

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

**до вивчення дисципліни «Інженерне проектування
електричних машин та трансформаторів»
та контрольні завдання (розділ «Трансформатори»)**
для студентів спеціальності 141
«Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»
(спеціалізація «Електричні машини і апарати»)
усіх форм навчання

Методичні вказівки до вивчення дисципліни «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» та контрольні завдання (розділ «Трансформатори») для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» (спеціалізація «Електричні машини і апарати») усіх форм навчання / Укл. : І. М. Коцур, Т. П. Солодовнікова. – Запоріжжя : ЗНТУ, 2018. – 58 с.

Укладачі:	І. М. Коцур, доцент, канд.техн.наук, Т. П. Солодовнікова, старш.викл.
Рецензент	В. Г. Савельєв, доцент
Відповідальний за випуск	Д. С. Яримбаш, доцент, канд.техн.наук.

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні машини»
Протокол № 8
від «22» березня 2018 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного
факультету
Протокол № 8
від «29» березня 2018 р.

ЗМІСТ

1 Загальні методичні вказівки	4
2 Робоча програма	5
2.1 Теми 1 розділу дисципліни та питання для самоперевірки . .	5
2.2 Теми 2 розділу дисципліни та питання для самоперевірки . .	5
2.3 Теми 3 розділу дисципліни та питання для самоперевірки . .	6
2.4 Теми 4 розділу дисципліни та питання для самоперевірки . .	7
3 Методичні вказівки щодо виконання контрольної роботи	9
3.1 Розрахунок основних електричних величин	9
3.2 Визначення основних розмірів.	11
3.3 Розрахунок обмотки	13
3.4 Загальні зведення	13
3.5 Гвинтова обмотка.	18
3.6 Безперервна котушкова обмотка	21
3.7 Двошарова і одношарова циліндричні обмотки із прямокутного дроту	21 24
3.8 Багатошарова циліндрична обмотка з круглого дроту	26
3.9 Багатошарова циліндрична обмотка з прямокутного дроту	27
Рекомендована література.	29
Додаток А – Табличні дані до контрольної роботи	38
Додаток Б – Приклади розрахунку обмоток трансформатора. . .	41
Б.1 Приклад розрахунку гвинтової обмотки	41
Б.2 Приклад розрахунку котушкової обмотки	46
Б.3 Приклад розрахунку циліндричної багатошарової обмотки . . .	52
Додаток В – Приклад оформлення титульної сторінки контрольної роботи.	58

1 ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

Відповідно до навчального плану для заочної форми навчання зі спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» дисципліна «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» складається з лекцій, семінарських занять, контрольної роботи, заліку та екзамену (табл. 1.1).

Таблиця 1.1 – Нормативні дані до вивчення курсу

Спеціальність	Курс	Семестр	Лекції, год.	Лабораторні роботи, семінар, год.	Всього, год.	Контр. робота	Залік, семестр	Екзамен, семестр
141	4	8	16	10	26	1	8	8

Метою викладання дисципліни «Інженерне проектування електричних машин та трансформаторів» є опанування студентами сучасних методів проектування електричних машин та сучасних конструктивних форм їх виконання; навчання студентів основним методам і засобам виконання розрахунків та розробки конструкції електричних машин.

Внаслідок вивчення дисципліни студенти набувають досвіду виконання розрахунків основних розділів проектування електричних машин, користування нормативною, технічною, додатковою літературою, користування спеціальними комп'ютерними програмами, які дозволяють побудувати математичні моделі електричних машин, провести розрахунки з високою точністю та виконати креслення з урахуванням сучасних вимог.

Основні знання, які забезпечують успішне досягнення цієї мети, набуваються студентами при вивченні основних положень вищої математики, фізики, теоретичних основ електротехніки, прикладної механіки, електротехнічних матеріалів, електричних машин, обчислювальної техніки та програмування.

Працюючи над матеріалом дисципліни, необхідно обов'язково користуватись одним із рекомендованих джерел (с. 29). Додаткову літературу необхідно використовувати для поглиблення знань з окремих тем після опрацювання розділу по основній літературі.

2 РОБОЧА ПРОГРАМА

2.1 Теми 1 розділу дисципліни та питання для самоперевірки

Об'єм та задачі курсу. Сучасні методи проектування електричних машин. Огляд матеріалів, які використовуються в електромашинобудуванні. Конструкція машин постійного струму, синхронних машин, асинхронних машин.

Рекомендована література: [1, гл.1, гл. 9], [2, вступ], [3, гл. 7].

Питання для самоперевірки

- 1 Навчальне і промислове проектування.
- 2 Серії електричних машин.
- 3 Стандартизація в галузі електричних машин.
- 4 Електропровідні та ізоляційні матеріали.
- 5 Магнітні та конструкційні матеріали.
- 6 Загальні деталі та вузли електричних машин.
- 7 Основні розміри електричних машин.
- 8 Розрахункова та габаритна потужність електричних машин.
- 9 Визначення числа полюсів.
- 10 Розміри активної поверхні якоря.

2.2 Теми 2 розділу дисципліни та питання для самоперевірки

Якірні обмотки машин постійного струму (МПТ). Практичні схеми обмоток та таблиці зрівнювальних з'єднань. Якірні обмотки машин змінного струму.

Рекомендована література: [1, гл.3, 4, 5].

Питання для самоперевірки

- 1 Петльові, хвильові, комбіновані обмотки МПТ.
- 2 Умови симетрії обмоток МПТ.
- 3 Зрівнювальні з'єднання в МПТ.
- 4 Одношарові та двошарові обмотки машин змінного струму.
- 5 Короткозамкнені роторні обмотки машин змінного струму.
- 6 Ізоляція обмоток машин змінного струму.

- 7 Обмотки збудження, компенсаційні та заспокійливі обмотки.
- 8 Призначення та конструкція обмоток машин змінного струму.
- 9 Вимоги до обмоток.

Розрахунок магнітної напруги повітряного зазору, зубців, спинки ротора. Коефіцієнт розсіювання полюсів. Особливості розрахунку магнітного кола машин різних типів. Намагнічуюча сила збудження при навантаженні. Визначення активних та реактивних опорів обмоток. Втрати і коефіцієнти корисної дії. Охолодження електричних машин. Тепловий розрахунок за допомогою теплових схем заміщення.

Рекомендована література: [1, гл.6, 7, 8, 10, 11].

Питання для самоперевірки

- 1 Опори статорних і роторних обмоток.
- 2 Пазова, лобова, диференціальна відстань.
- 3 Скис пазів та зміщення полюсів.
- 4 Механічні втрати.
- 5 Основні та додаткові втрати неробочого ходу.
- 6 Основні та додаткові втрати при навантаженні.
- 7 Втрати на збудження.
- 8 Коефіцієнт корисної дії.
- 9 Засоби охолодження.
- 10 Розрахунок теплових опорів.

2.3 Теми 3 розділу дисципліни та питання для самоперевірки

Розрахунок машин постійного струму. Розрахунок асинхронних машин. Розрахунок синхронних машин.

Рекомендована література: [1, гл.12, 13, 14], [3, гл. 14, 17].

Питання для самоперевірки

- 1 Схема розрахунку електричних машин постійного струму.
- 2 Електромагнітне навантаження машин постійного струму.
- 3 Розрахунок характеристик генераторів постійного струму.
- 4 Розрахунок характеристик двигунів постійного струму.
- 5 Схема розрахунку асинхронних машин.

- 6 Головні розміри асинхронних машин.
- 7 Обмотка, пази та ярмо статора і ротора асинхронних машин.
- 8 Робочі та пускові характеристики асинхронних машин.
- 9 Схема розрахунку синхронних машин.
- 10 Електромагнітні навантаження синхронних машин.
- 11 Головні розміри синхронних машин.
- 12 Обмотка, пази, ярмо статора синхронних машин.
- 13 Полюси, зубці та ярмо ротора синхронних машин.
- 14 Постійна часу синхронних машин.

2.4 Теми 4 розділу дисципліни та питання для самоперевірки

Сучасні серії та типи трансформаторів. Конструкція трансформаторів, основні вузли та комплектуючі вироби. Узагальнений метод розрахунку основних розмірів трансформаторів. Електроізоляційні матеріали, які використовуються в трансформаторобудуванні. Класифікація та конструкція трансформаторів різних класів напруги.

Рекомендована література: [4, гл.1, 2, 3, 4].

Питання для самоперевірки

- 1 Стандартизація в трансформаторобудуванні.
- 2 Технічні дані трансформаторів.
- 3 Розрахунок основних розмірів трансформатора.
- 4 Розрахунок основних електричних величин.
- 5 Проектування одиничного трансформатора та серії.
- 6 Перенапруга в трансформаторах.

Конструкція та розрахунок обмоток трансформатора. Розрахунок обмоток середньої та вищої напруги. Регулювання напруги трансформаторів. Розрахунок параметрів короткого замикання.

Рекомендована література: [4, гл.5, 6], [1, гл.6, 7,13], [5, гл.4, 7, 8].

Питання для самоперевірки

- 1 Визначення числа витків.
- 2 Осьова та радіальна будови обмоток.

- 3 Схеми регулювання напруги.
- 4 Розрахунок регулювальних відгалужень.
- 5 Перемикання напруги без збудження.
- 6 Перемикання напруги під навантаженням.
- 7 Обмотки, які не резонують.
- 8 Розрахунок втрат і напруги короткого замикання.
- 9 Динамічні зусилля в обмотках трансформаторів.
- 10 Розрахунок механічної та термічної міцності обмоток при раптовому короткому замиканні.

Розрахунок магнітної системи трансформатора. Тепловий розрахунок трансформатора. Розрахунок зовнішньої системи охолодження трансформаторів. Математичні основи САПР та оптимального проектування.

Рекомендована література: [4, гл.8, 9], [2, гл.13], [14, гл.1].

Питання для самоперевірки

- 1 Визначення втрат неробочого ходу.
- 2 Визначення потужності, що намагнічує, і струму неробочого ходу.
- 3 Тепловий розрахунок обмоток трансформатора.
- 4 Формалізація задач оптимізації.
- 5 Класичні методи рішення задач оптимізації.
- 6 Методи нелінійного програмування.
- 7 Методи динамічного програмування.

3 МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ЩОДО ВИКОНАННЯ КОНТРОЛЬНОЇ РОБОТИ

Контрольна робота виконується із метою закріплення теоретичних знань, одержаних внаслідок вивчення дисципліни. Вона містить в собі розрахунок основних електричних величин, геометричних розмірів обмотки трансформатора та виконання ескізу розміщення обмотки на стрижні (формат А4). Варіант завдання обирається у відповідності з шифром залікової книжки за табл. А1 (додаток А). Контрольна робота повинна бути оформлена відповідно із СТП–1596 та вміщувати такі складові, як:

- титульний лист,
- розрахункова частина,
- графічна частина,
- перелік посилань.

Приклади розрахунку різних типів обмоток наведено у додатку Б. Контрольна робота виконується на базі навчального посібника П. М. Тихомирова «Расчет трансформаторов» [4].

Приклад оформлення титульного листа наведено у додатку В.

План виконання контрольної роботи

Контрольна робота складається із трьох розрахункових розділів.

- 1 Розрахунок основних електричних величин.
- 2 Визначення основних розмірів.
- 3 Розрахунок обмотки.

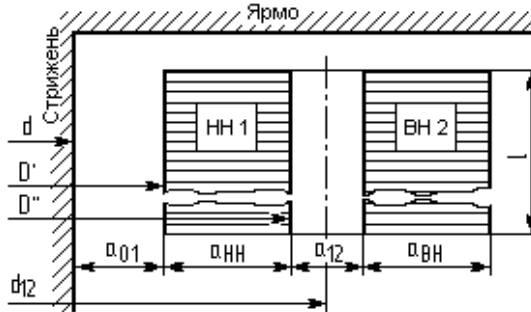
В першому розділі визначаються лінійні та фазні струми й напруги у відповідності зі схемою з'єднання обмотки. В другому – за методикою попереднього розрахунку трансформатора обираються та розраховуються основні розміри та дані для розрахунку обмотки. Третій розділ присвячений безпосередньому розрахунку геометрії обмотки, її маси з урахуванням конструкційних та технологічних обмежень.

