

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОЕНЕРГОТЕХНІКИ ТА АВТОМАТИКИ

КАФЕДРА ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

**Основи автоматизованого проєктування електричних машин. Частина 1.
Практичні заняття**

*Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для студентів, які навчаються за
спеціальністю
141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»,
G3 Електрична інженерія,
освітньою програмою
«Електричні машини і апарати»*

Основи автоматизованого проєктування електричних машин. Частина 1. Практичні заняття [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», G3 Електрична інженерія, освітньої програми «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: В.В. Чумак, М.О. Реуцький, С.С. Цивінський, О.В. Вишневський. – Електронні текстові дані (1 файл: 2,03 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025 - 50 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № 3 від 12.12.2025 р.)
за поданням Вченої ради ФЕА
(протокол № 5 від 24.11.2025 р.)*

Електронне мережне навчальне видання

**Основи автоматизованого проєктування електричних машин. Частина 1.
Практичні заняття**

Укладачі	Чумак Вадим Володимирович, канд. техн. наук, доц. Реуцький Микола Олександрович, канд. техн. наук, доц. Цивінський Сергій Станіславович, канд. техн. наук, доц. Вишневський Олексій Володимирович, асистент
Відповідальний редактор	Гераскін Олександр Анатолійович, канд. техн. наук, доц.
Рецензент	Островерхов М. Я., професор, д.т.н., проф., КПІ ім. Ігоря Сікорського

Представлено методичні рекомендації до вирішення практичних задач щодо проєктування силових трансформаторів та електричних машин.

Навчальний посібник призначений для бакалаврів, що навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні машини і апарати».

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025

Зміст

Вступ	4
1. Визначення основних розмірів електричних машин і трансформаторів	5
1.1. Визначення розрахункової потужності.....	5
Питання для самоконтролю	8
1.2. Зв'язок розрахункової потужності з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями та частотою обертання	8
Питання для самоконтролю	12
1.3. Визначення основних розмірів	13
Питання для самоконтролю	18
1.4. Геометрично подібний ряд	18
Питання для самоконтролю	21
2. Проектування трансформаторів	22
2.1. Розрахунок геометричних розмірів трансформатора	22
Питання для самоконтролю	26
2.2. Вибір конструкції і розрахунок обмоток	27
Питання для самоконтролю	30
2.3. Розрахунок параметрів КЗ	31
Питання для самоконтролю	34
2.4. Механічні сили і нагрів обмоток при аварійному КЗ	34
Питання для самоконтролю	36
2.5. Розрахунок магнітного кола	37
Питання для самоконтролю	42
2.6. Тепловий розрахунок.....	42
Питання для самоконтролю	49
Список використаної літератури.....	50

Вступ

Використання сучасних методик проектування разом з відомими засобами оптимізації дозволяє САПР створити найбільш ефективний електромеханічний перетворювач енергії (ЕМПЕ) з урахуванням технічних вимог.

У цілому САПР складається з багатьох окремих підпрограм і фрагментів, які створені на базі знання багатьох навчальних дисциплін: "Фізика", "Теоретичні основи електротехніки", "Електричні машини", "Прикладна механіка", "Технологія та виробництво електричних машин і трансформаторів" і низка інших.

Метою даного навчального посібника є використання отриманих знань, їх поглиблення та загальне розуміння проектування ЕМПЕ, яке використовується у САПР.

Поставлена мета досягається розв'язанням конкретних фрагментарних задач, які складені на базі відомостей реальних ЕМПЕ. Задачі даного навчального посібника подані для першої частини дисципліни, що присвячена проектуванню ЕМПЕ.

У першому розділі посібника наведені задачі по загальним основам проектування, а у другому – задачі по силовим трансформаторам загального призначення.

Кожний розділ складається з підрозділів, які мають однотипні задачі на певні етапи (фрагменти) проектування. Кожний підрозділ складається з викладення скорочених теоретичних відомостей, які є потрібною основою для розв'язання наведених задач у підрозділі, задач та питань для самоконтролю знань. Крім того, у кожному підрозділі є посилання на методичні посібники та довідкову літературу.

Така побудова методичних вказівок дозволяє використовувати кожний підрозділ як окрему тему практичного заняття.

1. Визначення основних розмірів електричних машин і трансформаторів

Електричні машини різних типів потужністю від декількох ват до сотень тисяч кіловат в одиниці, з робочими напругами від декількох вольт до десятків кіловольт, а в трансформаторах – і до сотень кіловольт, з частотою обертання від десятків тисяч оборотів за хвилину до нуля (моментні двигуни, установки із загальмованим ротором, статичні електромагнітні перетворювачі) знаходять широке застосування в промисловості, енергетиці, на транспорті та інших галузях діяльності людини.

Ці електромеханічні та електромагнітні перетворювачі енергії характеризуються однотипними фізичними процесами, описуються однотипними математичними моделями і підкоряються загальним кількісним закономірностям, які визначають зв'язок між електромагнітною потужністю перетворювача, з одного боку, і розмірами і масою його – з іншою.

Разом з головною вимогою - забезпечити перетворення заданої потужності при проектуванні електричної машини або трансформатора – потрібно врахувати вимоги експлуатації, тобто забезпечити потрібні робочі характеристики або певні параметри. Крім того, для надійної роботи спроектованого перетворювача обов'язково треба забезпечити електричну, теплову та механічну міцності конструкції при високій економічності і технологічності виробу.

Максимально задовольнити перераховані вимоги важко, оскільки деякі з них носять суперечливий характер. Звичайно при проектуванні постає задача якнайповнішого виконання одного або декількох основних вимог (критеріїв оптимальності). Наприклад, для електричних машин і трансформаторів загального призначення основна вимога – мінімум витрат (при виробництві і експлуатації).

Необхідність виконання технічних вимог обумовлює проведення повторних розрахунків з метою уточнення і вибору якнайкращого варіанту, тобто проектування перетворювача є істотно нелінійним і підрозділяється на ряд окремих розрахунків, за допомогою яких виконуються певні вимоги.

Визначення основних геометричних розмірів перетворювачів – важлива і відповідальна задача при проектуванні. Тому в курсі "Основи автоматизованого проектування електричних машин" розглядаються основні співвідношення, що зв'язують розрахункову потужність перетворювача з геометричними розмірами, електромагнітними навантаженнями, частотою обертання і рядом інших факторів.

1.1. Визначення розрахункової потужності

Під розрахунковою потужністю (або електромагнітною) розуміють потужність, яка повинна бути перетворена в електричній машині або трансформаторі за рахунок електромагнітної взаємодії з метою отримання заданої корисної потужності на виході. В електричних машинах електромагнітна потужність передається через повітряний проміжок, а в трансформаторах – через магнітопровід.

В загальному випадку розрахункова потужність дорівнює електромагнітній:

$$S_{em} = m \cdot E_{\phi n} \cdot I_{\phi n}, \quad (1.1)$$

де m – число фаз; для машин постійного струму $m=1$.

Номінальну ЕРС фази якірної обмотки розраховують по номінальній фазній напрузі:

$$E_{\phi n} = K_E \cdot U_{\phi n}, \quad (1.2)$$

де коефіцієнт K_E враховує величину та характер номінального коефіцієнта потужності $\cos\varphi_n$, а також опір якірної обмотки.

Числове значення коефіцієнта K_E приблизно можна знайти як

$$K_E = 1 \pm Z_1^* = 1 \pm (r^* \cdot \cos\varphi_n + x^* \cdot \sin\varphi_n), \quad (1.3)$$

де опори якоря подані у відносних одиницях; знак "плюс" відповідає режиму генератора, а "мінус" – режиму двигуна; $Z_1^* = (Z_1 I_{\phi n}) / U_{\phi n}$ – опір якірної обмотки у відносних одиницях, яким можна задатись на початковій стадії проектування, враховуючи його значення у відомих конструктивних прототипів.

Зазвичай K_E приймають для генераторів від 1,02...1,05, а для двигунів – 0,93...0,96. Менші значення відносяться до більш потужних ЕМПЕ.

Обов'язково в технічному завданні на проект задається корисна потужність на виході, яка для генератора

$$P_{2n} = m U_{\phi n} I_{\phi n} \cos\varphi_n, \quad (1.4)$$

а для двигуна

$$P_{2n} = M_{2n} \omega_n, \quad (1.5)$$

Розрахункова потужність в загальному випадку для генератора

$$S_{em} = \frac{K_E P_{2n}}{\cos\varphi_n}, \quad (1.6)$$

а для двигуна

$$S_{em} = \frac{K_E P_{2n}}{\eta \cos\varphi_n}, \quad (1.7)$$

де $\cos\varphi_n = 1$ для машин постійного струму.

Розрахункову потужність при проектуванні силових трансформаторів звичайно приймають рівну номінальній потужності. При проектуванні мікротрансформаторів розрахункову потужність визначають по виразу (1.1).

Задача 1.1. Визначити розрахункову потужність трифазних силових трансформаторів, дані яких наведені у табл. 1.1.

Таблиця 1.1

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна лінійна напруга, $U_{\phi n}$, кВ	6	10	20	35	35	38,5
Номінальний лінійний струм, $I_{\phi n}$, А	38,6	36,4	28,9	41,3	66,1	60,1

Задача 1.2. Визначити номінальні фазні струми і напруги трифазних силових трансформаторів, дані яких наведені у табл. 1.2.

Таблиця 1.2

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Розрахункова потужність, S_n , кВ·А	100	630	1000	4000	6300	40000
Номінальна лінійна напруга, кВ: обмотки ВН $U_{вн}$, обмотки НН $U_{нн}$	10 0,4	6 0,4	10 0,69	15,75 6,3	20 10,5	38,5 6,3
Схема і група з'єднання обмоток	Y/ZH-11	Y/Ун-0	Д/Ун-11	У/Д-11	У/Д-11	У/Д-11

Задача 1.3. Визначити розрахункову потужність двигунів постійного струму, дані яких наведені у табл. 1.3.

Таблиця 1.3

Величини	Варіанти					
	1	2	5	4	5	6
Типорозміри машин	2ПН112L	2ГН160L	2ПН200M	2ПН280M	2ПН315M	2ПН315L
Номінальна потужність, P_{2n} , кВт	2,2	11,0	22,0	110,0	160,0	200,0
ККД, %	70,0	85,5	87,5	89,5	90,0	91,0

Задача 1.4. Визначити номінальну частоту обертання, номінальний момент і розрахункову потужність трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим ротором серії 4А, які мають підвищений пусковий момент і ступінь захисту IP44. Дані для розрахунку наведені у табл. 1.4.

