	20	20	20	27	27
a <sub>22</sub> , мм	10	18	18	20	20	30

Обрані розміри головної ізоляції заносять до таблиці 4.5.

Таблиця 4.5

l <sub>0</sub> , см	a <sub>01</sub> , см	a <sub>12</sub> , см	a <sub>22</sub> , см

## 4.5 Визначення поперечного переріза ефективного провідника

4.5.1 Щільність струму в обмотках знаходять за формулою:

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

Тут d<sub>12</sub> – середній діаметр каналу a<sub>12</sub> у см, P<sub>k</sub> у Вт, S у кВА.

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

Попередньо приймаємо a<sub>HH</sub>=2 см. Додаткові втрати враховують коефіцієнтом K<sub>d</sub>, 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<sub>m</sub> повинно знаходитися в межах від 2,2÷2,8 до 4÷4,5 А/мм<sup>2</sup>. 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

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 пункту 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 багатошарову. При користуванні таблицею 4.6 слід 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:

$$b_{\text{эф}} \cong \frac{H_0}{(W / n_c + 1) \cdot 1,03} - 1,5 \quad (\text{мм}),$$

де  $H_0$  – 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 виткової 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  $n_{ел}$  – число елементарних, рівнобіжних в осьовому напрямку проводів, з яких складається елементарний провід:

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

де  $b_{еф}$  (мм);  $S_n$  (мм<sup>2</sup>) 14,5 і 78,9 – максимальні розміри сторони і площі прямокутника в таблиці 4.6.

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

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

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

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

і обчислюємо радіальний розмір  $a$ :

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

де  $1,5 \div 0,5$  (виткова 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:

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

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 таблиці 4.6. У цьому ж рядку знаходимо і записуємо  $S_{ел}$ , найближче до обчисленого, для якого у верхньому рядку вибираємо розмір  $a_{ел}$ .

Наприкінці 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÷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  $S_n$ , що є  $S_{ел}$ , а  $n_{ел}=1$ . Якщо ж  $S_n$  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

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

#### 4.8 Щільність струму в обмотках

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

$S_{el}, n_{elx}, n_x$  по п. 4.7.2,

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

$S_{el}, n_{el}$  по п. 4.7.3.

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

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

4.9.1 Активна складова напруги короткого замикання буде

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

де  $P_k, S$  у таблиці 1.1

4.9.2 Реактивна складова напруги короткого замикання

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

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

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

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,  $D$  по п. 3.1,  $a_{HH}$  за п.4.7.2.

4.9.5 Приведений канал розсіювання:

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

де  $a_{12}$  у таблиці 4.5,  $a_{HH}$  і  $a_{BH}$  за п. 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 за п. 4.7.2 і 4.7.3.

4.9.7 Розрахункова напруга розсіювання  $U''_p\%$ :

$$U''_p\% = \frac{I_{\Phi(HH)} \cdot W_{HH} \cdot d_{12} \cdot \Delta \cdot K_P}{806 H_O \cdot E_\epsilon},$$

де всі розміри надано 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  $\Delta$  в см.

4.9.9 Уточнюємо ширину головного каналу:

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

## 5 Розміри активних частин трансформатора

5.1 Діаметр стержня  $D$  (по 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 (додаток 1 рис. 3).

## 6 Визначення ваги активних матеріалів

6.1 Вага стержнів магнітопроводу:

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

де  $\gamma_c = 7,65 \cdot 10^{-6}$  кг/мм<sup>3</sup>,  $F_{cm}$  у мм<sup>2</sup>, всі розміри в мм,  $F_{cm}$  по п. 3.4.,  $b$  і  $c$  у таблиці 3.2,  $H$  за п. 5.8.

6.2 Вага ярма:

$$G_y = \gamma_c \cdot F_y \cdot 4C \text{ (кг) ,}$$

де  $F_y$  за п. 3.5,  $C$  по п. 5.6.

6.3 Вага кутів стержня і ярма:

$$G_{cmu} = \gamma_c \cdot F_y \cdot 2C_1 \text{ (кг) ; } G_{яу} = \gamma_c \cdot F_y \cdot 2C_1 \text{ (кг) .}$$

6.4 Вага міді обмотки НН:

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

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

6.5 Вага міді обмотки ВН:

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

де  $D_B$  і  $d_B$  по п. 5.5 і 5.4,  $S_{el}$  і  $n_{el}$  по 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 надані у таблиці 7.1 залежно від індукції  $B$  Тл (для зазорів  $q_3$  ВА/см<sup>2</sup>).

Таблиця 7.1

В	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
Р	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 <sub>3</sub>	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

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

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 ( $\text{см}^2$ ).

## 7.3 Активна складова струму холостого ходу

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

## 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 п. 4.7.2 і 4.7.3. Аналогічно виконують розрахунок для  $K_{\phi HH}$  і  $K_{\phi BH}$ .

7.5.2 Втрати в обмотках  $HH$  і  $BH$ :

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

де  $\Delta_m$  за п. 4.8,  $G$  за п. 6.4 і 6.5,  $K_\phi$  за п. 7.5.1.

7.5.3 Втрати у відводах обмотки  $HH$ :

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

## 7.5.4 Втрати в стінках бака

$$P_\delta = 0,007S^{1,5} \quad (\text{Вт}).$$

### 7.5.5 Втрати короткого замикання

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

### 7.5.6 Напруга, яка обумовлена потоками розсіювання.

Повторити розрахунок за п. з 4.9.4 - 4.9.7 включно, однак узяти уточненим за п. 4.9.9. Потім

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

### 7.5.7 Напруга короткого замикання

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

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  $\Delta U$  для  $\cos \varphi_2 = 0,6$ ,  $\cos \varphi_2 = 0,8$  і  $\cos \varphi_2 = 1$ .