3.1 Розрахунок основних електричних величин

До початкових даних контрольної роботи, які обирають згідно варіанту, відносяться: номінальна потужність трансформатора (кВА), лінійна напруга (кВ) та схема з'єднання обмотки («зірка» - Y, або «трикутник»

- D), втрати короткого замикання (кВт). Загальними для всіх варіантів є частота мережі ($f = 50$ Гц) та кількість фаз ($m = 3$).

Провести розрахунок обмотки низької напруги (НН 1), рис. 3.1.



d – діаметр стрижня; D', D'' – внутрішній та зовнішній діаметри обмотки, d_{12} – середній діаметр каналу між обмотками, l – висота обмотки, a_{01}, a_{12} – ізоляційні відстані від стрижня до обмотки та між обмотками відповідно, $a_{nn}, a_{вн}$ – радіальні розміри обмоток

Рисунок 3.1 – Положення обмоток у вікні магнітної системи

Матеріалом обмоток може бути як мідь так і алюміній, які в подальшому розрахунку позначені: Cu – мідь та Al – алюміній.

Номінальний лінійний струм обмотки, A

$$I = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_{\Delta}}, \quad (3.1)$$

де S – номінальна потужність трансформатора, кВА,

U_{Δ} – лінійна напруга, В.

Фазні струм та напруга обмотки розраховуються в залежності від схеми з'єднання обмотки:

«зірка» - Y	«трикутник» - D
$I_{\phi Y} = I, A$	$I_{\phi \Delta} = \frac{I}{\sqrt{3}}, A$
$U_{\phi Y} = \frac{U_{\Delta}}{\sqrt{3}}, B$	$U_{\phi \Delta} = U_{\Delta}, B$

(3.2)

Випробувальна напруга обмотки для визначення ізоляційних відстаней визначається за допомогою табл. 3.1.

Таблиця 3.1 – Випробувальні напруги

Клас напруги, кВ	≤ 1	3	6	10	15	20	35	110
Найбільша робоча напруга, кВ	-	3.6	7.2	12	17.5	24	40.5	126
Випробувальна напруга $U_{\text{випр}}$, кВ	5	18	25	35	45	55	85	200

3.2 Визначення основних розмірів

Рекомендоване значення діаметру стрижня магнітної системи d підбирається в залежності від потужності трансформатора, табл. 3.2.

Таблиця 3.2 – Рекомендовані значення діаметрів стрижня d

Потужність S , кВА	16	25	40-100	160-630	1000
Діаметр стрижня d , м	0.08	0.09	0.10-0.14	0.16-0.22	0.24-0.26
Потужність S , кВА	1600	2500	6300	10000	16000
Діаметр стрижня d , м	0.28-0.30	0.32-0.34	0.36-0.38	0.40-0.42	0.45-0.50

Після чого приймається найбільш ближче нормалізоване значення d , табл. 3.3.

Таблиця 3.3 – Нормалізовані значення діаметру стрижня d

Нормалізовані діаметри стрижнів без поперечних 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

Постійна a для розрахунку середнього діаметра каналу між обмотками та рекомендоване значення відношення середньої довжини окружності каналу між обмотками до висоти обмотки β - за табл. 3.4.

Таблиця 3.4 – Рекомендовані значення β та постійної a

Матеріал обмоток	Алюміній, $a = 1.48$			Мідь, $a = 1.40$		
	Лінійна напруга			Лінійна напруга		
Потужність, кВА	6 – 10кВ	35 кВ	110 кВ	6 – 10кВ	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

Середній діаметр каналу між обмотками

$$d_{12} = a \cdot d, \text{ м.} \quad (3.3)$$

Висота обмотки

$$l = (\pi \cdot d_{12}) / \beta, \text{ м.} \quad (3.4)$$

Коефіцієнт заповнення сталлю приймається $k_3 = 0.97$.

Фактична площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$ обирається за табл. 3.5 та переводиться в квадратні метри (м^2).

Таблиця 3.5 – Фактична площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$ ($k_3=0.97$)

Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$, см^2	Діаметр стрижня, d , м	Площа перерізу стрижня $P_{\phi c}$, 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

$$P_c = k_3 \cdot P_{\phi c}, \text{ м}^2. \quad (3.5)$$

Індукція в стрижні магнітної системи B_c (Тл) із табл. 3.6.

Таблиця 3.6 – Рекомендовані значення індукції в стрижні B_c

Потужність S , кВА	≤ 16	25-100	160-100000	≥ 100000
Індукція в стрижні B_c , Тл	1.5–1.55	1.55–1.60	1.55–1.65	≤ 1.7

3.3 Розрахунок обмотки

Визначити попереднє значення напруги витка, В

$$u_{\phi} = 4.44 f \cdot B_c \cdot P_c. \quad (3.6)$$

Визначити число витків на одну фазу обмотки за (3.7) та округлити його до найближчого цілого числа

$$w = U_{\phi} / u_{\phi} \quad (3.7)$$

Остаточню розрахувати напругу витка, В

$$u_{\phi} = U_{\phi} / w. \quad (3.8)$$

Визначити середню густину струму, А/м²

$$J_{Cu} = 0.746 \cdot k_{\phi} \frac{P_{K3} \cdot u_{\phi}}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4; \quad (3.9)$$

$$J_{Al} = 0.463 \cdot k_{\phi} \frac{P_{K3} \cdot u_{\phi}}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4,$$

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

S – потужність трансформатора, кВА;

k_{ϕ} – коефіцієнт додаткових втрат, табл. 3.7.

Таблиця 3.7 – Значення коефіцієнту k_{ϕ}

Потужність S , кВА	≤ 100	160-630	1000-6300	10000-16000
k_{ϕ}	0.97	0.96-0.93	0.93-0.85	0.84-0.82

Розрахувати орієнтовний переріз витка, м²

$$P'_{\phi} = I_{\phi} / J. \quad (3.10)$$

Після чого обрати конструкцію обмотки (табл. 3.8) у відповідності із отриманими обмеженнями.

Після вибору типу (конструкції) обмотки подальший розрахунок слід виконувати за методикою розрахунку обраного типу обмотки.

3.4 Загальні зведення

Розміри дроту по орієнтовному перерізу витка вибрати за дод. А (табл. А.2). Дріт марок ПБ і АПБ випускається з товщиною ізоляції: $2\delta = 0.45(0.50), 0.55(0.62), 0.72(0.82), 0.96(1.06), 1.20(1.35), 1.35(1.50),$

1.68(1.83) і 1.92 (2.07) мм. Поза дужками – номінальна товщина ізоляції, розміри котушок – в дужках. Мідний дріт марки ПБУ випускається з розмірами дроту $a=(1.8\div5.6)$ мм і $b=(6.7\div18)$ мм з товщиною ізоляції: $2\delta=1.35(1.45)$, $2.00(2.20)$, $2.48(2.63)$, $2.96(3.16)$, $3.60(3.80)$, $4.08(4.28)$ і $4.40(4.65)$ мм.

Таблиця 3.8 – Межі використання різних типів обмоток

Тип обмотки	Матеріал обмотки	Межі використання, включно				Число паралельних дрітів
		Потужність S , кВА	Фазний струм I_{Φ} , А	Напруга U , кВ	Переріз витка, P_{Σ} , мм ²	
Циліндрична одно-, двошарова з прямокутного дроту	Cu	≤ 630	15-800	≤ 6	5.04- 250	1-8
	Al	≤ 630	10-650	≤ 6	6.39- 300	
Циліндрична багатошарова з прямокутного дроту	Cu	630-80000	15-1200	10 та 35	5.04- 400	1-8
	Al	≤ 25000	10-1200		6.39- 500	
Циліндрична багатошарова з круглого дроту	Cu	≤ 630	0.3-100	≤ 35	1.18- 42.44	1-2
	Al	≤ 630	2-135	≤ 35	1.37- 50.24	1
Гвинтова одно- та багатошарова з прямокутного дроту	Cu	≥ 160	≥ 300	≤ 35	≥ 75	≥ 4
	Al	≥ 100	≥ 150	≤ 35		
Безперервна котушкова з прямокутного дроту	Cu	≥ 160	≥ 15	3-220	≥ 5.04	1-5
	Al	≥ 100	≥ 10	3-220	≥ 6.39	

Підібрані розміри дрітів записуються так:

- прямокутний $Марка\ дроту \times n_{нар} \times \frac{a \times b}{2\delta},$

- круглий $Марка\ дроту \times n_{нар} \times \frac{d}{2\delta}.$

Розміри дрітів в ізоляції, мм

$$a' = a + 2\delta, \quad b' = b + 2\delta, \quad d' = d + 2\delta. \quad (3.11)$$

де $n_{нар}$ – число паралельних дрітів;

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

d – діаметр дроту без ізоляції, мм;

δ – товщина ізоляції на один бік, мм.

Повний переріз витка

$$P_{\phi} = n_{\text{пар}} \cdot P_{\text{пр}}, \text{ м}^2, \quad (3.12)$$

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

$P_{\text{пр}}$ – переріз одного дроту, м² (дод. А, табл. А.2).

Густина струму обмотки

$$J = I_{\phi} / P_{\phi} \text{ А/м}^2. \quad (3.13)$$

Осьовий l та радіальний $a_{\text{рад}}$ розміри обмотки визначаються згідно з рисунками та методиками розрахунку.

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки відповідно, м

$$D' = d + 2a_{01}; \quad (3.14)$$

$$D'' = D' + 2a_{\text{рад}}, \quad (3.15)$$

де a_{01} – ізоляційна відстань між стрижнем та обмоткою, м, (табл. 3.9).

Таблиця 3.9 – 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.

Коефіцієнт додаткових втрат при розрахунку густини теплового потоку q на поверхні обмотки визначити для прямокутного та круглого дроту – за формулами (3.16).

$$k_{\phi} = 1 + k \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2, \quad (3.16)$$

$$k_{\phi} = 1 + k_{\phi} \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot d^4 \cdot n^2,$$

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

де k_{ϕ} – коефіцієнт, для круглих мідних дротів $k_{\phi} = 0.044$, для алюмінієвих – $k_{\phi} = 0.017$;

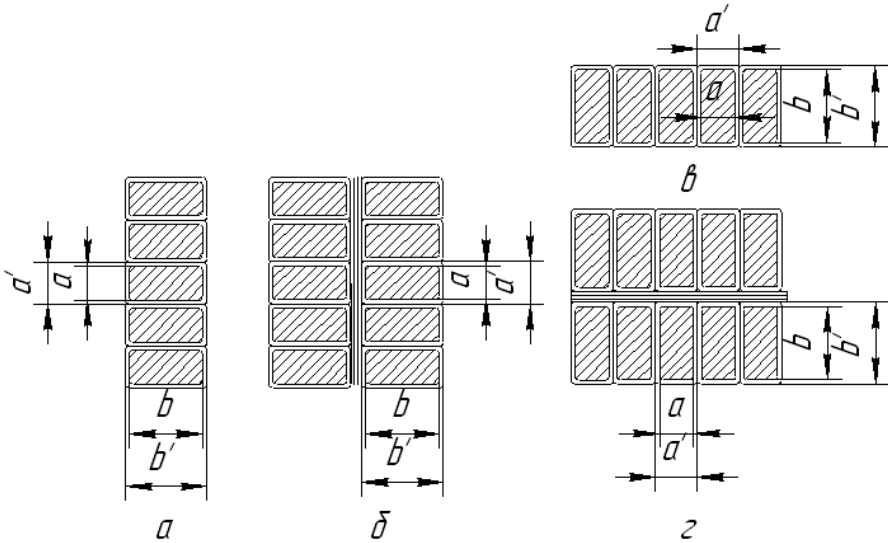
n – число дротів обмотки в напрямку, перпендикулярному напрямку ліній магнітної індукції поля розсіювання,

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

$$\begin{aligned} \text{дріт прямокутний } \beta &= b \cdot m / l \\ \text{дріт круглий } \beta &= d \cdot m / l' \end{aligned} \quad (3.17)$$

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

Густина теплового потоку q на поверхні обмотки (рис. 3.2) залежить від конструкції обмотки ($\text{Вт}/\text{м}^2$).