Таблиця 1.4

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип двигуна	4AP160 S8Y3	4AP225 M8Y3	4AP200 L6Y3	4AP250 M6Y3	4AP180 M4Y3	4AP250 M4Y3
Номінальна потужність, P_{2n} , кВт	7,5	30	30	55	30	30
ККД, %	86,0	90,0	90,5	91,5	90,0	93,0
Коефіцієнт потужності при номінальному навантаженні, $\cos\varphi_n$	0,75	0,8	0,86	0,83	0,87	0,88
Номінальне ковзання, s_n , %	2,66	2,0	2,5	2,0	2,66	1,66

Задача 1.5. У табл. 1.5 наведені основні відомості потужних трифазних асинхронних двигунів. Потрібно визначити їх синхронну частоту обертання і розрахункову потужність. Зазвичай з'єднання обмоток статора – "зірка".

Таблиця 1.5

Варіанти	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	$\cos\varphi_n$	ККД, %
1	АЧ-400Х-4УЗ	630	6000	0,87	94,8

Таблиця 1.5

Варіанти	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	$\cos\varphi_n$	ККД, %
2	A02-21-49-16Y1	3150	6000	0,85	95,3
3	A0K-99/64-10Y1	400	10000	0,86	92,9
4	A4-85-50-6Y3	500	10000	0,83	94,2
5	ДА304-85/62-8Y1	400	10000	0,84	93,8
6	AKH2-18-43-12УХЛ4	1600	6000	0,85	94,6

Задача 1.6. Визначити номінальну частоту обертання і розрахункову потужність потужних синхронних машин, дані яких наведені у табл. 1.6. З'єднання обмоток якоря таких машин, зазвичай, - "зірка".

Таблиця 1.6

№ п/п	Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	ККД, %	Коефіцієнт потужності
1	ДСЗ-21-74-16МУХЛ4	12500	6000	97,3	0,9
2	СДНЗ-2-18-34-24УХЛ4	500	6000	92,8	0,9
3	СДМЗ-2-22-43-60УХЛ4	1600	6000	93,6	0,9
4	СДЗ-2-800-1500УЗ	800	6000	95,6	0,9
5	СДКП2-18-34-16УХЛ4	1000	6000	94,6	0,9
6	СГД-16-84-6УХЛ4	3500	10500	95,9	0,8

Питання для самоконтролю

1. Дати визначення розрахункової (електромагнітної) потужності.
2. Записати загальний вираз для розрахункової потужності. Пояснити значення та указати можливі величини коефіцієнта K_E .
3. Записати вирази для розрахункових потужностей відомих ЕМПЕ.
4. При розрахунках ЕМПЕ використовують лінійні чи фазні значення напруг і струмів?
5. Які значення напруг і струмів наводять у паспорті даних трансформаторів та електричних машин?
6. Що означає позначення IP?
7. Що розуміють під висотою вісі обертання?
8. Як позначають кліматичне виконання?
9. Що таке категорія розміщення?
10. Позначення найбільш поширених серій трансформаторів і електричних машин.

1.2. Зв'язок розрахункової потужності з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями та частотою обертання

Розрахункову потужність (1.1) у загальному випадку можна представити, в залежності від основних розмірів і електромагнітних навантажень, як

$$S_{em} = k \cdot (D^2 \cdot l) \cdot (B \cdot A) \cdot n, \quad (1.8)$$

де пояснення щодо величин, які входять у (1.8), наведені у табл. 1.7.

Таблиця 1.7

Тип перетворювача	Конструктивний коефіцієнт k	Діаметр $D, м$	Довжина $l, м$	Індукція $B, Тл$	Лінійне навантаження $A, А/м$	Частота обертання
Машина змінного струму	$k = \frac{\pi^2 K_{об1}}{\sqrt{2}}$	Розточки якоря	Розрахункова (активної частини) $l = l_\delta$	У повітряному проміжку B_δ	По колу якоря	$n_1, об/с$
Машина постійного струму	$k = \pi^2 \cdot \alpha_\delta$	Зовнішнього якоря	Розрахункова (активної частини) $l = l_\delta$	У повітряному проміжку B_δ	По колу якоря	$n_n, об/с$
Трансформатор	$k = m \frac{\pi^2 \varphi_{Fe}}{2\sqrt{2}}$	Описаного навколо стрижня кола	Середня висота обмоток $l = l_{обм}$	У стержні B_c	По висоті обмоток	$n = f, Гц$

Добуток $(D^2 \cdot l)$ називають умовним об'ємом активної частини. Величина $(D^2 \cdot l)$ слугує критерієм оцінки використання активних матеріалів електричних машин і трансформаторів на початковій стадії проєктування. Як видно з (1.8), при заданій розрахунковій потужності, габаритні розміри і маса перетворювача визначаються електромагнітними навантаженнями і частотою обертання, які задають в умовах технічного завдання і вимогах до експлуатаційних властивостей (параметрів).

Задача 1.7. Визначити розрахункову потужність трифазного двохобмоткового масляного трансформатора загального призначення за даними, що наведені у табл. 1.8.

Таблиця 1.8

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Діаметр стержня, $D, см$	12,5	20	26	32	34	38
Висота обмоток, $l, см$	30	37,4	51,8	63	70,1	84
Індукція в стержні, $B, Тл$	1,62	1,62	1,54	1,63	1,65	1,65
Номинальний фазний струм обмотки НН/ВН, A	144/5,77	577/13,3	30,4/16,5	2094/83,4	211,6/230	333,3/104
Кількість витків обмотки, W_{HH}/W_{BH}	60/1500	26/1126	605/1112	16/402	218/200	175/561
Коефіцієнт заповнення кола стержня сталлю $\varphi_{Fe} = k_c$	0,88	0,79	0,84	0,855	0,875	0,87

Задача 1.8. Знайти розрахункову потужність асинхронних двигунів єдиної серії 4А із ступенем захисту IP23 за даними, що наведені у табл. 1.9. При розрахунку використати два можливі способи розрахунків, порівняти обидва результати.

Таблиця 1.9

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
$P_2, \text{кВт}$	22	75	90	90	250	250
$U_n, \text{В}$	220/380	220/380	220/380	220/380	380/660	380/660
$I_{нф}, \text{А}$	44,6	150	174,4	156	251,8	259,2
$\cos\varphi_n$	0,84	0,78	0,85	0,94	0,919	0,9
ККД, в.о.	0,89	0,91	0,92	0,925	0,95	0,94
Синхронна частота обертання, n_1 , об/хв	750	500	750	3000	3000	1000
Відношення $K_E = E_1/U_{фн}$	0,955	0,94	0,97	0,99	0,97	0,983
Діаметр розточки статора, D , м	0,258	0,44	0,4	0,223	0,31	0,47
Розрахункова довжина, l , м	0,17	0,27	0,248	0,174	0,21	0,275
Лінійне навантаження, A , $(\text{А/м}) \cdot 10^4$	3,56	4,1	4,49	4,93	6,3	5,05
Індукція у повітряному проміжку, B , Тл	0,875	0,875	0,81	0,8	0,84	0,87
Обмотковий коефіцієнт, $K_{об1}$	0,95	0,905	0,92	0,91	0,758	0,91
Висота осі обертання, h , мм	200	315	280	225	315	355

Задача 1.9. Визначити розрахункову потужність синхронних двигунів через корисну потужність, а також через геометричні розміри і електромагнітні навантаження. Дані наведені у табл. 1.10. Схема з'єднання обмотки статора – "зірка".

Таблиця 1.10

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
$P_2, \text{кВт}$	170	220	500	700	900	1100
$U_n, \text{В}$	3000	380	6000	6000	6000	6000
$I_{нф}, \text{А}$	41	456	66	72	102	115
$\cos\varphi_n$	0,9	0,8	0,8	1,0	0,9	1,0
ККД, в.о.	0,89	0,917	0,915	0,94	0,943	0,92
Синхронна частота обертання, n_1 , об/хв	375	750	750	750	600	750
Відношення $K_E = E_1/U_{фн}$	0,99	0,64	0,88	0,96	1,15	1,027
Діаметр розточки статора, D , м	0,216	0,28	0,288	0,25	0,317	0,336
Розрахункова довжина, l , м	2,85	4,1	4,27	3,96	4,08	3,6
Лінійне навантаження, A , $(\text{А/м}) \cdot 10^4$	0,85	0,85	0,885	0,945	0,945	1,09
Індукція у повітряному проміжку, B , Тл	0,85	0,85	0,885	0,907	0,945	0,93
Обмотковий коефіцієнт, $K_{об1}$	0,93	0,885	0,907	0,945	0,925	0,93

Задача 1.10. Визначити розрахункову потужність машини постійного струму двома способами; порівняти отримані результати. Номінальні дані наведені в табл. 1.11.

Таблиця 1.11

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип машини	Гене- ратор	Двигун	Двигун	Гене- ратор	Гене- ратор	Двигун
Корисна потужність, P_2 , $кВт$	90	34	15	85	50	160
Номінальна напруга, U_n , $В$	230	220	220	115	230	220
Частота обертання, n_n , $об/хв$	1450	500	250	1450	1450	1500
ККД, в.о.	-	0,845	0,81	-	-	0,92
Діаметр якоря, D , $см$	29,4	36,8	32,7	32,7	29,4.	40
Розрахункова довжина якоря, l_δ , $см$	18,6	13,5	23,2	18,6	14,9	25
Лінійне навантаження, A , $А/см$	410	430	300	345	320	330
Індукція в повітряному проміжку, B_δ , $Тл$	0,86	0,82	0,85	0,85	0,86	0,79
α_δ	0,67	0,67	0,65	0,65	0,66	0,65
k_E	1,05	0,88	0,91	1,06	1,11	0,96

Задача 1.11. Визначити умовний об'єм активних частин і оцінити умовний питомий об'єм на одиницю потужності для трифазних двохобмоткових масляних трансформаторів загального призначення, дані яких наведені у табл. 1.12.