### 8.2 Коефіцієнт корисної дії

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

де  $P_x, P_{\kappa}$  у Вт,  $S$  у кВА.

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

Додаток 1

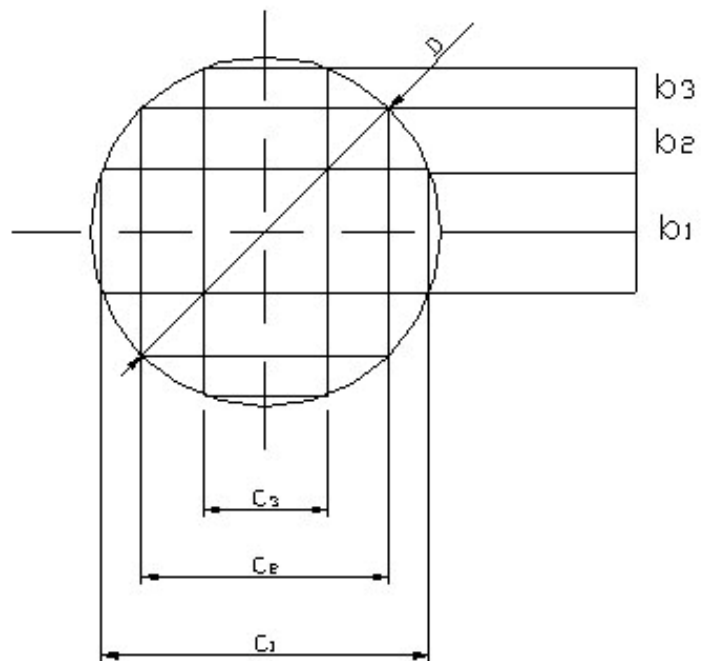


Рисунок 1

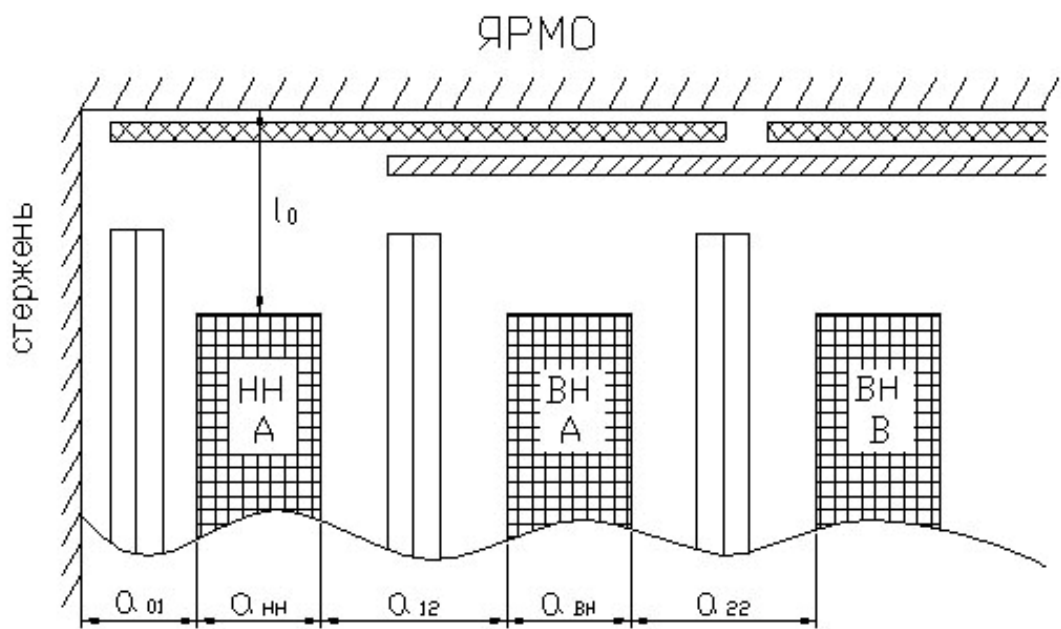


Рисунок 2



## СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. П. М. Тихомиров. Расчет трансформаторов. – Москва: Энергия, 1998. 544 с.
2. А. М. Дымков. Расчет и конструирование трансформаторов. – Москва : Высшая Школа, 1971. – 264 с.
3. Г. Н. Петров. Электрические машины. Часть 1. Введение. Трансформаторы. – Москва: Энергия, 1974, – 240 с.
4. Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 1 Трансформатори. Асинхронні Машини (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 – «Електротехніка та електротехнології», 6.050702 – «Електромеханіка») / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова; уклад.: М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун. – Харків: ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2015 – 97 с.



*Навчальне видання*

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання курсової роботи  
з дисципліни

**«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»**

за темою

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

*(для студентів усіх форм навчання напряму підготовки  
6.050702 – Електромеханіка)*

Укладачі: **ГЛЄБОВА** Марина Леонідівна,  
**ДОРОХОВ** Олександр Володимирович,  
**ФІНКЕЛЬШТЕЙН** Володимир Борисович,  
**ФОРКУН** Яна Борисівна

Відповідальний за випуск *О. В. Дорохов*

*За авторською редакцією*

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2016, поз. 250М

---

Підп. до друку 27.04.2016  
Друк на ризографі.  
Зам. №

Формат 60 x 84/16  
Ум. друк. арк. 1,4  
Тираж 50 пр.

Видавець і виготовлювач:  
Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Революції, 12, Харків, 61002  
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:  
ДК № 4705 від 28.03.2014 р.