- 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 3.2 – До розрахунку густини теплового потоку в обмотках різних типів

Густина теплового потоку q на поверхні обмотки для:

- циліндричної обмотки та гвинтової без радіальних каналів (рис. 3.2, а та б) розраховується за формулами

$$q_{Cu} = \frac{107 J^2 \cdot k_{\partial}}{k_3} b \cdot n \frac{a}{a'} \cdot 10^{-10}, \quad q_{Al} = \frac{172 J^2 \cdot k_{\partial}}{k_3} b \cdot n \frac{a}{a'} \cdot 10^{-10}, \quad (3.18)$$

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

– гвинтової та котушкової обмоток з радіальними каналами (рис. 3.2, в) розраховується за формулами

$$q_{Cu} = \frac{107 \cdot J \cdot I_{\phi} \cdot w_k \cdot k_{\phi}}{k_3 \cdot (b' + a_{pad})} \cdot 10^{-10}, \quad q_{Al} = \frac{172 \cdot J \cdot I_{\phi} \cdot w_k \cdot k_{\phi}}{k_3 \cdot (b' + a_{pad})} \cdot 10^{-10}, \quad (3.19)$$

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

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

– гвинтової та котушкової обмоток із спареними котушками або витками (рис. 3.2, г) розраховується за формулами (3.19) при заміні коефіцієнтів 107 на 214 та 172 на 344 відповідно.

Після розрахунку отримане q порівнюють із припустимими значеннями для даного типу обмоток, зазвичай не більше $(1200 \div 1400) \text{ Вт/м}^2$.

Масу метала обмотки розрахувати за формулою

$$G_{oCu} = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_{\phi}, \quad G_{oAl} = 8.47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{D' + D''}{2} w \cdot \Pi_{\phi}, \quad (3.20)$$

де c – число несучих обмотки стрижнів трансформатора.

Масу дроту обмотки розрахувати за формулою

$$G_{np} = G_o \cdot k_{i3}, \quad (3.21)$$

де k_{i3} – коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ у відсотках за рахунок ізоляції, табл. 3.10.

Таблиця 3.10 – Орієнтовне збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції при $2\delta=0.45(0.5)$, мм

k_{i3} , %		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 $2\delta=0.96\text{мм}$ на 2.5, при $2\delta=1.35\text{мм}$ на 3.5, при $2\delta=1.92\text{мм}$ на 5.

2 Для дроту марок ПСД та ПСДК данні таблиці помножити при $2\delta=0.45\text{мм}$ на 1.7, при $2\delta=0.5\text{мм}$ на 2.

3 Для алюмінієвого дроту дані таблиці помножити на 3.3.

3.5 Гвинтова обмотка

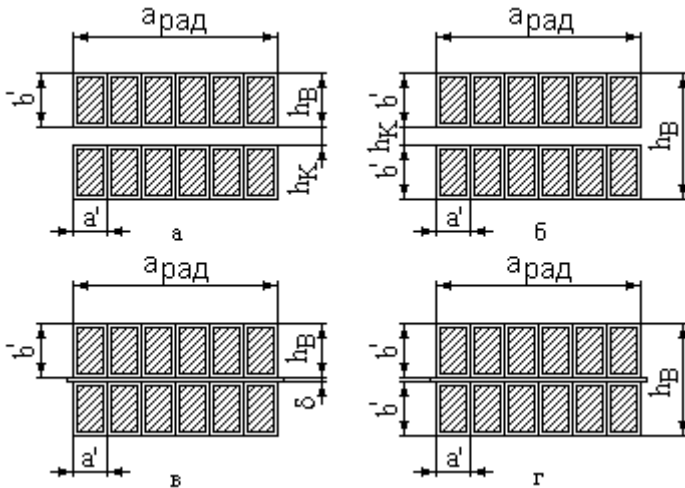
Вибір одноходової або двоходової (багатоходової) обмотки (рис. 3.3) залежить від осьового розміру (висоти) одного витка, який орієнтовно розраховується по формулі для одноходової обмотки

$$h_g = l / (w + 4) - h_k, \text{ м}, \quad (3.22)$$

де l – висота обмотки, м;

h_k – осьовий розмір масляного каналу між витками, м.

Орієнтовно значення h_k можна прийняти рівним $h_k \approx 0.1 a_{rad}$, але не менше 0.004 м, де a_{rad} – радіальний розмір обмотки, м.



- а) одноходовая обмотка із трьома транспозиціями;
- б) двоходовая обмотка з рівномірно розподіленою транспозицією;
- в) одноходовая обмотка з каналами через два витки;
- г) двоходовая обмотка без каналу між двома групами проводів

Рисунок 3.3 – Визначення осьового і радіального розмірів

Після розрахунку h_g тип обмотки обирається із табл. 3.11.

Для двоходової обмотки з рівномірно розподіленою транспозицією h_g перераховується по (3.23)

$$h_g = l / (w + 1) - h_k, \text{ м}. \quad (3.23)$$

Таблиця 3.11

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

У порівняно рідкісних випадках може бути застосована чотириходова обмотка.

Після визначення числа ходів обмотки варто перевірити отриманий осьовий розмір витка h_g по припустимій густині теплового потоку на поверхні обмотки $q=1200\div 1400$ Вт/м² при $k_3 = 1$ для гвинтових та котушкових обмоток та при $k_3 = 0.8$ для циліндричних

$$Cu: b_m = \frac{k_3 \cdot q}{1.07 \cdot J^2 \cdot 10^{-8}}, \text{ м} \quad Al: b_m = \frac{k_3 \cdot q}{1.72 \cdot J^2 \cdot 10^{-8}}, \text{ м}. \quad (3.24)$$

Якщо знайдений осьовий розмір витка h_g складає не більш половини b_m , то в одноходовій обмотці можна зробити радіальні канали через два витки. У двоходовій обмотці масляний канал між двома групами дротів витка можна замінити прокладкою товщиною 2×0.5 мм, якщо $h_g - h_k \leq b_m$.

Якщо густина струму в мідному дроті обмотки не перевищує $2.2\div 2.5$ МА/м² і в алюмінієвому $1.4\div 1.8$ МА/м², можливо застосування гвинтової обмотки без радіальних каналів із щільним приляганням витків (тоді $h_k = 0$).

Орієнтовний переріз витка знаходиться по формулі (3.10).

Число і радіальні розміри дротів витка (половини витка двоходової обмотки) повинні бути обрані так, щоб сума їхніх радіальних розмірів не була більше b_m , а радіальний розмір кожного дроту не перевищував значення, знайдене у дод. А по табл. А.3 при обраному числі паралельних дротів і прийнятому рівні додаткових втрат.

Якщо радіальний розмір одноходової обмотки без радіальних каналів виходить істотно більше розміру b_m , можливо застосування двоходової двошарової гвинтової обмотки з послідовним з'єднанням прошарків і осьовим масляним каналом між прошарками шириною приблизно 0.01l. При відносно великому числі витків можливо також застосування одноходової двошарової обмотки.

Після остаточного вибору конструкції обмотки до отриманих

орієнтовних значень l'_g і h_g по сортаменту обмотувального дроту (Дод. А, табл. А.2) підбираються підхожі перерізи дроту з дотриманням таких вимог:

- мінімальне число паралельних дротів одноходової обмотки – чотири, двоходової – вісім;
- усі паралельні дроти мають однакові розміри та площу поперечного перерізу;
- в обмотці з радіальними каналами більший розмір дроту не виходить за граничний розмір, знайдений по (3.24);
- в обмотці без радіальних каналів радіальний розмір і число дротів у радіальному напрямку обрані з урахуванням припустимого значення q і припустимого рівня додаткових втрат;
- розрахункова висота обмотки при обраних розмірах дротів і радіальних каналів дорівнює попередньо розрахованому значенню l .

Підібрані розміри дротів у мм, записуються по прикладу (3.11).

Повний переріз витка по (3.12). Густина струму по (3.13).

Осьовий розмір витка h_g і радіальний розмір обмотки a_{rad} для одно- і двоходової обмоток визначаються по рис. 3.3.

Висота обмотки l , упресованої після сушіння, визначається при осьовому розмірі дроту b' в метрах за формулами:

- для одноходової обмотки (рис. 3.3, а) із трьома транспозиціями

$$l = b' \cdot (w + 4) + k \cdot h_k \cdot (w + 3), \text{ м} \quad (3.25)$$

- для одноходової обмотки з каналами через два витки (рис. 3.3, в) і з трьома транспозиціями

$$l = b' \cdot (w + 4) + k \left[h_k \cdot \left(\frac{w}{2} + 2 \right) + \delta \frac{w}{2} \right], \text{ м} \quad (3.26)$$

де δ – товщина прокладки між здвоєними витками, звичайно дорівнює $(1 \div 1.5) 10^{-3}$ м;

- для двоходової обмотки з рівномірно розподіленою транспозицією (рис. 3.3, б)

$$l = 2b' \cdot (w + 1) + k \cdot h_k \cdot (2w + 1), \text{ м} \quad (3.27)$$

- для двоходової обмотки без каналу між двома групами проводів (рис. 3.3, г)

$$l = 2b' \cdot (w + 1) + k \left[h_k w + \delta (w + 1) \right] \text{ м.} \quad (3.28)$$

Коефіцієнт k у (3.25) – (3.28) враховує усадку прокладок після сушіння й опресування обмотки і може бути прийнятий (0.94÷0.96).

Осьовий розмір обмотки без радіальних каналів, одно- і двоходової, може бути знайдений по формулі (3.25) або (3.27) при $h_k = 0$.

Внутрішній та зовнішній діаметри обмотки розраховуються по формулам (3.14), (3.15).

Густина теплового потоку q на поверхні обмотки для обмотки з радіальними каналами розраховується по (3.18), для обмотки без радіальних каналів по (3.19) із спареними витками теж по (3.19), але з іншими коефіцієнтами, та порівнюється із припустимою.

У обмотці з зосередженою транспозицією групові транспозиції розміщуються на $1/4 \cdot w$ і $3/4 \cdot w$ від початку обмотки, загальна транспозиція розташовується на $2/4 \cdot w$. У двоходових обмотках із рівномірно розподіленою транспозицією загальне число транспозицій приймається рівним числу паралельних дротів n_{nap} або $2n_{nap}$. Перша транспозиція розміщується відповідно на відстані $w/(2n_{nap})$ або $w/(4n_{nap})$ витків від початку намотування, а всі наступні на інтервалах w/n_{nap} або $w/(2n_{nap})$ витків між сусідніми транспозиціями. Інтервали, на яких розташовані транспозиції, можуть бути виражені цілим числом витків, або у вигляді простого чи змішаного дробу (знаменником дробу повинно бути число рейок по окружності обмотки). У одноходовій двошаровій обмотці не менше трьох транспозицій повинно бути зроблено в кожному прошарку.

Розрахунок гвинтової обмотки у дод. Б. приклад Б.1.

3.6 Безперервна котушкова обмотка

Орієнтовний переріз витка котушкової обмотки (рис. 3.4) знаходиться по (3.10). До цього перерізу витка по сортаменту обмотувального дроту (дод. А, табл. А.2) підбирається підходящий переріз прямокутного дроту. При цьому більший розмір дроту b не повинний перевершувати граничний розмір, знайдений за умовами тепловіддачі обмотки при припустимому значенні густини теплового потоку на поверхні обмотки (1200÷1400 Вт/м²), що розраховується по (3.24) при $k_3 = 1$.

Якщо обраний розмір b складає не більш половини отриманого по (3.24), радіальні канали в подвійних котушках замінюють шайбами [4, § 5.6], зберігаючи при цьому канали між подвійними котушками.

Підібрані розміри дротів у міліметрах, записуються по прикладу (3.11). Повний переріз витка розраховують по формулі (3.12), густину струму – по (3.13).

Звичайно потрібному перерізу витка II'_g в сортаменті обмотувального дроту відповідає декілька перерізів дроту з різноманітним співвідношенням розмірів сторін дроту a/b .