Таблиця 1.12

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип трансформатора	ТМ- 250/35	ТМ- 400/35	ТМ- 1000/10	ТМ- 2500/10	ТМ- 4000/10	ТМ- 6300/35
Схема і група з'єд- нання	У/ЗН-11	У/Д-11	Д/УН-11	Д/У-11	У/Д-11	У/Д-11
Індукція в стержні, B , $Тл$	1,42	1,6	1,6	1,63	1,65	1,65
Фазні струми в обмо- тках $I_{nn}/I_{вн}$, $А$	361/4,12	12,2/6,6	91,6/33,3	2094/83,4	211,6/83,4	333,3/104
Витки в обмотках (номінальні) $W_{nn}/W_{вн}$	48/3652	1419/2607	312/858	16/402	218/200	175/561
Коеф. заповнення ко- ла стержня сталлю	0,877	0,86	0,86	0,855	0,875	0,867

Таблиця 1.12

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Висота обмоток, l , <i>см</i>	50	64	87	63	70	84

Задача 1.12. Порівняти умовні об'єми активних частин турбогенератора і гідро-генератора, дані яких наведені у табл. 1.13.

Таблиця 1.13

Величина	P_2 , <i>MВт</i>	U_n , <i>кВ</i>	D , <i>м</i>	l , <i>м</i>	n , <i>об/хв</i>
Турбогенератор	30	10,5	0,87	2,7	3000
Гідрогенератор	32	10,5	8,0	1,0	100

Задача 1.13. У скільки разів зміниться розрахункова потужність електричних машин і трансформаторів при заданих у табл. 1.14 змінах електромагнітних навантажень і частоті обертання відносно базового ЕМПЕ. Умовний об'єм активних частин вважати постійним.

Таблиця 1.14

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
B	1,1	-	0,7	0,9	1,11	1,1
A	1,1	-	0,72	1,11	0,9	1,1
$n(f)$	1	2	2	1,5	1	2

Задача 1.14. Використовуючи дані табл. 1.15, визначити відносну і абсолютну зміну умовного об'єму активних частин, якщо електромагнітні навантаження і частота обертання змінюються згідно табл. 1.15. Розрахункову потужність прийняти постійною.

Таблиця 1.15

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
A	1,0	1,1	0,8	0,8	0,9	1,1
B_δ	1,0	1,1	1,1	0,95	-	1,1
n_1	2	1,0	1,5	0,5	0,5	2

Питання для самоконтролю

1. Написати загальний вираз для розрахункової потужності, де є зв'язок з геометрією, електромагнітними навантаженнями та частотою мережі (або частотою обертання).
2. Що прийнято при проектуванні за основні розміри електричних машин і трансформаторів? Показати на рисунках.
3. Що розуміють під електромагнітним навантаженням?
4. Написати вираз для умовного об'єму активної частини ЕМПЕ. Пояснити його фізичну суть.
5. Як впливає на величину умовного об'єму активної частини частота обертання (або частота мережі) при постійних номінальних потужностях і електромагнітних

навантаженнях?

6. У яких випадках використовують більш високі частоти обертання (або частоти мережі)?
7. Вказати діапазони змін величин індукції у стрижні та лінійного навантаження обмоток для трансформаторів загального призначення.
8. Вказати діапазон величин використання індукції у повітряному проміжку та лінійного навантаження для електричних машин.
9. Як впливають величини електромагнітного навантаження на нагрівання ЕМПЕ?
10. Як впливає кількість полюсів на частоту обертання електричних машин змінного струму? Підтвердити відповідь виразом.

1.3. Визначення основних розмірів

Початковий етап проектування ЕМПЕ з відомою розрахунковою потужністю - визначення основних розмірів. У підрозділі 1.2 показано, що при заданій розрахунковій потужності і частоті обертання (або мережі) основні розміри (умовний об'єм) залежать від електромагнітних навантажень. Вибір електромагнітних навантажень і співвідношень між основними розмірами істотно впливає на техніко-економічні показники машини.

На першому етапі розрахунків треба прийняти величини електромагнітних навантажень такими, що максимально наближені до потрібних, використавши досвід, який є по проектуванню, виготовленню і експлуатації цього типу ЕМПЕ.

Електромашинна стала представляє собою розмірний коефіцієнт, що враховує в прихованій формі електромагнітні навантаження і зв'язує початкові (вихідні) вимоги з основними розмірами.

Вперше такий коефіцієнт ввів німецький електромеханік Арнольд при розгляді основних співвідношень в машинах постійного струму. Надалі цей коефіцієнт почав використовуватися і для інших типів ЕМПЕ та отримав назву "сталої Арнольда".

Використовуючи сталу Арнольда, можна визначити умовний об'єм активної частини:

$$D^2 \cdot l = C_A \cdot \frac{S_{EM}}{n} \quad (1.9)$$

Як видно з порівнянь (1.8) і (1.9), стала Арнольда в загальному випадку дорівнює:

$$C_A = \frac{1}{k(B \cdot A)}, \frac{M^3}{Дж} \quad (1.10)$$

Використавши значення конструктивного коефіцієнта k з табл. 1.7, можна знайти постійну Арнольда для машин:

- змінного струму

$$C_A = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 k_{об}(A \cdot B_\delta)}, \frac{M^3}{Дж} \quad (1.11)$$

- постійного струму

$$C_A = \frac{1}{\pi^2 \alpha_\delta (A \cdot B_\delta)}, \frac{m^3}{Джс} \quad (1.12)$$

- трансформаторів

$$C_A = \frac{2\sqrt{2}}{m\pi^2 \varphi_{Fe} (A \cdot B)}, \frac{m^3}{Джс} \quad (1.13)$$

Недоліком цього методу є те, що визначаються не основні розміри, а умовний об'єм активної частини. На основі реальних ЕМПЕ були проведені великі роботи щодо визначення величини відношень $k_\Gamma = \lambda' = l/D$ або $k_\Gamma = \beta = l/(\pi D_{cp})$ для електричних машин і $k'_\Gamma = \lambda = l/D_c$ для трансформаторів, виходячи з умови якнайкращого використання активних матеріалів та забезпечення робочих характеристик. Якщо задатися відношенням k_Γ , можна знайти базисний розмір:

$$D = 3 \sqrt[3]{\frac{C_A}{k_\Gamma} \frac{S_{EM}}{n}}. \quad (1.14)$$

Проте стала Арнольда змінює свою величину залежно від потужності, частоти обертання і інших величин. Тому були запропоновані інші сталі, які менше змінюються при проектуванні ЕМПЕ різної потужності.

Найбільше розповсюдження отримала так звана універсальна стала C_S , яка детально досліджена проф. І.М.Постніковим.

Для електричних машин за допомогою універсальної сталої визначають полюсний поділок:

$$\tau = C_S 4 \sqrt[4]{\frac{S_{EM} \beta}{2p\lambda_1 f_1}}. \quad (1.15)$$

де для машин постійного струму

$$C_S = (2\alpha_\delta k_\varphi j B_{Z1})^{-1/4}, \quad (1.16)$$

для машин змінного струму

$$C_S = (\sqrt{2} k_{o\delta} k_\varphi j B_{Z1})^{-1/4}. \quad (1.17)$$

У формулах (1.15), (1.16) та (1.17) S_{EM} - розрахункова потужність, В·А; $\beta = \tau/l_\delta$ - коефіцієнт геометрії полюса; p - число пар полюсів; $\lambda_1 = h_n/\tau$ - коефіцієнт геометрії паза; f_1 - частота мережі (для електричних машин постійного струму $f_1 = pn_{ном}$), Гц (об/с); α_δ - коефіцієнт полюсного перекриття; k_φ - повний коефіцієнт заповнення зубцевої зони якоря, $k_\varphi = \varphi_{Cu} \varphi_{Fe} \pi \zeta$; φ_{Cu} - коефіцієнт заповнення паза міддю; φ_{Fe} - коефіцієнт заповнення пакету якоря сталлю; λ - коефіцієнт відносної ширини паза ($\lambda = b_n/t_1$); ζ - коефіцієнт відносної ширини зубця ($\zeta = b_{Z1}/t_1$); j - густина струму в обмотці якоря, А/м²; B_{Z1} - індукція на поверхні зубця якоря, Тл.

Для трансформаторів зі сталою універсальною знаходять діаметр стержня:

$$D = C_S \sqrt[4]{\frac{S_{EM}}{m a_1 \lambda_1 f_1}}, \text{ м} \quad (1.18)$$

Універсальна стала для трансформатора має вигляд, $\text{м}/(\text{Джс})^{1/4}$:

$$C_S = \left(\frac{4\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot \varphi_{Fe} \cdot \varphi_{Cu} \cdot j \cdot B} \right)^{1/4}, \quad (1.19)$$

де j - густина струму в обмотках, А/м; λ_1 - відношення ширини вікна трансформатора до діаметра стержня ($\lambda_1 = l_{ок}/2D$); φ_{Cu} - коефіцієнт заповнення міддю вікна трансформатора.

Оскільки трансформатор є більш простішою конструкцією, то при визначенні розміру діаметра стержня використовують достатньо простий вираз, який зв'язує розмір діаметра не тільки з розрахунковою потужністю, але і з найважливішим експлуатаційним параметром - напругою КЗ. При цьому вираз для визначення діаметра стержня має вигляд:

$$D = 16 \cdot \sqrt[4]{\frac{S'_{EM} \cdot \beta \cdot \alpha_p \cdot k_p}{f \cdot U_p \cdot (B \cdot k_c)^2}}, \text{ м} \quad (1.20)$$

де S'_{EM} - розрахункова потужність на один стержень, кВ·А; $\beta = \pi d_{12}/l$ - геометричний коефіцієнт; α_p - приведений канал розсіяння, см; k_p - коефіцієнт Роговського; U_p - реактивна складова напруги КЗ (у відсотках); k_c - коефіцієнт заповнення активною сталлю площі кола, описаного навколо перерізу стержня.

При визначенні основних розмірів електричних машин звичайно застосовують обидві електромашинні сталі.

При проектуванні сучасних серійних машин часто відхиляються від одиничних оптимальних рішень, враховуючи вимоги стандартизації, технологічності відрізка серії і т.п. В цих випадках початковими вимогами є зв'язки ряду потужностей з висотами осей обертання та економічність відрізка серії при виробництві.

Задача 1.15. Визначити наближено діапазон зміни сталої C_A для трифазних двохобмоткових трансформаторів загального застосування з обмотками з міді і алюмінію. Вихідні дані наведені у табл. 1.16.