Для одержання більш компактної конструкції обмотки рекомендується вибирати із сортаменту більш значні перерізи з більшим можливим розміром b при меншому числі паралельних дротів.

При цьому треба дотримуватися таких вимог:

- загальне число котушок повинно бути парним, число різноманітних видів котушок не більш чотирьох;
- робоча напруга однієї котушки: при класі напруги до 35 кВ не повинна перевищувати $800 \div 1000$ В; при класі напруги 110 кВ – $1500 \div 1800$ В;
- котушки, що містять різноманітне число витків або відрізняються розмірами або ізоляцією, при розрахунку для зручності позначаються різноманітними буквами;
- число витків у котушці може бути цілим або дрібним; в останньому випадку знаменником дробу повинно бути число рейок по окружності обмотки.

Висота котушки дорівнює більшому розміру дроту в ізоляції b' . Вхідні котушки обмотки при її номінальній напрузі від 20 кВ і вище звичайно виконуються з посиленою ізоляцією. Посилена ізоляція виконується на вхідних котушках обмотки кожної фази з двох її кінців.

Розрахунок посиленої ізоляції вхідних витків і котушок провадиться відповідно до вказівок [4, § 4.5].

Осьовий розмір (висота) радіального каналу h_k у масляних трансформаторах потужністю $160 \div 6300$ кВА і робочих напругах не більш 35 кВ коливається від 4 до 6 мм.

Розмір каналу h_k у усіх випадках вибирається за умовами забезпечення електричної міцності ізоляції відповідно до вказівок [4, § 4.5].

Число котушок на одному стрижні орієнтовно (при b' в метрах)

$$n_{\text{ком}} = \frac{l}{b' + h_k}. \quad (3.29)$$

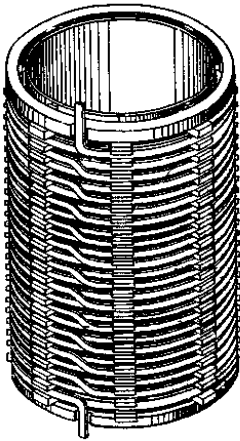


Рисунок 3.4 - Безперервна котушкова обмотка

У подвійних котушках, без каналу між ними, прокладаються шайби – по дві шайби на одну подвійну котушку сумарною товщиною $\delta_{\text{ш}} = 0.001$ м.

Для здвоєних котушок із шайбами в подвійних котушках і з каналами між подвійними котушками (при b' в метрах) число котушок

$$n_{\text{ком}} = \frac{2 \cdot l}{2 \cdot b' + h_k + \delta_{\text{ш}}} \quad (3.30)$$

Число витків у котушці орієнтовно

$$w_{\text{ком}} = \frac{w}{n_{\text{ком}}}, \quad (3.31)$$

Рисунок 3.4 - Безперервна котушкова обмотка

доповнюється до найближчого більшого цілого числа.

Висота обмотки з каналами між усіма котушками

$$l = b' \cdot n_{\text{ком}} + k \cdot h_k \cdot (n_{\text{ком}} - 1), \text{ м}, \quad (3.32)$$

де k – коефіцієнт, що враховує усадку ізоляції після сушіння й опресування обмотки, $k = 0.94 \div 0.96$.

Висота обмотки із шайбами в подвійних котушках і з каналами між ними

$$l = b' \cdot n_{\text{ком}} + k \cdot (h_k \cdot (n_{\text{ком}}/2 - 1) + n_{\text{ком}}/2 \cdot \delta_{\text{ш}}), \text{ м}. \quad (3.33)$$

Радіальний розмір обмотки

$$a_{\text{рад}} = a' \cdot n_{\text{пар}} \cdot w_{\text{ком}}, \text{ м}, \quad (3.34)$$

де $w_{\text{ком}}$ – число витків котушки; a' – радіальний розмір дроту в ізоляції, м.

Внутрішній і зовнішній діаметри визначаються по (3.14) і (3.15). Густина теплового потоку (Вт/м^2) на поверхні обмотки з каналами між усіма котушками визначається та із шайбами в подвійних котушках і з каналами між ними по (3.19).

Розрахунок безперервної котушкової обмотки у дод. Б. Б.2.

3.7 Двошарова і одношарова циліндричні обмотки із прямокутного дроту

Число прошарків обмотки (рис. 3.5) вибирається звичайно рівним двом. Для трансформаторів потужністю на один стрижень до $6 \div 10$ кВА обмотка може бути намотана в один прошарок і в рідкісних випадках для більш потужних трансформаторів – у три прошарки.

Число витків в одному прошарку:

- для одношарової обмотки $w_n = w$,
- для двошарової обмотки $w_n = w / 2$.

(3.35)

Орієнтовний осьовий розмір витка

$$h_g = l \cdot (w_n + 1), \text{ м.} \quad (3.36)$$

Орієнтовний переріз витка по (3.10).

До отриманих значень P'_g і h_g по сортаменту обмотувального дроту (дод. А, табл. А.2) підбираються підхожі дроти з дотриманням таких правил:

- число паралельних дротів n_{nap} не більш $4 \div 6$ при намотуванні плазом і не більш $6 \div 8$ при намотуванні на ребро;
- усі дроти мають однакові розміри поперечного перерізу;
- радіальні розміри всіх паралельних дротів витка рівні;
- радіальні розміри дротів не виходять за граничні розміри, знайдені по формулі

(3.24) з густиною теплового потоку зазвичай не більше 1200 Вт/м^2 (в рідкісних випадках $q \leq 1400 \text{ Вт/м}^2$), або по припустимих додаткових втратах (дод. А, табл. А.3), які бажано обирати не більше 5 %;

– при намотуванні на ребро потрібно дотримуватись відношення радіального розміру дроту до осьового $a : b = 1.3 \div 3$;

- розрахункова висота обмотки $(w_n + 1)/h_g$ на 5 - 15 мм менше l .

Підібрані розміри дротів записуються згідно (3.11).

Повний переріз витка визначається по формулі (3.12).

Осьовий розмір витка визначається за допомогою рис. 3.6

$$h_g = n_{nap} \cdot b', \text{ м,} \quad (3.37)$$

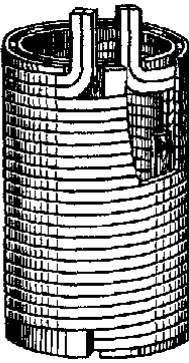


Рисунок 3.5 –
Двошарова
циліндрична обмотка

де b' - осьовий розмір дроту в ізоляції, м.

Осьовий розмір обмотки

$$l = h_g (w_n + 1) + (0.005 \div 0.015), \text{ м.} \quad (3.38)$$

Радіальний розмір обмотки в метрах (позначення по рис. 3.6):

$$\begin{aligned} &\text{- одношарової} \quad a_{\text{рад}} = a' \\ &\text{- двошарової} \quad a_{\text{рад}} = 2a' + a_k \end{aligned} \quad (3.39)$$

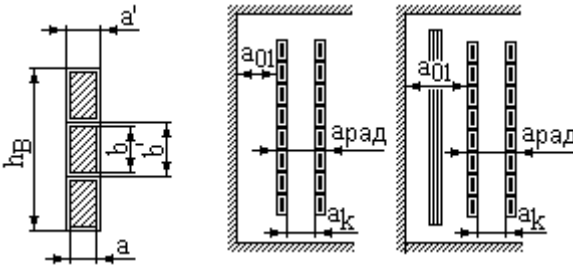


Рисунок 3.6 – Визначення висоти витка та радіальних розмірів обмотки

Радіальний розмір каналу a_k при $U_\phi \leq 1 \text{ кВ}$ вибирається за умовами ізоляції не менше 4 мм і перевіряється за умовами відводу тепла по табл. 3.12.

Якщо дійсний радіальний розмір

дроту a дорівнює або менше половини b , знайденого по граничному значенню густини теплового потоку q (3.24), канал між прошарками може бути замінений жорсткою міжшаровою ізоляцією – двома шарами електроізоляційного картону по 0.5 мм. У цьому випадку у (3.39б) замість розміру каналу треба підставити товщину міжшарової ізоляції 0.001 м.

Таблиця 3.12

Довжина каналу, мм	≤ 300	300 - 500	500 - 1000	1000 - 1500
Ширина каналу, мм	4 - 5	5 - 6	6 - 8	8 - 10

Внутрішній і зовнішній діаметри визначаються по (3.14) і (3.15).

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β по (3.17) та коефіцієнт додаткових втрат k_d по (3.16). Густина теплового потоку на поверхні обмотки розраховують по (3.19).

Циліндрична обмотка з прямокутного дроту для сторони НН може бути намотана й у три та більш прошарків. Розрахунок такої об-

мотки проводиться також по цій методиці, але з урахуванням дійсного числа прошарків і внесення відповідних поправок у (3.36) і (3.39).

3.8 Багатопарова циліндрична обмотка з круглого дроту

Орієнтовний переріз витка багатопарової обмотки з круглого дроту (рис. 3.7) визначається по (3.10). По цьому перерізу і сортаменту обмотувального дроту (дод. А, табл. А.2) підбирається дріт підходящого перерізу, або в рідкісних випадках два паралельні однакові дроти. Підібрані розміри дротів записуються згідно з (3.11).

Повний переріз витка розраховується по (3.12). Густина струму по (3.13).

Число витків у прошарку

$$w_n = \frac{l}{n_{\text{пар}} \cdot d'} - 1, \quad (3.40)$$

де $n_{\text{пар}}$ – число паралельних дротів.

Число прошарків в обмотці

$$n_n = w/w_n \quad (3.41)$$

округлюється до найближчого більшого числа.

Робоча напруга двох прошарків

$$U_{2n} = 2 \cdot w_\phi \cdot u_\phi, \text{ В.} \quad (3.42)$$

По робочій напрузі 2-х прошарків по (дод. А, табл. А.4) вибираються число прошарків і товщина кабельного паперу $n_\delta \cdot \delta_{\text{ми}}$ між двома прошарками.

У більшості випадків, за умовами охолодження, обмотка кожного стрижня виконується у виді двох концентричних котушок (числа прошарків внутрішньої і зовнішньої котушок робляться рівними) з осьовим масляним каналом між ними.

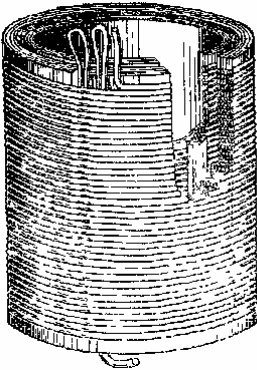


Рисунок 3.7 - Багатопарова циліндрична обмотка з круглого дроту

Мінімальна ширина масляного каналу a_k між котушками вибирається з табл. 3.13. У трансформаторах потужністю на один стрижень не більш $3 \div 6$ кВА можливо застосування обмотки, що складається з однієї котушки без осьового каналу.

Таблиця 3.13 – Мінімальна ширина вертикальних охолоджуючих каналів в обмотках

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

Радіальний розмір обмотки, м:

одна котушка без екрана $a_{pad} = d' \cdot n_n + n_\delta \cdot \delta_{ми} \cdot (n_n - 1),$

дві котушки без екрана $a_{pad} = d' \cdot n_n + n_\delta \cdot \delta_{ми} \cdot (n_n - 2) + a_k, \quad (3.43)$

обмотка з екраном $a_{екр} = a_{pad} + \delta_{екр} + 2 \cdot \delta_{ми}.$

У обмотках класів напруг 20 і 35 кВ під внутрішнім прошарком обмотки встановлюється металевий екран – незамкнений циліндр з алюмінієвого листа товщиною $\delta_{екр} = 0.0005$ м.

Внутрішній діаметр обмотки розраховується по (3.14). Зовнішній діаметр обмотки:

– без екрана – по (3.15);

– з екраном – по $D'' = D' + 2a_{екр}, \text{ м.} \quad (3.44)$

3.9 Багатопарова циліндрична обмотка з прямокутного дроту

Цей тип обмотки (рис. 3.8) може застосовуватися в масляних трансформаторах класів напруги 10 і 35 кВ потужністю від 1000 кВА і більш. Після визначення II'_e (3.10) необхідно вибрати один або два-три паралельних дроти з загальним перерізом II'_e .

Реальний переріз дроту підбирається за дод. А, табл. А.2 і записується відповідно до (3.11).

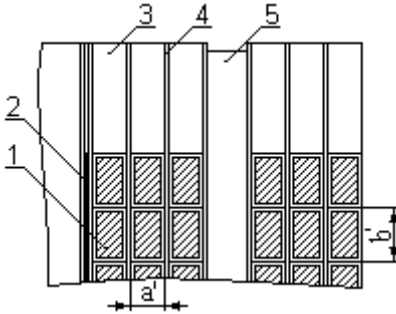
Радіальний розмір дроту a і число прошарків обмотки n_n повинні бути обрані за допомогою дод. А, табл. А.3.

Загальний радіальний розмір металу при намотуванні плазом

$$b_m = a \cdot n_n. \quad (3.45)$$

Якщо знайдений сумарний розмір b_m виявиться більше розміру, припустимого по густині теплового потоку по (3.24) при $k_3 = 0.75$, то обмотку варто розділити на дві або три концентричні котушки так, щоб у кожній із них сумарний розмір був не більше припустимого.

Ширина кожного осьового каналу a_k між котушками повинна дорівнювати $0.01l$, але не менш 5 мм.



1 – дріт; 2 – електростатичний екран;
3 – паперово-бакелітова опорна каблучка прошарку, 4 – міжшарова ізоляція з кабельного паперу, 5 – рейка з електроізоляційного картону розташована в осьовому каналі

Рисунок 3.8 – Розтин торцевої частини багатошарової циліндричної обмотки

У обмотках класів напруги 20 і 35 кВ під внутрішнім прошарком обмотки встановлюється металевий екран – незамкнений циліндр із листа немагнітного металу товщиною 0.5 мм.

Радіальний розмір обмотки без екрана

$$a_{рад} = a' \cdot n_n + n_\delta \cdot \delta_{ми} \cdot (n_n - (1 + n_k)) + a_k \cdot n_k, \text{ м}, \quad (3.48)$$

де a_k - радіальний розмір каналу, $a_k = 0.01 \cdot l$ м;

n_k - число осьових каналів.

Радіальний розмір обмотки з екраном та його ізоляцією

$$a_{екр} = a_{рад} + 0.003, \text{ м}. \quad (3.49)$$

Внутрішній діаметр обмотки розраховується по (3.14).

Зовнішній діаметр обмотки:

- без екрану – по (3.15);
- з екраном – по (3.44).

Розрахунок циліндричної багатошарової обмотки у дод. Б. Б.3.

Повний переріз витка (3.12).

Густина струму по (3.13).

Число витків у прошарку

$$w_n = \frac{l}{n_{нар} \cdot b'} - 1 \quad (3.46)$$

округляється до найближчого цілого числа.

Число прошарків в обмотці

$$n_n = \frac{w}{w_n} \quad (3.47)$$

округляється до найближчого більшого числа.

По робочій напрузі двох прошарків за (3.42), у дод. А, табл. А.4 вибираються число прошарків і товщина кабельного паперу $n_\delta \cdot \delta_{ми}$ між двома прошарками обмотки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

ОСНОВНА

1. Тихомиров, П. М. Расчёт трансформаторов / П. М. Тихомиров. - [Изд. 5-е] – М. : Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
2. Васютинский, С. Б. Вопросы теории расчёта трансформаторов / С. Б. Васютинский. – Л. : Энергия, 1970.
3. Солодовнікова, Т.П. Простий розподіл витків між котушками силового трансформатора / Солодовнікова, Т.П. // Збірник НПК «Тиждень науки», 2011, ЗНТУ.
4. Голунов, М. А. Вспомогательное оборудование трансформаторов / М. А. Голунов, А. Л. Мазур. – М. : Энергия, 1978.

ДОДАТКОВА

5. Копылов, И. П. Проектирование электрических машин / И. П. Копылов. – М. : Энергия, 1980.
6. Сергеев, П. С. Проектирование электрических машин / Сергеев П. С., Виноградов Н. В., Горяинов Ф. А. – [Изд. 3-е]. - М. : Энергия 1976.
7. Дембровский, В. В. Основы проектирования электрических машин переменного тока / В. В. Дембровский, Г. М. Хуторецкий. – Л. : Энергия, 1974.
8. Гольдберг, О. Д. Проектирование электрических машин : Учебник для вузов / О. Д. Гольдберг, Я. С. Гурин, И.С. Свириденко ; под ред. Гольдберга О.Д. – М. : Высшая школа , 1984.
9. Гурин, Я. С. Проектирование серий электрических машин / Я. С. Гурин, Б. И. Кузнецов. – М. : Энергия, 1978.
10. Ярымбаш, Д.С. Особенности определения параметров электрической схемы замещения печной петли печи графитации переменного тока [Текст] / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2010. №2. – С. 36 – 43.
11. Ярымбаш, Д.С. Особенности электротепловых режимов главных шинных пакетов секций печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш, И.М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. – 2011. – №1. – С. 64 – 69.
12. Ярымбаш Д.С. Особенности измерения переменного тока в токоподводах печей графитации / Д.С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2005. - №1. – с. 74 – 76.
13. Ярымбаш, Д. С. Исследование электромагнитных и термоэлектрических процессов в печах графитации переменного и

постоянного тока / Д. С. Ярымбаш // Науковий вісник НГУ – 2015. – №3. – С.95–102.

14. Ярымбаш, Д.С. Повышение энергоэффективности бокового шинопакета печей графитации переменного тока / Д.С. Ярымбаш, С.Т. Ярымбаш // Технічна електродинаміка. Тематичний вип. Силова електроніка і енергоефективність. – 2011, С. 229 – 233.

15. Ярымбаш, Д. С. Особенности моделирования электромагнитных процессов в индукторе калибра мундштука прессы / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник // Вісник кременчуцького державного політехнічного університету. – 2007. – №4 (45) Частина 1. – С. 53–55.

16. Ярымбаш, Д. С. Особливості розподілення магнітних потоків у режимі неробочого ходу силових трансформаторів / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 5-12.

17. Ярымбаш Д. С. Особливості визначення параметрів короткого замикання силових трансформаторів засобами польового моделювання / Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, Т. Є. Дівчук, І. М. Килимник // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 12-17.

18. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д.С. Ярымбаш, И.М. Килимник, С.Т. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. – 2015. – N 2. - С. 65-70.

19. Yarymbash D.S. On specific features of modeling electromagnetic field in the connection area of side busbar packages to graphitization furnace current leads / D.S.Yarymbash, A.M. Oleinikov // Russian Electrical Engineering, 2015, Vol.86, Issue 2, pp. 86 – 92.

20. Ярымбаш Д.С. Моделирование температурных режимов электротехнологической системы «индукторы - мундштук» на подготовительном этапе тура прессования / Д.С. Ярымбаш, А.В. Тютюнник, О.Л. Загрунный // Електротехніка та електроенергетика. 2006. № 1. - С. 56-60.

21. Коцур М.И. Оценка теплового состояния изоляции асинхронного двигателя с фазным ротором с модифицированной системой импульсного регулирования / М.И. Коцур // Електротехніка та електроенергетика. – 2013 – №1 – С.31-36.

22. Коцур, М. И. Особенности ударного теплового воздействия на асинхронный двигатель с модифицированной системой импульсного регулирования в условиях частых пусков / М. И. Коцур, // Електротехніка та електроенергетика. – 2014 – №1 – С. 32 – 36.

23. Коцур М. И. Повышение эффективности режима торможения противовключением асинхронного двигателя с фазным ротором / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. В. Близняков // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. –2015. – №1/8(73). – С.27-30.

24. Коцур, М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // *Электротехніка та електроенергетика* – 2016. – №1 – С. 5–11.

25. Коцур, М. И. Повышение эффективности электропривода вентиляторных установок / М. И. Коцур, И. М. Коцур, Н. С. Иваницкий, Д. А. Кравченко, В. Г. Савельев // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2017. №25(101) – С. 9 – 16.

26. Kotsur, M.I. Converter for frequency-current slip-power recovery scheme / M.I. Kotsur, P.D. Andrienko, I. M. Kotsur, O.V Bliznyakov // *Naukovyi Visnyk Natsionalnoho Hirnychoho Universytetu*. 2017. - №4 – С. 49-54.

27. Ярымбаш, Д. С. Особенности трехмерного моделирования электромагнитных полей асинхронного двигателя / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика* – 2016. – №2 – С. 43 – 50.

28. Ярымбаш Д.С. Особенности идентификации интенсивности солнечной радиации при проектировании солнечных электростанций / Д. С. Ярымбаш, Ю.В. Даус // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2014 - № 1 - С. 74-78.

29. Yarymbash, D., Kotsur, M., Subbotin, S., Oliinyk, A. A New Simulation Approach of the Electromagnetic Fields in Electrical Machines. IEEE: The International Conference on Information and Digital Technologies, July 5th - 7th, Zilina, 2017, Catalog Number CFP17CDT-USB, pp. 452-457.

30. Ярымбаш, Д. С. Особенности определения параметров схемы замещения асинхронного двигателя для режима короткого замыкания / Д. С. Ярымбаш, М. И. Коцур, С. Т. Ярымбаш, И. М. Коцур // *Електротехніка та електроенергетика* – 2017. – №1 – С. 24 – 30.

31. Дивчук, Т. Э. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Э. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, И. М. Коцур, Ю. С. Безверхняя // *Електротехніка та електроенергетика*. – 2017. – № 2. - С. 56-66.

32. Kotsur, M. A New Approach of the Induction Motor Parameters Determination in Short-Circuit Mode by 3D Electromagnetic Field Simulation [Text] / M. Kotsur, D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kotsur // *International Young Scientists Forum on Applied Physics and Engineering (YSF)*, October 17th - 20th, Lviv, Ukraine, 2017, pp. 207-210

33. Kotsur, M. I. Increasing of Thermal Reliability of a Regulated Induction Motor in Non-Standard Cycle Time Conditions [Text] / M. I. Kotsur, I.M. Kotsur, Yu. Bezverkhnia, D. Andrienko // *IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES)*, 2017, pp. 88-91

34. Yarymbash D. Features of Defining Three-Phase Transformer No-Load Parameters by 3D Modeling Methods [Text] / D. Yarymbash, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk, D. Litvinov // IEEE: International Conference on Modern Electrical and Energy Systems (MEES), 2017, pp. 132-135.

35. Kotsur, M. Speed Synchronization Methods of the Energy-Efficient Electric Drive System for Induction Motors / M. Kotsur, D. Yarymbash, I. Kotsur, Yu. Bezverkhnia // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.

36. Yarymbash, D. An Application of Scheme and Field Models for Simulation of Electromagnetic Processes of Power Transformers [Text] / D. Yarymbash, M. Kotsur, S. Yarymbash, I. Kylymnyk, T. Divchuk // IEEE: 14th International Conference on Advanced Trends in Radioelectronics, Telecommunications and Computer Engineering (TCSET), 2018.

37. Дивчук, Т.Е. Особенности определения параметров силовых трансформаторов методами схемно-полевого моделирования / Дивчук, Т.Е., Д. К. Мимоход, С. А. Кутилин, А. Е. Кузнецов, Ю. В. Гуразда, И. С. Сирых // Электротехника и электроэнергетика. – 2017. – № 1. – С. 61-70.

38. Ярымбаш, Д.С. Идентификация электрических параметров печной петли мощных печей графитации / Д.С. Ярымбаш // «Электротехника и электромеханика». – 2012. №1. – С. 49 – 54.

39. Ярымбаш, Д.С. Особенности контроля электрических параметров, мощности и энергопотребления во время кампании графитации в печи переменного тока / Ярымбаш Д.С., Ярымбаш С.Т., Тютюнник О.В. // Вісник Кременчуцького державного політехнічного університету. – 2006, Вип. 3/2006(38), – С. 53 – 55.

40. Малюшевская А.П. Дослідження впливу підвищених температур на експлуатаційні властивості трансформаторного масла Т-1500 в плівкових ізоляційних системах / АП Малюшевская, АЯ Дмитришин, СО Топоров // Електротехніка та електроенергетика – 2015. - №1. – С. 21-25.