Таблиця 1.16

Величина	$B_{\min} \dots B_{\max}$, Тл	$A_{\min} \dots A_{\max}$, А/м	$\varphi_{Fe \min} \dots \varphi_{Fe \max}$
Масляні трансформатори			
Мідь	1,2...1,7	$(2,5 \dots 7,5) \cdot 10^4$	0,7...0,89
Алюміній	1,4...1,7	$(1,75 \dots 5,25) \cdot 10^4$	0,6...0,89
Сухі трансформатори			
Мідь	0,9...1,6	$(1,5 \dots 4) \cdot 10^4$	0,79...0,83
Алюміній	0,9...1,6	$(0,95 \dots 3) \cdot 10^4$	0,79...0,83

Задача 1.16. Визначити діапазон зміни сталої Арнольда для машин постійного струму. Прийняти $\alpha_\delta = 0,6...0,7$; $B_\delta = 0,4...1,0 \text{ Тл}$; $A = (1...4) \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

Задача 1.17. Визначити діапазон зміни сталої Арнольда для асинхронних машин, якщо відомо: $k_{об} = 0,92$; $B_\delta = 0,3...1,0 \text{ Тл}$ і $A = (2...5,5) \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

Задача 1.18. Визначити діапазон зміни сталої Арнольда для синхронних машин, якщо відомо: $k_{об} = 0,92$; $B_\delta = 0,3...1,1 \text{ Тл}$ і $A = (2...12) \cdot 10^4 \text{ А/м}$.

Задача 1.19. Знайти діапазон зміни C_S для трифазних двохобмоткових трансформаторів з обмотками з міді і алюмінію. Для розрахунку використовувати дані табл. 1.17.

Таблиця 1.17

Величина	φ_{Fe}	φ_{Cu}	$j, \text{ А/м}^2$	$B, \text{ Тл}$
Масляні трансформатори				
Мідь	0,7...0,89	0,3...0,1	$(2,0...4,0) \cdot 10^6$	1,2...1,7
Алюміній	0,6...0,89	0,25...0,2	$(1,2...1,8) \cdot 10^6$	1,4...1,7
Сухі трансформатори				
Мідь	0,79...0,83	0,3...0,2	$(2,0...2,8) \cdot 10^6$	0,9...1,6
Алюміній	0,79...0,83	0,28...0,18	$(0,8...1,8) \cdot 10^6$	0,9...1,6

Задача 1.20. Визначити діапазон зміни універсальної сталої C_S для машин постійного струму, прийнявши: $\alpha_\delta = 0,6...0,7$; $B_{Z1} = 1,2...1,8 \text{ Тл}$; $A = (3...5) \cdot 10^4 \text{ А/м}$; $\varphi_{Cu} = 0,4...0,25$; $\varphi_{Fe} = 0,95...0,8$; $\lambda = b_n / t_1$; $\zeta = b_{Z1} / t_1 = 0,25$.

Задача 1.21. Визначити діапазон зміни універсальної сталої C_S для машин змінного струму, прийнявши: $k_{об1} = 0,85...0,9$; $\varphi_{Cu} = 0,4...0,2$; $\varphi_{Fe} = 0,95...0,8$; $B_{Z1} = 1,4...1,9 \text{ Тл}$; $j = (4...10) \cdot 10^4 \text{ А/м}^2$.

Задача 1.22. Визначити основні розміри трифазних силових масляних трансформаторів загального призначення відомими способами. Отримані величини порівняти і дати аналіз. Початкові дані для розрахунків наведені в табл. 1.18.

Таблиця 1.18

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, S , кВА	250	630	1000	1600	4000	6300
Втрати КЗ, P_K , кВт	4,2	7,6	12,5	18	33,5	46,5
Напруга КЗ, U_K , %	4,7	5,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Лінійне навантаження, A , А/м	2,5 10 ⁴	4,6 10 ⁴	3,5 10 ⁴	4,5 10 ⁴	7,0 10 ⁴	5,9 10 ⁴
Матеріал обмоток	алюміній	мідь	алюміній	алюміній	мідь	алюміній
Відношення $\alpha = l/D$	2,7	2,2	2,9	3,4	1,7	2,9

Таблиця 1.18

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Відношення $\lambda = l_{ок} / (2D)$	0,59	0,4	0,58	0,54	0,34	0,44

Задача 1.23. Відомими способами визначити основні розміри трифазних асинхронних двигунів, порівняти і проаналізувати отримані результати. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 1.19.

Таблиця 1.19

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, P_2 , кВт	2,2	11	22	90	160	250
Напруга, U_n , В	220/380	20/380	20/380	220/380	380/660	380/660
Частота обертання, n_1 , об/хв.	1000	1500	3000	750	750	3000
ККД, в.о.	0,82	0,85	0,88	0,92	0,93	0,95
$\cos \varphi_n$, в.о.	0,78	0,83	0,91	0,85	0,82	0,91
Ступінь захисту	IP44	IP23	IP44	IP23	IP44	IP23

Задача 1.24. Використовуючи відомі способи, визначити основні розміри синхронних машин з вихідними даними (табл. 1.20). Отримані результати порівняти і дати пояснення.

Таблиця 1.20

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Режим роботи	Двигун	Генератор	Генератор	Двигун	Двигун	Генератор
P_2 , кВт	170	220	500	900	1100	3500
$k_E = E_1 / U_1$	1,05	1,08	1,08	1,05	1,01	1,08
ККД, в.о.	0,89	0,917	0,915	0,943	0,92	0,96
$\cos \varphi_n$, в.о.	0,9	0,8	0,8	0,9	1,0	0,8
Частота обертання, n_1 , об/хв	375	750	750	600	750	1000
Коефіцієнт $\beta = \tau / l_\delta$	0,9	0,89	1,3	1,15	1,17	1,2
Коефіцієнт $\lambda_1 = h_n / \tau$	0,23	0,12	0,2	0,205	0,186	0,15

Задача 1.25. Використовуючи електромашинні постійні, визначити основні розміри машин постійного струму, порівняти і проаналізувати отримані величини. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 1.21.

Таблиця 1.21

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Режим роботи	Двигун	Двигун	Генератор	Генератор	Двигун	Двигун
Потужність, P_2 , кВт	3,0	15,0	70	190	3,0	75
Частота обертання, n_n , об/хв	1500	1500	1450	1450	1500	750
Ступінь захисту	IP22	IP22	IP22	IP22	IP44	IP22
Клас нагрівостійкості	B	B	F	F	F	B
Кількість полюсів $2p$	4	4	4	4	4	4

Питання для самоконтролю

1. Назвати і показати на рисунку основні розміри трансформаторів.
2. Назвати і показати на рисунку основні розміри машин змінного струму.
3. Назвати і показати на рисунку основні розміри машин постійного струму.
4. Які сталі використовують при визначенні основних розмірів ЕМПЕ?
5. Що дозволяє визначити стала Арнольда? Як з її допомогою знаходять основні розміри?
6. Який діапазон використання сталі Арнольда?
7. У яких випадках використовують універсальну сталю для електричних машин?
8. Які основні показники входять у вирази сталей?
9. Які способи використовують ще (крім сталей) для визначення основних розмірів ЕМПЕ?
10. Як змінюються електромагнітні навантаження з ростом потужностей ЕМПЕ? Вказати діапазон їх змін.

1.4. Геометрично подібний ряд

Ряд зростаючих по потужності електричних машин або трансформаторів, що мають подібні конструкції і однакові електромагнітні навантаження, частоту мережі (обертання) та напруги називають геометрично подібним. Така ідеалізація можлива на невеликому відрізку потужностей, але розповсюдження її на весь діапазон потужностей дозволяє вказати деякі закономірності, важливі для проектувальника.

З виразів (1.15), (1.18) і (1.20) витікає, що розрахункова потужність S_{EM} пропорційна лінійному розміру електричної машини або трансформатора L (D або τ) в четвертій ступені:

$$L \sim \sqrt[4]{S_{EM}} = (S_{EM})^{1/4}. \quad (1.21)$$

Оскільки об'єм, маса, вартість і сума втрат в електричній машині і трансформаторі пропорційна L^3 , справедлива наступна залежність:

$$V \sim M \sim C \sim \sum p \sim L^3 \sim (S_{EM})^{3/4}, \quad (1.22)$$

а віднесені до розрахункової потужності або питомі показники відповідно приймають вигляд

$$\frac{V}{S_{EM}} \sim \frac{M}{S_{EM}} \sim \frac{C}{S_{EM}} \sim \frac{\sum p}{S_{EM}} \sim \frac{L^3}{S_{EM}} \sim \frac{1}{L} \sim \frac{S_{EM}}{\sqrt[4]{S_{EM}}}. \quad (1.23)$$

З (1.23) витікає важливий висновок: із збільшенням потужності знижується об'єм, маса і вартість на одиницю розрахункової потужності, а ККД зростає.

Із зростанням потужності площа поверхні охолодження збільшується

$$P_{ox} \sim L^2 \sim (S_{EM})^{1/2}, \quad (1.24)$$

проте тепловий потік на одиницю поверхні

$$q = \frac{\sum p}{P_{ox}} \sim \frac{L^3}{L^2} = L \sim \sqrt[4]{S_{EM}}, \quad (1.25)$$

зростає із збільшенням потужності, що вимагає більш інтенсивної системи охолодження. Це є однією з причин порушення подібності конструкції.

Отримані вирази для геометрично подібного ряду можуть використовуватися для приблизної оцінки основних розмірів і техніко-економічних показників трансформаторів, які проектуються, і електричних машин в порівнянні з деякими базовими (відомими) показниками.

Задача 1.26. Порівняти діаметри стержня, витрати активних матеріалів і втрати реальних трансформаторів, дані яких наведені у табл. 1.22, з тими ж величинами за умови виконання співвідношень геометрично подібного ряду. При розрахунках за базовий прийняти трансформатор меншої потужності.

Таблиця 1.22

Величини	Варіанти			
	1	2	3	4
Потужність, кВ·А	100	1600	25000	400000
Клас напруги, кВ	10	35	110	220
Діаметр стержня, см	14	28	56	118
Витрати активних матеріалів, кг/(кВ·А)	3,1	1,577	1,058	0,419
Відносна сума втрат Вт/(кВ·А)	22,8	13,19	5,96	2,9

Задача 1.27. У табл. 1.23 наведені деякі величини реальних турбогенераторів. Порівняти діаметри розточок статорів реальних турбогенераторів, дотримуючись співвідношення геометрично подібного ряду електричних машин. При розрахунках за базовий прийняти турбогенератор меншої потужності. Порівняти діаметри, вказати причини відхилень і існуючі обмеження для турбогенераторів, що порушують співвідношення геометрично подібного ряду.