41. Верещаго Е.Н. Модель электрической дуги в MATLAB/SIMULINK / Е.Н. Верещаго, В.И. Костюченко // Електротехніка та електроенергетика. – 2013. - №2. – С. 40-46.

42. Ярымбаш Д. С. Анализ энергоэффективности конструкции торцевых соединений боковых шинных пакетов и токоподводов печей графитации / Д. С. Ярымбаш, А. М. Олейников // Електротехніка та електроенергетика. - 2013. - № 2. - С. 26-34.

43. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 46–49

44. Иванков В. Ф. Электротепловые расчетные модели элементов конструкции трансформаторного оборудования / В. Ф. Иванков, А. В. Басова,

- Н. В. Шульга // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 2. - С. 41-53
45. Ярымбаш Д.С. Особенности расчета электродинамической стойкости шихтованных шинных пакетов короткой сети печи графитации / Д.С. Ярымбаш // Вісник СевНТУ: зб. наук. пр. Вип. 146/2014. Серія: Механіка. Енергетика. Екологія. 2014. – С. 131 – 136.
46. Ярымбаш Д. С. Влияние расположения заготовок электродов на распределение удельной мощности в керне печи Ачесона / Д. С. Ярымбаш // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 5-11
47. Ivankov V. F. Calculation of CFD-thermal models of oil-cooled transformer equipment / V. F. Ivankov, A. V. Basova // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 19-32.
48. Ципленков Д. В. Методи та засоби зниження технічних втрат електроенергії в елементах систем електропостачання / Д. В. Ципленков, П. Ю. Красовський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 77–82.
49. Костін М.О. Енергетичні спектри випадкових процесів тягових напруг і струмів електротранспорту / М. О. Костін // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 71-80
50. Міщенко Т.М. Перспективи схемотехнічних рішень і моделювання підсистем електричної тяги при високошвидкісному русі поїздів / Т. М. Міщенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2014. - № 1. - С. 19-28.
51. Літвінов Д.О. Схемно-польове моделювання теплових процесів в асинхронних двигунах / Д. О. Літвінов, О. О. Шлянін, Т. В. Бондарчук, О. В. Стремідловська, Ріхам Матар // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 71-78
52. Остренко М.В. Расчет потерь в элементах конструкции силовых трансформаторов и реакторов методом конечных элементов с граничными условиями импедансного типа / М. В. Остренко, С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 33-42.
53. Малюшевська А. П. Вплив морфологічних особливостей конденсаторних полімерних плівок на їх деформаційні властивості / А. П. Малюшевська, Г. М. Ющишина // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 13-18.
54. Паталах Д. Г. Численный безытерационный метод моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях / Д. Г. Паталах, С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 2. - С. 50-55.
55. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 48-54.

56. Курись Л. В. Схема тягового електротехнічного комплексу транспортного засобу з накопичувачем енергії / Л. В. Курись, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 4–10.
57. Лебедев В. А. Электропривод малой мощности для сварочного оборудования / В. А. Лебедев // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 11–16.
58. Волкова О. Г. Методика определения температуры поверхности силовых разрывных контактов в процессе коммутации / О. Г. Волкова // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 17–20.
59. Мельников В. О. Компенсація впливу несиметрії обмоток статора асинхронного двигуна у системах векторного керування / В. О. Мельников, А. П. Калінов, І. М. Кочуров // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 26–33.
60. Остренко В. С. Оцінка часу експлуатації IGBT4 модулів в режимі циклічного навантаження / В. С. Остренко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 34–38.
61. Тиховод С. М. Усовершенствование итерационных методов решения систем нелинейных уравнений / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 46–49.
62. Шкрабець Ф. П. Техніко-економічна оцінка оптимального рівня напруги для електроживлення робочих горизонтів глибоких шахт / Ф. П. Шкрабець, О. В. Остапчук, А. В. Кожевников, А. В. Акулов // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 50–54.
63. Волков В. А. Совершенствование частотного пуска гидроагрегата гидроаккумулирующей электростанции в насосном режиме / В. А. Волков, Д. В. Довбишук // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 55–61.
64. Літвінов В. В. Удосконалення методу оцінювання надійності схем релейного захисту / В. В. Літвінов, Я. С. Саченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 62–69.
65. Дьяченко В. В. Формирование программы энергосбережения для систем электроснабжения / В. В. Дьяченко // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 1. - С. 70–76.
66. Тиховод С. М. Расчет переходных процессов в трансформаторах на основе магнитоэлектрических схем замещения с использованием полиномов Чебышёва / С. М. Тиховод // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 5–14.
67. Коваленко М. А. Автономний експериментальний стенд для випробування уніполярного крокового двигуна на базі мікроконтролера / М. А. Коваленко, Д. С. Мацюк // Електротехніка та електроенергетика. - 2015. - № 2. - С. 15–20.

68. Мастиновский Ю. В. Магнитотермоупругое нестационарное деформирование многослойных конструкций / Ю. В. Мастиновский // *Электротехника та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 21-25.

69. Іванков В. Ф. Верифікація методів електротеплових розрахунків електричних реакторів без сталі / В. Ф. Іванков, А. В. Басова, Н. В. Шульга // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 26-34

70. Токмаков И. В. Моделирование электромеханических переходных процессов в асинхронных двигателях на основе использования полиномов чебышёва / И. В. Токмаков // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 35-41.

71. Сидорец В. Н. Особенности анализа распределения тока высокой частоты в осесимметричных электродах электрохирургических инструментов / В. Н. Сидорец, А. Г. Дубко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 42-47.

72. Тиховод С. М. Метод ускоренного численного расчета переходных процессов в электрических цепях на основе аппроксимации решения алгебраическими полиномами / С. М. Тиховод, Т. М. Корнус, Д. Г. Паталах // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 48-54.

73. Волков В. О. Расчет оптимальных тахограмм разгона и торможения частотнорегулируемого асинхронного двигателя / В. О. Волков // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 55-64.

74. Ярымбаш Д. С. Динамическая адаптация схемных моделей короткой сети / Д. С. Ярымбаш, И. М. Килимник, С. Т. Ярымбаш // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 65-70.

75. Міщенко Т. М. Геометричне трактування реактивної потужності та його зв'язок зі спектральним складом тягових напруги та струму швидкісних електровозів / Т. М. Міщенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 81-86.

76. Скалько Ю. С. Удосконалення групового регулювання гідроагрегатів дніпровської гес за допомогою нечіткої логіки / Ю. С. Скалько // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2015. - № 2. - С. 95-99.

77. Коцур М. И. Определение оптимальной частоты коммутации вентилей преобразователя по схеме частотно-токового асинхронно-вентильного каскада / М. И. Коцур, И. М. Коцур, А. А. Андриенко, Д. С. Андриенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 5-11.

78. Малюшевська А. П. Вплив складу і морфології конденсаторних полімерних плівок на термостабільність їх короточасної електричної міцності / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2016. - № 1. - С. 18-24.

79. Цабенко М. В. Системи антипомпажного керування відцентровим компресором / М. В. Цабенко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 35-41.

80. Слободенюк Ю. О. Модель розрахунку миттєвих параметрів режиму системи тягового електропостачання при русі електровозу / Ю. О. Слободенюк, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 42-48.

81. Чередник Н. Г. Дослідження режиму синхронного генератора когенераційної установки при паралельній та автономній роботі з урахуванням явища насичення магнітної системи генератора / Н. Г. Чередник, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 49-56.

82. Власенко Р. В. Корекція алгоритму визначення заданого струму силового активного фільтра на основі теорії фрізе в умовах несиметрії / Р. В. Власенко, О. В. Бялобржеський // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 1. - С. 57-63.

83. Малюшевська А. П. Вплив морфологічних особливостей конденсаторних полімерних плівок на їх деформаційні властивості / А. П. Малюшевська, Г. М. Ющишина // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 13-18.

84. Андрієнко П. Д. Дослідження динамічних режимів електродвигуна послідовного збудження з імпульсними схемами регулювання електроприводу / П. Д. Андрієнко, С. І. Шило, О. О. Каплієнко // Електротехніка та електроенергетика. - 2016. - № 2. - С. 51-58.

85. Золотаревский А. И. Исследование спектральной зависимости диэлектрической проницаемости некоторых полярных диэлектриков в диапазоне низких частот / А. И. Золотаревский, С. П. Лушин // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 6-11.

86. Малюшевська А. П. Довготривала електрична міцність полімерних плівок під дією електричного поля / А. П. Малюшевська, С. О. Топоров, В. І. Гунько // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 12-17.

87. Качан Ю. Г. Застосування просторових електричних полів задля створення теплових перешкод у камерних печах / Ю. Г. Качан, А. А. Візер, А. В. Сибір // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 18-23.

88. Василенко О. В. Модель крокового двигуна для дослідження систем автоматичного позиціонування в ЕСAD / О. В. Василенко, Є. Л. Жавжаров // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 31-38.

89. Дзензерский В. А. Разработка алгоритма автоматизированного контроля электрохимических накопителей энергии / В. А. Дзензерский, Н. Е. Житник, С. В. Плаксин, В. В. Лисунова // Електротехніка та електроенергетика. - 2017. - № 1. - С. 39-47.

90. Волков В. А. Оптимизация времен разгона и торможения позиционных частотнорегулируемых асинхронных электроприводов / В. А. Волков // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 48-60.

91. Алексеевский Д. Г. Определение рабочей области иппн в составе электромеханической системы взу с переменной скоростью вращения / Д. Г. Алексеевский, П. Д. Андриенко, К. О. Турышев, О. О. Панкова // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 1. - С. 79-85.

92. Зиновкин В. В. Влияние нестационарных электромагнитных процессов на электромеханические параметры в синхронном электроприводе / В. В. Зиновкин, Н. Л. Антонов, Ю.А. Крисан // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 6-17.

93. Андриенко П.Д. Моделирование электромагнитных и тепловых процессов при индукционном нагреве мундштука пресса / П.Д. Андриенко, Д.С. Ярымбаш // *Разработка рудных месторождений*. – Кривой Рог, 2008. – Вып. 92. – С. 163 – 167.

94. Zirka S. E. Topological transient models of three-phase five-limb transformer / S. E. Zirka, Y. I. Moroz, C. M. Arturi, D. Bonnman // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 18-25.

95. Мацуї А. М. Теоретичне і експериментальне дослідження магнітоелектричної системи, що сприймає крупність пісків односпірального класифікатора / А. М. Мацуї, В. О. Кондратець // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 38-49.

96. Паталах Д. Г. Численный безытерационный метод моделирования электромеханических процессов в асинхронных двигателях / Д. Г. Паталах, С. М. Тиховод, Т. М. Корнус // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 50-55.

97. Дивчук Т. Е. Подход к определению токов холостого хода силовых трехфазных трансформаторов с плоскими стержневыми магнитными системами / Т. Е. Дивчук, Д. С. Ярымбаш, С. Т. Ярымбаш, И. М. Килимник, М. И. Кокур, Ю. Безверхняя // *Электротехника та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 56-66.

98. Лаврич Ю. М. Методологічний підхід до побудови енергоощадної системи аварійного освітлення / Ю. М. Лаврич, Л. М. Погоріла, А. Ю. Подчасов // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 67-73.

99. Шутенко О. В. Анализ динамики изменения критериев, используемых для интерпретации результатов арг, в исправных высоковольтных трансформаторах негерметичного исполнения / О. В. Шутенко // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 74-83.

100. Лобов В. Й. Управління газоповітряною енергетичною установкою промислового підприємства / В. Й. Лобов, К. В. Лобова, А. В. Даць // *Електротехніка та електроенергетика*. - 2017. - № 2. - С. 84-95.