Таблиця 1.23

Величини	Варіанти				
	1	2	3	4	5
Потужність, кВт	1500	6000	30000	100000	150000
Частота обертання, об/хв	3000	3000	3000	3000	3000
Полосна поділлка, см	94,2	120	136,5	172,5	188,5

Задача 1.28. У табл. 1.24 подані діаметри розточок статорів реальних асинхронних двигунів. Якими повинні бути ці діаметри при виконанні співвідношень геометрично подібного ряду? При розрахунках за базовий прийняти двигун меншої потужності. Порівняти діаметри, пояснити розбіжність.

Таблиця 1.24

Величини	Варіанти			
	1	2	3	4
Потужність, кВт	0,6	75	315	1250
Частота обертання, об/хв	1410	1460	1470	1460
Полюсна поділка, см	7,0	4,7	34,7	50,2

Задача 1.29. Користуючись залежностями геометрично подібного ряду, знайти ККД двигуна більшої потужності; за базові прийняти значення двигуна меншої потужності. Дані реальних синхронних двигунів наведені в табл. 1.25. Чим пояснюється відмінність між значеннями ККД реального і розрахункового?

Таблиця 1.25

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	n_1 , об/хв	ККД
СДЗ-2-315-6УЗ	315	6000	1000	0,935
СДЗ-2-1000-6УЗ	1000	6000	1000	0,96

Задача 1.30. Порівняти ККД реального асинхронного двигуна з ККД цього ж двигуна, виконаного згідно з залежностями геометрично подібного ряду. Дати пояснення. При розрахунках в якості базової використовувати машину більшої потужності. Дані реальних асинхронних двигунів наведені в табл. 1.26.

Таблиця 1.26

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	n_1 , об/хв	ККД
А4-400ХК-4УЗ	400	6000	1500	0,942
А4-450У-4УЗ	1000	6000	1500	0,9

Задача 1.31. Порівняти реальну масу асинхронного двигуна з масою такого ж двигуна, виконаного виходячи з умов геометрично подібного ряду. За базові прийняти дані двигуна меншої потужності. Дані реальних двигунів наведені в табл. 1.27. Дати пояснення отриманого результату.

Таблиця 1.27

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	n_1 , об/хв	ККД	Маса, т
ДА304-400ХК-6У1	250	6000	1000	0,932	2,22
ДА304-450ХК-6У1	500	6000	1000	0,944	2,95

Задача 1.32. У скільки разів повинен зрости питомий тепловий потік асинхронного двигуна з фазним ротором більшої потужності у порівнянні з двигуном меншої потужності? При оцінці скористатися законами геометрично подібного ряду. Дані двигунів наведені в табл. 1.28.

Таблиця 1.28

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	n_1 , об/хв	ККД	Маса, т
АКН2-18-36-16УХЛ4	800	6000	375	0,938	7,81
АКН2-19-41-16УХЛ4	2000	6000	375	0,948	12,27

Задача 1.33. Використовуючи співвідношення геометрично подібного ряду, оцінити: у скільки разів збільшаться лінійні розміри електричної машини або трансформатора у порівнянні з базовими, якщо збільшиться потужність в 16 разів, а частота обертання у 2 рази.

Задача 1.34. В табл. 1.29 наведені каталожні дані реальних асинхронних двигунів. Приймаючи за базовий двигун меншої потужності, визначити масу і ККД іншого двигуна, використовуючи співвідношення геометрично подібного ряду. Оцінити розбіжність і зробити висновки.

Таблиця 1.29

Тип двигуна	Потужність, кВт	Напруга, В	Синхронна частота обертання, об/хв	ККД, %	Маса, т
A4-400У-4УЗ	250	6000	600	92,2	2,25
A4-450У-4УЗ	1000	6000	1500	95,4	2,89

Питання для самоконтролю

1. Дати визначення геометрично подібного ряду.
2. Яка мета введення поняття геометрично подібного ряду?
3. Зв'язок лінійних розмірів ЕМПЕ з розрахунковою потужністю.
4. Який зв'язок між умовним об'ємом, масою, втратами та вартістю з розрахунковою потужністю?
5. Які причини не дозволяють виконувати ЕМПЕ згідно з вимогами геометрично подібного ряду?
6. Чи можна використовувати на практиці залежності геометрично подібного ряду для оцінки параметрів ЕМПЕ іншої потужності?
7. Як змінюється ККД зі збільшенням потужності ЕМПЕ?
8. Чому вигідно збільшувати одиничну потужність ЕМПЕ?
9. Які лінійні розміри реальних ЕМПЕ відрізняються у разі використання співвідношень геометрично подібного ряду?
10. Чим викликана різноманітність систем охолодження ЕМПЕ?

2. Проектування трансформаторів

Мета проектування трансформатора – розрахунок і розробка надійної конструкції, яка забезпечує виконання технічних вимог та високих економічних показників.

Загальні етапи проектування трансформатора наступні:

- складання (або вивчення) технічних вимог;
- вибір конструкції;
- визначення геометричних розмірів;
- розрахунок і розміщення обмоток;
- визначення втрат і напруги КЗ;
- механічний розрахунок конструкцій обмоток;
- розрахунок магнітного кола;
- розрахунок робочих характеристик і ККД;
- тепловий розрахунок;
- економічна оцінка спроектованого варіанту.

У цьому розділі розглянуті основні питання проектування силових трансформаторів загального призначення. Питання розрахунків робочих характеристик та економічної оцінки спроектованого трансформатора не викладаються.

Розрахунок трансформатора, зокрема визначення основних розмірів, представляє задачу з безліччю рішень, оскільки число змінних більше, ніж число рівнянь, які визначають їх. Тому на початку розрахунку задають деякі величини і конструктивні співвідношення, що базуються на досвіді практики. Надалі, у разі потреби, виконують уточнюючі розрахунки до отримання необхідних експлуатаційних показників.

2.1. Розрахунок геометричних розмірів трансформатора

Окрім основних (діаметра стрижня D і висоти обмоток l), до важливих геометричних розмірів трансформатора відносять: висоту стержня l_c , відстань між осями стержнів C , ширину вікна $l_{\text{вікн}}$, радіальні розміри обмоток, габаритні розміри активної частини і усього трансформатора.

Початком розрахунку геометричних розмірів є визначення діаметра стержня, який повинен відповідати шкалі міжнародної нормалі.

Діаметр стержня можна визначити, користуючись виразами (1.8), (1.9), (1.18) і (1.20), в які входять три групи величин: перша - величини, задані або відомі з технічних умов; друга - величини, що задаються проєктувальником; третя - величини, що вимагають попередніх обчислень. Додамо, що останні дві групи величин враховують практичні рекомендації і досягнення трансформаторобудування та можуть змінюватись в певних межах.

Можливі варіанти попередньо прийнятих величин призводять до того, що геометричні розміри приймають безліч значень. У зв'язку з цим, при розрахунку діаметра стержня використовують вираз (1.20), який враховує обмеження експлуатації по напрузі КЗ, тим самим звужуючи межі пошуку потрібного варіанта.

Перша група величин включає: повну розрахункову потужність $S_n = S_{EM}, \text{кВ}\cdot\text{А}$, або на один несучий обмотки стержень $S', \text{кВ}\cdot\text{А}$; частоту мережі $f_1, \text{Гц}$; величину

напруги КЗ $U_K, \%$; число фаз.

У силових трансформаторах розрахункову (електромагнітну) потужність часто приймають рівною номінальній, хоч між ними існує відмінність на величину $I_{2H}^2 \cdot Z_2$, а розрахункова потужність дорівнює:

$$S_{EM} = \sqrt{(S_{2H} \cos \varphi_{2H} + I_{2H}^2 \cdot r_2)^2 + (S_{2H} \sin \varphi_{2H} + I_{2H}^2 \cdot x_2)^2} = m(k_E U_{2H}) I_{2H} = k_E S_{2H} \quad (2.1)$$

де S_{2H} - номінальна потужність кВ·А; $k_E = 1,02 \dots 1,05$ для навантаження при $\cos \varphi_{2H} = 0,8$.

Друга група величин, що входить у вказані вирази (її задає проєктувальник) включає електромагнітні навантаження і коефіцієнти, які характеризують особливості вимог, технологію виготовлення і співвідношення геометричних розмірів.

Величини електромагнітних навантажень (індукція в стержні $B, Тл$, лінійне навантаження $A, А/м$, густина струму $j, А/м^2$) визначають ККД, вартість і масогабаритні показники трансформаторів.

Індукція в стержні визначає діаметри стержнів, втрати в магнітопроводі і струм неробочого ходу. В сучасних трансформаторах, що виготовляються з холоднокатаної електротехнічної сталі завтовшки 0,35, 0,3 та 0,28 мм, індукція в стержні складає 1,5...1,7 Тл, причому більші значення відносяться до трансформаторів більшої потужності.

Лінійне навантаження визначається матеріалом обмоток і способом їх охолодження. Для трансформаторів загального призначення потужністю 25...10000 кВ·А з мідними обмотками $A = (4,5 \dots 7,5) \cdot 10^4 А/м$, з алюмінієвими обмотками $A = (2,0 \dots 5,5) \cdot 10^4 А/м$. При практичному проєктуванні використовують густину струму j , яка визначає переріз провідників обмоток, втрати і нагрів їх. Величина j в сучасних масляних трансформаторах з мідними обмотками складає $(1,4 \dots 2,8) \cdot 10^6 А/м^2$, з алюмінієвими обмотками $(1,2 \dots 1,8) \cdot 10^6 А/м^2$; в сухих трансформаторах з мідними обмотками $(1,4 \dots 2,8) \cdot 10^6 А/м^2$, а з алюмінієвими $(0,8 \dots 1,8) \cdot 10^6 А/м^2$.

Конкретні рекомендації по вибору величин B і j для силових трансформаторів наведені в довідковій літературі.