Додаток А

Табличні дані до контрольної роботи

Таблиця А.1 – Варіанти даних до контрольної роботи

№ варіанта	Потужність S , кВА	Напруга U_L , кВ	Схема з'єднання обмотки	Втрати $P_{\kappa 3}$, кВт	№ варіанта	Потужність S , кВА	Напруга U_L , кВ	Схема з'єднання обмотки	Втрати $P_{\kappa 3}$, кВт
1	10000	16.5	Y	44	28	250	10	Y	3.8
2	16000	16.5	D	44	29	250	0.4	Y	3.8
3	16000	6.6	D	88	30	400	10	Y	5.2
4	16000	11	D	88	31	400	0.4	Y	5.2
5	10000	6.3	Y	60	32	630	10	Y	7.4
6	10000	6.6	Y	60	33	630	0.4	Y	7.4
7	10000	10.5	Y	81	34	2500	11	D	23.5
8	10000	6.3	Y	81	35	2500	10	Y	23.5
9	10000	11	Y	85	36	2500	3.15	D	23.5
10	10000	6.3	D	85	37	2500	3.5	D	23.5
11	16000	6.3	D	85	38	4000	6.3	D	33.5
12	16000	6.3	Y	85	39	4000	3.15	D	33.5
13	16000	10.5	D	85	40	4000	20	Y	33.5
14	16000	10.5	Y	85	41	6000	3.15	D	46.5
15	16000	36.75	Y	85	42	6000	6.3	D	46.5
16	10000	36.75	Y	85	43	6000	10.5	D	46.5
17	6300	35	Y	46.5	44	1000	10.5	D	11.6
18	4000	35	Y	33.5	45	1000	6.3	D	11.6
19	2500	35	Y	23.5	46	1000	3.15	D	12.2
20	50	0.4	Y	0.95	47	1000	0.4	Y	12.2
21	63	10	Y	1.025	48	1600	6.3	D	18
22	63	0.4	Y	1.025	49	1600	0.4	Y	18
23	70	10	Y	1.3	50	1600	10.5	D	16.5
24	100	10	Y	1.935	51	1600	6.3	D	18
25	100	0.4	Y	1.935	52	2500	6.3	D	23.5
26	160	0.4	Y	2.65	53	2500	10.5	D	23.5
27	160	10	Y	2.65	54	2500	20	Y	23.5

Примітка. Для всіх варіантів контрольної роботи частота мережі $f = 50$ Гц, кількість фаз $m = 3$.

Таблиця А.3 – Орієнтовні радіальні розміри дроту a , мм

Число прошарків	Cu: Додаткові втрати до				Al: Додаткові втрати до			
	5%	10%	15%	20%	5 %	10%	15%	20%
1	9.0	10.6	11.8	13.2	11.8	13.2	15.0	16.0
2	6.3	7.5	8.5	9.0	8.0	10.0	10.6	11.8
3	5.3	6.3	6.7	7.5	6.7	8.0	8.5	9.5
4	4.5	5.3	6.0	6.3	5.6	6.7	7.5	8.0
5	4.0	4.75	5.3	5.6	5.0	6.0	6.7	7.5
6	3.75	4.5	4.75	5.3	4.75	5.6	6.0	6.7
7	3.35	4.0	4.5	4.75	4.5	5.0	5.6	6.0
8	3.35	3.75	4.25	4.5	4.0	4.75	5.6	5.6
9	3.15	3.55	4.0	4.25	3.75	4.5	5.0	5.6
10	3.0	3.55	4.0	4.25	3.75	4.5	5.0	5.6

Таблиця А.4 – 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

Таблиця А.5 – 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

Додаток Б

Приклади розрахунку обмоток трансформатора

Б.1 Приклад розрахунку гвинтової обмотки

Початкові дані контрольної роботи (Дод. А, табл. А.1)

Номінальна потужність	$S = 1600 \text{ кВА}$
Напруга обмотки	$U_L = 690 \text{ В}$
Схема з'єднання обмотки	„зірка”
Втрати короткого замикання	$P_{K3} = 18 \text{ кВт}$
Частота мережі	$f = 50 \text{ Гц}$
Кількість фаз	$m = 3$

Б.1.1 Розрахунок основних електричних величин

Номінальний лінійний струм обмотки по (3.1)

$$I_L = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_L},$$

$$I_L = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 690} = 1338.783 \text{ А.}$$

Номінальні фазні струм та напруга обмотки по (3.2) при схемі з'єднання обмотки «зірка»

$$I_\phi = I_L, \quad I_\phi = 1338.783 \text{ А,}$$

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3}, \quad U_\phi = 398.372 \text{ В.}$$

Випробувальна напруга обмотки (табл. 3.1) $U_{ВИПР} = 5 \text{ кВ.}$

Б.1.2 Визначення основних розмірів

Обираємо рекомендоване значення діаметру стрижня $d = 0.28$ (табл. 3.2). Приймаємо нормалізоване значення діаметру стрижня $d = 0.28$ (табл. 3.3).

Рекомендоване значення відношення середньої довжини окружності каналу між обмотками до висоти обмотки β знаходиться в межах 2.0 – 2.6 (табл. 3.4), приймаємо $\beta = 2$.

Постійна $a = 1.4$ для мідних обмоток (табл. 3.4).

Середній діаметр каналу між обмотками по (3.3)

$$d_{12} = a \cdot d,$$

$$d_{12} = 1.4 \cdot 0.28 = 0.392 \text{ м.}$$

Орієнтовна висота обмотки по (3.4)

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta},$$

$$l = \frac{\pi \cdot 0.392}{2} = 0.616 \text{ м.}$$

Коефіцієнт заповнення сталлю прийемо $k_3 = 0.97$.

Фактична площа перерізу стрижня $\Pi_{\Phi C} = 0.05562 \text{ м}^2$ (табл. 3.5).

Активна площа перерізу стрижня по (3.5)

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\Phi C},$$

$$\Pi_c = 0.97 \cdot 0.05562 = 0.05395 \text{ м}^2.$$

Індукція в стрижні магнітної системи $B_c = 1.6 \text{ Тл}$ (табл. 3.6).

Б.1.3 Розрахунок обмотки

Попереднє значення напруги витка по (3.6)

$$u_\phi = 4.44 f \cdot B_c \cdot \Pi_c,$$

$$u_\phi = 4.44 \cdot 50 \cdot 1.6 \cdot 0.05395 = 19.164 \text{ В.}$$

Число витків обмотки НН по (3.7)

$$w = U_\phi / u_\phi,$$

$$w = 398.372 / 19.164 = 20.788,$$

приймаємо $w = 21$ виток.

Перерахуємо уточнену напругу витка по (3.8)

$$u_\phi = U_\phi / w,$$

$$u_\phi = 398.372 / 21 = 18.97 \text{ В.}$$

Коефіцієнт додаткових втрат $k_d = 0.91$ (табл. 3.7).

Середня густина струму по (3.9)

$$J = 0.746 \cdot k_d \cdot \frac{P_{K3} \cdot u_\phi}{S \cdot d_{12}^{10^4}},$$

$$J = 0.746 \cdot 0.91 \cdot \frac{18000 \cdot 18.97}{1600 \cdot 0.392} \cdot 10^4 = 3.696 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Орієнтовний переріз витка обмотки по (3.10)

$$\Pi'_\phi = I_\phi / J,$$

$$\Pi'_\phi = 1338.783 / (3.696 \cdot 10^6) = 362.24 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

У відповідності із табл. 3.8 обираємо тип обмотки – обмотка гвинтова з прямокутного дроту. Приймаємо висоту радіального каналу $h_k = 0.004 \text{ м}$.

Осьовий розмір витка одноходової обмотки по (3.22)

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

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

При $h_g \geq 0.0155 \text{ м}$ (див. табл. 3.11) доцільно використовувати двоходову гвинтову обмотку.

Осьовий розмір витка двоходової обмотки по (3.23)

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

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

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 b по припустимій густині теплового потоку $q=1400 \text{ Вт/м}^2$ при $k_3 = 1$ по (3.24)

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

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

Враховуючи обмеження, двоходову гвинтову обмотку намотуємо 12 паралельними дротами ($n_{nap} = 12$) марки ПБ – $12 \times \frac{3.55 \times 9.5}{0.5}$ (3.11) з перерізом

$\Pi_{np} = 33.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ (дод. А, табл. А.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 по (3.11)

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

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

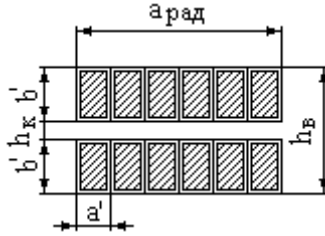


Рисунок Б.1 – Двохшарова гвинтова обмотка з рівномірно розподіленою транспозицією з 12 паралельних дротів

Переріз витка обмотки по (3.12)

$$\Pi_{\phi} = n_{\text{нар}} \cdot \Pi_{\text{пр}},$$

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

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 по (3.27)

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

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

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

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

Радіальний розмір обмотки (див рис. Б.1)

$$a_{\text{рад}} = a' \cdot n_{\text{нар}} / 2,$$

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

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 3.9, див. примітку) $a_{01} = 0.015 \text{ м}$.

Внутрішній діаметр обмотки по (3.14)

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

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

Зовнішній діаметр обмотки по (3.15)

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

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

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β по (3.17) 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 по (3.16) 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 по (3.19)

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

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

Маса метала обмотки по (3.20)

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

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

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 по (3.21)

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

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

Б.2 Приклад розрахунку котушкової обмотки

Початкові дані контрольної роботи (Дод. А, табл. А.1)

Номинальна потужність	$S = 1600 \text{ кВА}$
Лінійна напруга обмотки	$U_L = 6300 \text{ В}$
Схема з'єднання обмотки	„зірка”
Втрати КЗ	$P_{KЗ} = 14.5 \text{ кВт}$
Частота мережі	$f = 50 \text{ Гц}$
Кількість фаз	$m = 3$

Б.2.1 Розрахунок основних електричних величин

Номинальний лінійний струм обмотки по (3.1)

$$I_L = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_L},$$

$$I_L = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 6300} = 146.629 \text{ А.}$$

Номинальні фазні струм та напруга обмотки по (3.2) при схемі з'єднання обмотки «зірка»

$$I_\phi = I_L, \quad I_\phi = 146.629 \text{ А,}$$

$$U_\phi = U_L / \sqrt{3}, \quad U_\phi = 6300 / \sqrt{3} = 3637.307 \text{ В.}$$

Випробувальна напруга обмотки (табл. 3.1) $U_{ВИПР} = 25 \text{ кВ.}$

Б.2.2 Визначення основних розмірів

Обираємо рекомендоване значення діаметру стрижня $d = 0.29$ (табл. 3.2). Приймаємо нормалізоване значення діаметру стрижня $d = 0.29$ (табл. 3.3).

Рекомендоване значення відношення середньої довжини окружності каналу між обмотками до висоти обмотки β знаходиться в межах 2.0 – 2.6 (табл. 3.4), приймаємо $\beta = 2$.

Постійна $a = 1.4$ для мідних обмоток (табл. 3.4).

Середній діаметр каналу між обмотками по (3.3)

$$d_{12} = a \cdot d,$$

$$d_{12} = 1.4 \cdot 0.29 = 0.406 \text{ м.}$$

Орієнтовна висота обмотки по (3.4)

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta},$$

$$l = \frac{\pi \cdot 0.406}{2} = 0.638 \text{ м.}$$

Коефіцієнт заповнення сталлю прийемо $k_3 = 0.97$.

Фактична площа перерізу стрижня $\Pi_{\phi C} = 0.0594 \text{ м}^2$ (табл. 3.5).

Активна площа перерізу стрижня по (3.5)

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\phi C},$$

$$\Pi_c = 0.97 \cdot 0.0594 = 0.05762 \text{ м}^2.$$

Індукція в стрижні магнітної системи $B_c = 1.62 \text{ Тл}$ (табл. 3.6).

Б.2.3 Розрахунок обмотки

Попереднє значення напруги витка по (3.6)

$$u_\phi = 4.44 f \cdot B_c \cdot \Pi_c,$$

$$u_\phi = 4.44 \cdot 50 \cdot 1.62 \cdot 0.05762 = 20.722 \text{ В.}$$

Число витків обмотки НН по (3.7)

$$w = U_\phi / u_\phi,$$

$$w = 3637.307 / 20.722 = 175.531,$$

прийемо $w = 176$ витків.

Перерахуємо уточнену напругу витка по (3.8)

$$u_\phi = U_\phi / w,$$

$$u_\phi = 3637.307 / 176 = 20.667 \text{ В.}$$

Коефіцієнт додаткових втрат $k_d = 0.91$ (табл. 3.7).