До коефіцієнтів, що належать до другої групи величин, відносяться:

φ_{Cu} - коефіцієнт заповнення вікна трансформатора міддю (алюмінієм), $\varphi_{Cu} = 0,09 \dots 0,21$, де менші значення характерні для високовольтних трансформаторів;

k_c - коефіцієнт заповнення стержня, рівний добутку $k_{кр} \cdot k_3$;

$k_{кр}$ - коефіцієнт заповнення круга, рівний відношенню площі перерізу ступінчастої фігури стержня до площі круга, описаного навколо стержня; величина $k_{кр}$ залежить від числа ступенів стержня;

k_3 - коефіцієнт заповнення сталлю, величина якого залежить від типу сталі, її товщини і виду ізоляції;

$\alpha = l_c/D$ - коефіцієнт геометрії стержня, рівний відношенню висоти стержня до

діаметра; в сучасних конструкціях $\alpha = 3,8 \dots 5,3$;

$\lambda = l_{\text{вікна}} / (2D)$ – коефіцієнт геометрії вікна, $\lambda = 0,75 \dots 1,02$; добуток $\alpha \cdot \lambda = 2,8 \dots 5,5$;

$\beta = \pi d_{12} / l$ – коефіцієнт, що визначає співвідношення між середньою довжиною витка обмоток (по каналу розсіювання) і їх висотою;

k_p – коефіцієнт Роговського, що характеризує приведення ідеального поля розсіювання до реального і лежить у межах $k_p = 0,93 \dots 0,95$.

До третьої групи величин відносяться: реактивна складова напруги КЗ U_p і приведений канал розсіювання a_p .

Реактивна складова напруги КЗ

$$U_p = \sqrt{U_\kappa^2 - U_a^2}, \% \quad (2.2)$$

де $U_a = P_\kappa / (10 \cdot S_n), \%$ – активна складова напруги КЗ, що визначається співвідношенням між втратами КЗ P_κ (у Вт), і номінальною (розрахунковою) потужністю S_n (у кВ·А).

Приведений канал розсіювання задають орієнтовно:

$$a_p = a_{12} + (a_1 + a_2) / 3, \text{ м} \quad (2.3)$$

де a_{12} – ізоляційний проміжок між обмотками ВН і НН, який визначається по випробувальній напрузі обмотки ВН, м;

$(a_1 + a_2) / 3$ – приведена ширина двох обмоток, яку знаходять по формулі:

$$(a_1 + a_2) / 3 \approx k \sqrt[4]{S'} \cdot 10^{-2}, \text{ м} \quad (2.4)$$

де S' – потужність на стержень, кВ·А.

Величину k , яка залежить від потужності трансформатора, металу обмоток, напруги ВН і втрат КЗ.

Визначивши по одній з вказаних формул діаметр стержня і нормалізувавши його, далі розраховують обмотки і магнітопровід, уточнюючи їх розміри і прийняті раніше співвідношення, а також перевіряють відповідність отриманої геометрії трансформатора технічним умовам щодо U_κ , P_κ , P_0 , i_0 .

При необхідності орієнтовної оцінки геометрії трансформатора можна скористатися первинними розрахунками і заданими співвідношеннями та визначити висоту стержня l_c , яка більше висоти обмотки ВН на два ізоляційні проміжки між обмоткою і ярмом: $2l_{02}$, де l_{02} .

Визначивши радіальний розмір обмотки НН $a_1 \approx k_1(a_1 + a_2) / 3$, м (при $k_1 = 1,1$ для трансформаторів потужністю $25 \dots 630$ кВ·А, $k_1 = 1,4$ для трансформаторів потужністю $1000 \dots 80000$ кВ·А і $k_1 = 1,05 \dots 1,1$ для трансформаторів класу напруги 110 кВ), знаходять радіальний розмір a_2 з виразу (2.4) і зовнішній діаметр обмотки ВН. Відстань між стержнями і ширина вікна, а також габаритні розміри активної частини і бака визначаються з урахуванням ізоляційних проміжків.

Задача 2.1. Визначити діаметр стержня і приблизні розміри висоти обмоток, висоти стержня і ширину вікна двохобмоточного трифазного трансформатора зага-

льного призначення. Вихідні дані для розрахунку наведені в табл. 2.1. Прийняти для магнітопроводу рулонну холоднокатану електротехнічну сталь завтовшки $\Delta=0,35$ мм з жаростійким покриттям.

Таблиця 2.1

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	25	630	2500	4000	6300	10000
Напруги ВН і НН, $U_{ВН}/U_{НН}$, кВ	10/0,4	35/6,3	10/0,4	35/10,5	35/10,5	38,5/10,5
Схема і група з'єднання обмоток	У/ЗН-11	У/Д-11	Д/УН-11	У/Д-11	У/Д-11	У/Д-11
Втрати КЗ, P_K , кВт.	0,69	8,5	25	33,5	46,5	65,0
Напруга КЗ, U_K , %.	4,7	5,5	5,5	7,5	7,5	7,5
Матеріал обмоток	алюміній	алюміній	мідь	алюміній	алюміній	мідь
Відношення $\alpha = l_c/D$	3,5	4,4	4,0	3,8	3,9	4,1
Відношення $\lambda = l_{\text{вікн}}/(2D)$	1,2	1,1	0,75	1,1	0,97	0,95

Задача 2.2. В табл. 2.2 наведені вихідні величини двохобмоткових трифазних трансформаторів загального призначення. Визначити висоти обмоток і стержнів, а також ширину вікна.

Таблиця 2.2

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А.	100	400	1000	1600	4000	6300
Номінальні напруги, $U_{ВН}/U_{НН}$, кВ.	10/0,23	10/0,69	20/0,4	35/3,15	10/3,15	35/6,3
Діаметр стержня, D , см.	12,5	18	22	26	36	38
Коефіцієнт, β .	1,55	1,3	1,5	1,4	2,45	1,81
Радіальні розміри обмоток: ВН, a_2 , см; НН, a_1 , см.	3,34 2,32	3,5 2,54	3,8 3,12	3,4 4,95	4,6 4,2	8,3 5,6

Задача 2.3. Оцінити вплив окремих параметрів на діаметр стержня. Відхилення від базових значень наведені в табл. 2.3.

Таблиця 2.3

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Індукція в стрижні, B , %	-20		-10		+5	
Коефіцієнт β , %	-	+25	-	+10	—	-20
Частота f , %	-	-	+20	-	-	+20

Таблиця 2.3

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Напруга КЗ, U_p , %	-	-	-	+ 10	+10	-10
Коефіцієнт k_c , %	-3	+3	-	-	-	+4,5

Задача 2.4. Визначити габаритні розміри активної частини трансформаторів, дані яких наведені в табл. 2.4.

Таблиця 2.4

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	160	250	630	1600	2500	6300
Номінальні напруги U_{BH}/U_{HH} , кВ	10/0,23	35/0,4	10/3,15	20/10,5	35/6,5	35/3,15
Діаметр стержня, D , см	14	16	20	26	32	36
Коефіцієнт β	1,5	1,34	1,65	1,6	2,2	1,35
Розміри, см:						
a_{01}	0,4	0,4	1,5	1,5	1,5	1,75
a_1	2,36	3,1	3,3	4,6	2,7	5,0
a_{12}	0,9	2,7	1,0	2,7	3,0	3,5
a_2	4,05	4,2	4,4	5,2	4,0	6,0
a_{22}	1,0	2	1,0	2,5	3,0	3,5
a_{02}	3,0	7,2	3,0	5,0	7,5	7,5

Задача 2.5. Оцінити, як вплине на діаметр стержня трансформатора заміна холоднокатаної сталі магнітопроводу на гарячекатану. При розрахунку припустити умовно постійними всю решту розмірів і параметрів.

Питання для самоконтролю

1. Перерахувати основні вихідні дані для проєктування трансформаторів загального призначення.
2. Вказати основні послідовні етапи проєктування трансформаторів.
3. До яких і які вимоги стандартів до вихідних параметрів трансформатора?
4. Основні розміри трансформатора.
5. Способи знаходження основних розмірів трансформаторів.
6. Межі, в яких використовують величини електромагнітних навантажень.
7. Поясніть значення коефіцієнта заповнення перерізу стрижня $k_{кр}$. Від чого залежить його величина?
8. Поясніть значення коефіцієнта заповнення перерізу ступеневої фігури стержня сталлю. В яких межах його величини?
9. Вираз для коефіцієнта β .
10. Поясніть суть каналу розсіювання і приведенного каналу розсіювання.

2.2. Вибір конструкції і розрахунок обмоток

В сучасних силових трансформаторах загального призначення I-III габаритів застосовують концентричні обмотки наступних конструктивних типів: одно-, двох- або багат шарові циліндрові обмотки (з круглого або прямокутного проводу); одно-, двох- і багатходові гвинтові обмотки з прямокутного проводу; безперервні котушкові з прямокутного проводу.

Тип обмотки вибирають з урахуванням номінальних даних і вимог, що до трансформатора в цілому. Критеріями вибору типу обмотки є: струм навантаження на один стержень I_c , потужність трансформатора S_n , номінальна напруга U_n і поперечний переріз витка

$$P = I_c / j_{cp} \quad (2.5)$$

де j_{cp} - середня густина струму в обмотках ВН і НН.

З урахуванням вказаних критеріїв у довідковій літературі наведені рекомендовані діапазони застосування перерахованих типів обмоток. При можливості використовувати декілька типів обмоток, слід віддати перевагу більш технологічному типу, а також враховувати, що для обмотки ВН потрібно застосування найзручнішої схеми регулювання витків.

Подальший розрахунок кількості витків і геометричних розмірів обмоток припускає відомими розміри діаметра стержня (у тому числі і переріз сталі його P_c), висоти обмоток l і ізоляційних проміжків, а також індукцію в стержні B_c і ЕРС одного витка.

ЕРС одного витка

$$E = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \frac{\pi D_c^2}{4} \cdot k_c = 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot P_c, \quad (2.6)$$

звідки витікає, що ЕРС витка будь-якої обмотки, розташованої на одному і тому ж стержні однакова, оскільки виток кожної з обмоток зчеплений з одним і тим же магнітним потоком, сконцентрованим в сталі стержня. Цей важливий висновок лежить в основі визначення кількості витків усіх обмоток, оскільки при неробочому ході для кожної i -ї обмотки на одному і тому ж стержні справедлива рівність

$$E_{cBH} = E_{cHH} = \dots = E_{ci} = \frac{U_{\phi BH}}{W_{BH}} = \frac{U_{\phi HH}}{W_{HH}} = \dots = \frac{U_{\phi i}}{W_i} = E_c = U_c, \quad (2.7)$$

то кількість витків i -ї обмотки

$$W_i = \frac{U_{\phi i}}{U_c}. \quad (2.8)$$

Слід зазначити, що для обмоток, з'єднаних по схемі "зигзаг":

$$W_z = 1,155 \cdot U_{\phi n} / U_c. \quad (2.9)$$

оскільки полуобмотки знаходяться на різних стержнях.

Важливий момент при розрахунку обмоток - правильний вибір кількості паралельних провідників та розмірів цих провідників, що забезпечують необхідний переріз витка P_c .

В циліндрових обмотках з круглого проводу вибирають діаметр проводу, найближчий за площею перерізу до перерізу $П_г$. В деяких випадках перетин $П_г$ забезпечують сумарним перетином двох-трьох проводів, що з'єднуються паралельно (в паралель).

В одно- і багат шарових циліндрових, гвинтових і безперервних котушкових обмотках, які виконують з прямокутного проводу, бажано застосовувати провідники більшого перерізу, що спрощує намотування обмотки на верстаті та дозволяє отримати найкомпактніше розміщення обмотки на магнітопроводі.

Проте слід пам'ятати, що надмірний перетин проводу призводить до підвищення додаткових втрат від вихрових струмів, обумовлених полями розсіювання, та до погіршення умов охолодження обмотки. Тому гранично великі розміри прямокутного проводу пов'язують з максимально допустимою питомою величиною теплового потоку (втрат в обмотці на одиницю її поверхні q , $Вт/м^2$). Величина $q \leq 1200 \dots 1400 \text{ Вт/м}^2$ для трансформаторів з природною циркуляцією масла.

Обмеження, що впливають на вибір розмірів провідників і число їх в паралель, є розрахована висота обмоток l . Цю вимогу треба виконати так, щоб реальна обмотка мала висоту, близьку до раніше розрахованої. При цьому в багат шарових циліндрових обмотках необхідно прагнути до рівного числа витків у всіх шарах, а в безперервних котушкових обмотках виконувати котушки з однаковим числом витків. Для усіх типів обмоток кількість охолоджуючих каналів повинна бути такою, щоб забезпечити q , близьке до допустимого, але не перевищуючи його.

Виконання цих рекомендацій дозволить виконати обмотку компактною, а отже заощадити витрату активних матеріалів обмоток і магнітопроводу, тобто в цілому понизити масу трансформатора.

Остаточні розміри провідників повинні відповідати стандартним, згідно яким треба уточнити густину струму j та висоту обмоток. Уточнені величини використовують у подальших розрахунках.

По остаточно прийнятій кількості витків уточнюється реальна індукція в стержні B_c .

Особливості конструкції вказаних типів обмоток визначають подальший розрахунок їх геометричних розмірів. Докладні методики розрахунку обмоток різних типів наведені в довідковій літературі.

Задача 2.6. Оцінити зміну ЕРС витка щодо базового значення, якщо задана відносна зміна параметрів у табл. 2.5. Зробити висновки.

Таблиця 2.5

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Діаметр стержня, D_c	+0,05	-	-0,05	-	+0,07	+0,03
Індукція в стержні, B_c	-	-0,1	+0,1	-0,05	+0,05	-0,15
Коефіцієнт k_c	-	-	-0,03	-0,03	-	+0,01
Частота, f	-	-	-	+0,03	-0,2	+0,1

Задача 2.7. Визначити індукцію в стержні трифазного трансформатора за даними, наведеними в табл. 2.6.

Таблиця 2.6

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, S_n , кВ·А	250	400	1000	2500	4000	6300
Номінальні напруги, U_{BH}/U_{HH} , кВ	35/0,4	10/0,69	20/0,4	6/0,4	35/10,5	35/6,3
Схема і група з'єднання обмоток	У/Ун-0	Д/Ун-11	У/Ун-0	Д/Ун-11	У/Д-11	У/Д-11
Діаметр стержня, D_c , см	16	18	22	32	32	38
Кількість витків обмотки НН, W_{HH}	40	52	19	10	426	176
Коефіцієнт заповнення k_c	0,82	0,84	0,86	0,865	0,87	0,89

Задача 2.8. Визначити кількість витків обмоток трифазного двохобмоткового трансформатора загального призначення з ПБЗ. Вихідні дані для розрахунків наведені в табл. 2.7.

Таблиця 2.7

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	160	400	630	1000	2500	6300
Номінальні напруги обмоток ВН і НН, U_{BH}/U_{HH} , кВ	10/0,23	35/0,4	35/0,69	20/0,69	20/0,69	20/6,3
Схема і група з'єднання обмоток	У/Ун-0	Д/Ун-11	У/Д-11	Д/Ун-11	Д/Ун-11	У/Д-11
Індукція в стержні, B_c , Тл	1,59	1,6	1,6	1,62	1,61	1,62
Діаметр стержня, D_c , см	14	18	20	22	28	38
Коефіцієнт заповнення k_c	0,82	0,84	0,84	0,86	0,86	0,89

Задача 2.9. Знайти кількість витків і визначити геометричні розміри обмотки НН трифазних силових масляних трансформаторів загального призначення, дані яких наведені у табл. 2.8.

Таблиця 2.8

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	160	400	1000	1600	2500	4000
Номінальна напруга обмотки НН, P_k , кВ	0,69	0,69	0,4	6,3	0,69	3,15
Схема і група з'єднання обмоток	У/Д-11	У/Д-11	Д/У-11	У/Д-11	Д/Ун-11	У/Д-11
Діаметр стержня, D_c , см	14	18	24	30	32	36

Таблиця 2.8

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Висота обмотки, l , см	53	64	71,2	45,6	66	60
Індукція в стержні, B_c , Тл	1,6	1,62	1,54	1,62	1,62	1,61
Густина струму, j , А/мм ²	1,51	1,66	1,8	3,4	2,86	3,01
Тип обмотки НН	циліндрична	циліндрична	гвинтова	циліндрична	гвинтова	циліндрична

Задача 2.10. Розрахувати обмотку ВН з ПБЗ трифазних силових масляних трансформаторів, дані яких наведені у табл. 2.9.

Таблиця 2.9

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	160	400	630	1000	2500	6300
Напруга обмотки ВН, $U_{ВН}$, кВ	35	10	35	10	35	10
Схема і група з'єднання обмоток	У/Д-11	Д/Ун-11	У/Д-11	У/Ун-0	У/Ун-0	У/Д-11
ЕРС одного витка U_B , В	4,7	7,7	9,6	12,2	19,9	33,5
Висота обмотки НН, $l_{НН}$, см	53	60	73,5	78,2	109	106,3
Зовнішній діаметр обмотки НН, D_1 , см	19,5	24,1	29,1	31,2	39,7	52,7
Тип обмотки ВН	циліндрична	циліндрична	циліндрична	безперервна	безперервна	безперервна
Густина струму обмотки ВН, j , А/мм ²	1,77	1,8	1,45	1,79	1,77	1,9

Питання для самоконтролю

1. Написати вираз для визначення магнітного потоку у стержні.
2. Пояснити, чому ЕРС одного витка усіх обмоток трансформатора однакові.
3. Типи обмоток, які використовують у трансформаторах.
4. Як розташовують витки відомих обмоток трансформатора?

5. Навіщо роблять транспозицію у гвинтових обмотках?
6. В яких межах використовують величини густини струму?
7. Як знайти приблизний переріз витка обмотки? Яку остаточну величину його приймають? Як розуміти термін «у паралель»?
8. Як знизити додаткові втрати в обмотках?
9. Які марки провідників використовують для обмоток?
10. Що розуміють під терміном «вікно трансформатора»?
11. Написати загальну формулу для визначення висоти обмотки.
12. Написати загальну формулу для визначення ширини обмотки.
13. Написати вираз для знаходження маси обмотки.
14. Загальна формула, по якій розраховують втрати в обмотці.
15. Як і навіщо розраховують питомий тепловий потік?

2.3. Розрахунок параметрів КЗ

Втрати P_K і напруга U_K відносяться до параметрів КЗ і задаються технічними умовами або стандартами. Згідно вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 11677-75, у виготовлених трансформаторах загального призначення P_K не повинне перевищувати +10%, а U_K - $\pm 10\%$ заданих величин. Для проектувальника – половину від вказаних величин.

Повні втрати КЗ

$$P_K = k_{\partial 1} P_{осн.1} + k_{\partial 2} P_{осн.2} + k_{\partial.отв.1} P_{отв.1} + k_{\partial.отв.2} P_{отв.2} + P_{\delta}, \quad (2.10)$$

де $P_{осн.1}$ і $P_{осн.2}$ - основні втрати в обмотках; $k_{\partial 1}$, $k_{\partial 2}$, $k_{\partial.отв.1}$, $k_{\partial.отв.2}$ - коефіцієнти збільшення основних втрат за рахунок впливу полів розсіяння; $P_{отв.1}$ і $P_{отв.2}$ - основні втрати у відводах первинної і вторинної обмоток; P_{δ} - втрати в баку від полів розсіяння.

Згідно стандарту ГОСТ 11677-75 основні втрати визначаються при температурі 75°C для масляних трансформаторів, для сухих - згідно класу нагрівостійкості ізоляції.

Основні (омічні) втрати в обмотках і відводах визначаються по виразу

$$P_{осн} = I_{фн}^2 \cdot R_{обм} = I_{фн}^2 \cdot \rho \cdot \frac{l_w}{\Pi} \cdot \frac{\Pi}{\Pi} \cdot \frac{\gamma}{\gamma} = \frac{\rho}{\gamma} j^2 (l_w \Pi g) = k \cdot j^2 \cdot G, \quad (2.11)$$

де $\rho_{75^\circ C} = 0,02135 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для мідного проводу; $\rho_{75^\circ C} = 0,0344 \cdot 10^{-6} \text{ Ом} \cdot \text{м}$ для алюмінієвого проводу; l_w і Π - відповідно довжина і переріз проводу обмотки; γ - питома густина, для міді $\gamma = 8900 \text{ гк/м}^3$, для алюмінію $\gamma = 2700 \text{ гк/м}^3$; j - густина струму, А/мм^2 ; $k = 2,4$ для мідних обмоток при температурі 75°C і $k = 12,75$ - для алюмінієвих; G - маса металу обмотки, кг .