Середня густина струму по (3.9)

$$J = 0.746 \cdot k_d \cdot \frac{P_{K3} \cdot u_\phi}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4,$$

$$J = 0.746 \cdot 0.91 \cdot \frac{14500 \cdot 20.667}{1600 \cdot 0.406} \cdot 10^4 = 3.132 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Орієнтовний переріз витка обмотки по (3.10)

$$\Pi'_\phi = I_\phi / J,$$

$$\Pi'_\phi = 146.629 / (3.132 \cdot 10^6) = 46.822 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

Розрахуємо максимальний осьовий розмір дроту b по припустимій густині теплового потоку $q = 1200 \text{ Вт/м}^2$ при $k_3 = 1$ по (3.24)

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

$$b_m = \frac{11200}{1.07 \cdot (3.132 \cdot 10^6)^2 \cdot 10^{-8}} = 0.0114 \text{ м.}$$

У відповідності із табл. 3.8 обираємо тип обмотки – обмотка безперервна котушкова з прямокутного дроту. Приймаємо висоту радіального каналу $h_k = 0.005 \text{ м.}$

Котушкову обмотку намотуємо прямокутним дротом ($n_{нар} = 1$) марки ПБ – $1 \times \frac{4.25 \times 11.2}{0.5}$ з перерізом $\Pi_{np} = 46.7 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ (дод. А, табл. А.2) та товщиною ізоляції на один бік $\delta = 0.25 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$ Число рейок по колу обмотки – $n_p = 12$ (дод. А, табл. А.5).

Розміри голого дроту

$$a = 4.25 \cdot 10^{-3} \text{ м,}$$

$$b = 11.2 \cdot 10^{-3} \text{ м.}$$

Розміри дроту в ізоляції по (3.11)

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

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

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

Переріз витка обмотки по (3.12)

$$\Pi_g = n_{нар} \cdot \Pi_{np},$$

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

Густина струму в обмотці по (3.13)

$$J = I_\phi / \Pi_g,$$

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

Кількість котушок на одному стрижні по (3.29)

$$n_{ком} = \frac{l}{b' + h_k},$$

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

приймаємо $n_{ком} = 38$ котушок.

Число витків в котушці орієнтовно по (3.31)

$$w_{ком} = \frac{w}{n_{ком}},$$

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

Для розрахунку радіального розміру обмотки приймаємо $w_{\text{ком}} = 5$.

Розкладка витків по котушкам 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 $w_{\text{ком}} = 4.632$. Знаменником дробу обирають число рейок по колу обмотки (дод. А, табл. А.5). В нашому випадку $n_p = 12$.

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

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

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 А = 22, типу Б = $n_{\text{ком}} - A = 38 - 22 = 16$.

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.1)

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

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

Висота обмотки по (3.32)

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

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.1 – 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)

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

Радіальний розмір обмотки по (3.34)

$$a_{pad} = a' \cdot n_{nap} \cdot w_{ком},$$

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

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 3.9, див. примітку) $a_{01} = 0.015$ м.

Внутрішній діаметр обмотки по (3.14)

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

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

Зовнішній діаметр обмотки по (3.15)

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

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

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β по (3.17) при кількості дрітків, паралельних лініям магнітної індукції $m = n_{ком}$

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

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

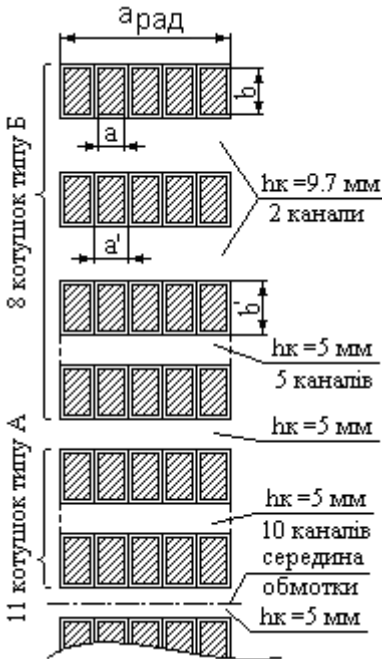


Рисунок Б.2 – Розташування котушок та радіальних каналів

та коефіцієнт додаткових втрат k_d по (3.16) при кількості дрітків, перпендикулярних лініям магнітної індукції $n = w_{ком}$

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

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

Густина теплового потоку на поверхні обмотки по (3.19)

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

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

Маса металу обмотки по (3.20)

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

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

Коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції із табл. 3.10 - $k_{i3} = 1.5 \% = 0.015$ в.о. від маси металу обмотки.

Маса дроту з урахуванням ізоляції по (3.21)

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

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

Б.3 Приклад розрахунку циліндричної багатошарової обмотки

Початкові дані контрольної роботи (Дод. А, табл. А.1)

Номинальна потужність	$S = 1600 \text{ кВА}$
Напруга обмотки	$U_L = 11000 \text{ В}$
Схема з'єднання обмотки	„трикутник”
Втрати КЗ	$P_{K3} = 14.5 \text{ кВт}$
Частота мережі	$f = 50 \text{ Гц}$
Кількість фаз	$m = 3$

Б.3.1 Розрахунок основних електричних величин

Номинальний лінійний струм обмотки по (3.1)

$$I_L = \frac{S \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot U_L},$$

$$I_L = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 11000} = 83.978 \text{ А.}$$

Номинальні фазні струм та напруга обмотки по (3.2) при схемі з'єднання обмотки «трикутник»

$$I_\phi = I_L / \sqrt{3}, \quad I_\phi = 83.978 / \sqrt{3} = 48.485 \text{ А,}$$

$$U_\phi = U_L, \quad U_\phi = 11000 \text{ В.}$$

Випробувальна напруга обмотки (табл. 3.1) $U_{ВИПР} = 35 \text{ кВ.}$

Б.3.2 Визначення основних розмірів

Обираємо рекомендоване значення діаметру стрижня $d = 0.29$ (табл. 3.2). Приймаємо нормалізоване значення діаметру стрижня $d = 0.29$ (табл. 3.3).

Рекомендоване значення відношення середньої довжини окружності каналу між обмотками до висоти обмотки β знаходиться в межах 1.8 – 2.4 (табл. 3.4), приймаємо $\beta = 2$.

Постійна $a = 1.4$ для мідних обмоток (табл. 3.4).

Середній діаметр каналу між обмотками по (3.3)

$$d_{12} = a \cdot d,$$

$$d_{12} = 1.4 \cdot 0.29 = 0.406 \text{ м.}$$

Орієнтовна висота обмотки по (3.4)

$$l = \frac{\pi \cdot d_{12}}{\beta},$$

$$l = \frac{\pi \cdot 0.406}{2} = 0.638 \text{ м.}$$

Коефіцієнт заповнення сталлю приймемо $k_3 = 0.97$.

Фактична площа перерізу стрижня $\Pi_{\phi C} = 0.0594 \text{ м}^2$ (табл. 3.5).

Активна площа перерізу стрижня по (3.5)

$$\Pi_c = k_3 \cdot \Pi_{\phi C},$$

$$\Pi_c = 0.97 \cdot 0.0594 = 0.05762 \text{ м}^2.$$

Індукція в стрижні магнітної системи $B_c = 1.62 \text{ Тл}$ (табл. 3.6).

Б.3.3 Розрахунок обмотки

Попереднє значення напруги витка по (3.6)

$$u_\phi = 4.44 f \cdot B_c \cdot \Pi_c,$$

$$u_\phi = 4.44 \cdot 50 \cdot 1.62 \cdot 0.05762 = 20.722 \text{ В.}$$

Число витків обмотки НН по (3.7)

$$w = U_\phi / u_\phi,$$

$$w = 11000 / 20.722 = 530.844,$$

приймемо $w = 531$ виток.

Перерахуємо уточнену напругу витка по (3.8)

$$u_\phi = U_\phi / w,$$

$$u_\phi = 11000 / 531 = 20.716 \text{ В.}$$

Коефіцієнт додаткових втрат $k_d = 0.91$ (табл. 3.7).

Середня густина струму по (3.9)

$$J = 0.746 \cdot k_d \cdot \frac{P_{K3} \cdot u_\phi}{S \cdot d_{12}} \cdot 10^4,$$

$$J = 0.746 \cdot 0.91 \cdot \frac{14500 \cdot 20.716}{1600 \cdot 0.406} \cdot 10^4 = 3.139 \cdot 10^6 \text{ А/м}^2.$$

Орієнтовний переріз витка обмотки по (3.10)

$$\Pi'_\phi = I_\phi / J,$$

$$\Pi'_\phi = 48.485 / (3.139 \cdot 10^6) = 15.446 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

У відповідності із табл. 3.8 обираємо тип обмотки – обмотка багатопарова циліндрична з прямокутного дроту.

Обмотку намотуємо прямокутним проводом ($n_{nap} = 1$) марки

$ПБ - 1 \times \frac{2.5 \times 6.3}{0.5}$ з перерізом $П_{np} = 15.2 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2$ 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 по (3.11)

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

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

Переріз витка обмотки по (3.12)

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

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

Густина струму в обмотці по (3.13)

$$J = I_{\phi} / П_{\epsilon},$$

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

Число витків у прошарку по (3.46)

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

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

приймаємо $w_n = 93$ витки.

Число прошарків в обмотці по (3.47)

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

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

приймаємо $n_n = 6$ катушок.

Межове значення більшого з двох розмірів дроту (3.24), 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 (3.45)

$$b_m = a \cdot n_n,$$

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

більш ніж припустиме $b_m > b_m$, тому обмотку поділяємо на два концентри: внутрішній у два прошарки та зовнішній у чотири. Між концентриями виконується осевий канал охолодження $n_k = 1$ шириною $a_k = 0.007 \text{ м}$ (табл. 3.13).

Напруга двох прошарків обмотки по (3.42)

$$U_{2n} = 2 \cdot w_n \cdot u_6,$$

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

Міжшарова ізоляція $n_\delta = 6$ прошарків кабельного паперу (дод. А, табл. А.4) товщиною $\delta_{ми} = 0.12 \cdot 10^{-3} \text{ м}$.

Радіальний розмір обмотки без екрана по (3.48)

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

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

Радіальний розмір обмотки з екраном та його ізоляцією по (3.43)

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

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

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

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

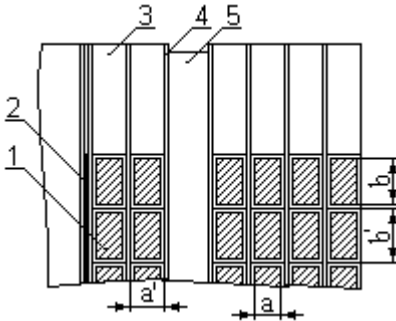
Коефіцієнт усадки обмотки після сушіння та опресування $k=0.95$.

Висота обмотки

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

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

Радіальна ізоляційна відстань від стрижня до обмотки (табл. 3.9, 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 по (3.14)

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

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

Зовнішній діаметр обмотки по (3.15)

$$D'' = D' + 2a_{\text{екр}},$$

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

Для визначення густини теплового потоку на поверхні обмотки необхідно розрахувати коефіцієнт β по (3.17) при кількості дрітів, 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_{∂} по (3.16) при кількості дрітів, 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 по (3.18)

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

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

Маса метала обмотки по (3.20)

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

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

Коефіцієнт збільшення маси прямокутного мідного дроту марки ПБ за рахунок ізоляції із табл. 3.10 – $k_{i3} = 3 \% = 0.03$ в.о. від маси метала обмотки.

Маса дроту з урахуванням ізоляції по (3.21)

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

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

Додаток В
Приклад оформлення титульної сторінки
контрольної роботи

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Запорізький національний технічний університет

Кафедра «Електричні машини»

Номер залікової книжки _____

КОНТРОЛЬНА РОБОТА

з дисципліни «Інженерне проектування
електричних машин та трансформаторів»
на тему: «ТАНСФОРМАТОР»

Виконав
ст. гр. _____

І.І. Іваненко

Перевірів

П.П. Петренко