Середній коефіцієнт додаткових втрат для обмотки з прямокутної міді

$$k_{\partial} = 1 + 1,73 \beta^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 a^4 (n^2 - 0,2), \quad (2.12)$$

а з круглого проводу

$$k_{\partial} = 1 + 0,8\beta_1^2 \left(\frac{f}{\rho \cdot 10^4} \right)^2 d^4 (n^2 - 0,2), \quad (2.13)$$

де $\beta = bmk_p / l$ для прямокутного проводу і $\beta_1 = bmk_p / l$ - для круглого проводу; m - кількість провідників по висоті обмотки; n - кількість провідників по ширині обмотки; a і b - відповідно радіальний і осьовий розмір голого провідника обмотки; d - діаметр круглого провідника; l - загальний осьовий розмір висоти обмотки; $k_p \approx 0,95$ - коефіцієнт приведення поля розсіювання (коефіцієнт Роговського).

За наявності паралельних проводів можуть виникати додаткові втрати за рахунок нерівномірного розподілу струмів між паралельними провідниками при впливі поля розсіювання. В безперервних обмотках здійснюється повна рівномірна транспозиція, що виключає ці втрати. При використуванні гвинтових обмоток за рахунок недосконалості транспозиції ця складова додаткових втрат зростає.

При попередніх розрахунках втрати у відводах визначаються по (2.11) без врахування додаткових втрат.

Додаткові втрати, які створюються в стінках баку полями розсіювання враховують, Вт:

$$P_{\partial} \approx 10 \cdot k_{\partial} \cdot S_n,$$

де $k_{\partial} = 0,01 \dots 0,04$ для трансформаторів потужністю від 100 до 16000 кВ·А.

Величина U_{κ} визначається геометричною сумою активної U_a і реактивної U_p складових. Активна складова, $U_a = P_{\kappa} / (10S_n)\%$, а реактивна:

$$U_p = \frac{7,92 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot K_p}{U_e^2}. \quad (2.14)$$

Вираз (2.14) справедливий для рівновисоких концентричних обмоток з рівномірним розподілом витків по висоті. У разі відмінності висот обмоток (у тому числі і через відключені регулювальні витки обмотки ВН) знайдене по (2.14) значення U_{κ} необхідно збільшити на коефіцієнт k_q , рекомендації по визначенню якого приведені в [2].

В процесі розрахунку P_{κ} і U_{κ} необхідно користуватися реальними розмірами і параметрами трансформатора, а не спочатку заданими.

Задача 2.11. Визначити масу обмоток і основні втрати в них для двохобмоткових трифазних силових масляних трансформаторів, дані яких наведені в табл. 2.10. Розрахунок для обмотки ВН вести при 100% витків.

Таблиця 2.10

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, кВ·А	160	630	1000	2500	4000	6300
Тип обмоток НН/ВН	циліндр. циліндр.	циліндр. циліндр.	гвинт. циліндр.	безпер. безпер.	циліндр. безпер.	гвинт. безпер.
Зовнішній діаметр обмоток НН/ВН, см	19,5/33,5	29,6/40,6	32/46,5	42/55,2	47,84/56	51,3/67,7

Таблиця 2.10

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Внутрішній діаметр обмоток НН/ВН, <i>см</i>	14,8/24,9	23/31,8	25/36,8	35/47,4	39,5/51,84	39,5/57,3
Кількість витків обмоток НН/ВН	148/4550	189/630	34/1790	270/910	100/192	100/672
Переріз витка обмоток НН/ВН, <i>мм²</i>	51,1/1,77	63,9/21,22	481,6/9,51	44,1/13,5	140,4/74,2	385,2/57,9
Густина струму в обмотках НН/ВН, <i>А/мм²</i>	1,51/1,49	1,81/1,72	1,74/1,75	3,0/3,05	3,01/3,12	1,73/1,79

Задача 2.12. Визначити повні втрати КЗ в трансформаторах, використовуючи дані попередньої задачі і табл. 2.11.

Таблиця 2.11

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт β для обмоток НН/ВН	0,88/0,75	1,65/0,85	0,78/0,7	0,6/0,57	0,86/0,61	0,54/0,67
Розміри провідників а або d для обмоток НН/ВН, <i>см</i>	0,8/0,15	0,6/0,52	0,28/0,26	0,45/0,25	0,53/0,4	0,93/0,47
Кількість радіальних провідників обмоток НН/ВН, <i>n</i>	2/17	2/6	8/10	7/13	5/10	6/10

Задача 2.13. Визначити коефіцієнти додаткових втрат для обмоток трансформаторів за даними табл. 2.12.

Таблиця 2.12

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, кВ·А	250	400	630	1600	2500	4000
Тип обмотки	ци- ліндр.	ци- ліндр.	ци- ліндр.	безпер.	гвинто- ва	безпер.
Радіальний і осьовий розміри провідника або діаметр, <i>см</i>	0,55/1,1	1,16	0,4/1,08	0,4/0,74	0,6/1,56	0,41/1,8
Кількість провідників по висоті і ширині обмоток <i>m/n</i>	20/2	53/2	24/8	70/10	42/6	44/10
Висота обмотки, <i>см</i>	59	4	113	79,1	95,1	106,8

Задача 2.14. За даними табл. 2.13 визначити питомий тепловий потік обмотки, проаналізувати результат і дати рекомендації.

Таблиця 2.13

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип обмотки	циліндрична 2-шарова	циліндрична багатошарова	циліндрична багатошарова	безперервна	гвинтова	безперервна
Втрати в об- мотці, Вт	1110	2200	4800	6500	6400	11000
Площа охо- лодження, m^2	1,03	4,1	4,6	6,1	5,9	13,0

Задача 2.15. За даними табл. 2.14 визначити напругу КЗ U_K трифазного трансформатора загального призначення.

Таблиця 2.14

Величини	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, кВ·А	160	250	1000	1600	2500	6300
Втрати КЗ, Вт	2680	3600	11400	14450	21120	49700
ЕРС витка, В	4,65	5,7	13,6	21,3	23,3	31,5
Приведений канал розсіювання, см	5,2	5,2	5	4,17	5,17	6,7
Коефіцієнт β	1,32	1,33	1,58	2,83	2,1	1,35

Питання для самоконтролю

1. Назвіть параметри КЗ. Які стандартні вимоги до меж їх відхилення?
2. Дайте загальний вираз для втрат КЗ.
3. Чим зумовлені додаткові втрати КЗ. Як їх враховують?
4. Що розуміють під напругою КЗ. Які складові?
5. Як розрахувати активну складову напруги КЗ?
6. Написати основні величини, які обумовлюють реактивну складову напруги КЗ.
7. Яким явищем обумовлена реактивна складову напруги КЗ?
8. Дати криві розподілу полів розсіювання повздовж та поперек обмоток двофазового трансформатора.
9. Які параметри схеми заміщення трансформатора знаходять з розрахунку цього розділу? Дати вирази та співвідношення.
10. Як визначити струм сталого КЗ?

2.4. Механічні сили і нагрів обмоток при аварійному КЗ

Аварійне КЗ супроводжується багатократним збільшенням струмів в обмотках у порівнянні з номінальними, що обумовлює нагрів обмоток і ударні механічні сили, які діють на обмотки і їх частини.

Механічні сили виникають в результаті взаємодії струму обмотки з полями розсіювання. Звичайно сумарні механічні сили розділяють: на радіальні, що розтягують зовнішню обмотку і стискають проводи внутрішньої обмотки; на осьові, які стискають або розтягують обмотку в осьовому напрямі.

Радіальна сила, H :

$$F_p = 0,628(i_{\kappa M} W)^2 \beta \cdot k_\delta \cdot 10^{-6}, \quad (2.15)$$

де $i_{\kappa M} = 1,41 \cdot k_M I_{\kappa, y}$ - максимальне миттєве значення струму аварійного КЗ, А;

$$k_M = 1 + e^{-\pi U_a / U_p} - \text{ударний коефіцієнт}; \quad I_{\kappa, y} = \frac{100 I_H}{\left(1 + \frac{100 S_H}{U_\kappa S_\kappa}\right)} - \text{сталий струм аварійного}$$

КЗ, А; S_κ - потужність КЗ електричної мережі згідно [2]; $\beta = l_\delta / l$ - відношення середньої довжини витка до висоти обмотки.

Осьова сила для рівновисоких обмоток і обмоток, які не мають розривів, стискує їх, H :

$$F'_{oc} = F_p a_p / 2l. \quad (2.16)$$

За наявності розривів в одній з обмоток і їх нерівних висотах виникає додаткова осьова сила, яка прагне збільшити розрив або нерівність висот, H :

$$F''_{oc} = F_p \frac{l_\kappa}{l'' k_p m}, \quad (2.17)$$

де l_κ - величина розриву в обмотці або різниця висот обмоток; l'' - відстань від верхньої стержня до стінки бака; m - коефіцієнт, який вибирають з рисунку [2].

Сумарна осьова сила $F_{сж}$ визначається згідно рекомендаціям рисунку [2].

Оцінку механічної міцності обмоток на розтягування (обмотка ВН) чи стиснення (обмотка НН) проводять по напрузі на розрив в проводі обмотки:

$$\sigma_p = \frac{F_p}{2\pi W\Pi}, \text{ Па}. \quad (2.18)$$

Дію осьових сил перевіряють по напрузі стиснення в прокладках міжкатушкової (міжвиткової) чи опорної ізоляції обмоток:

$$\sigma_{сж} = \frac{F_{сж}}{nab}, \text{ Па}, \quad (2.19)$$

де $F_{сж}$ - осьова сила стиснення, яка залежить від висот і геометрії розривів у обмотках, H ; Π - переріз витка обмотки, м^2 ; n - число прокладок по колу; a - радіальний розмір обмотки, м ; b - ширина прокладки, м .

Механічна міцність достатня, якщо для мідних обмоток $\sigma_p < 30...40 \text{ МПа}$ для трансформаторів потужністю до 1600 кВ·А, $\sigma_p < 50...60 \text{ МПа}$ для трансформаторів потужністю до 6300 кВ·А і для великих потужностей $\sigma_p < 100...150 \text{ МПа}$, для алюмінієвих обмоток в трансформаторах до 6300 кВ·А $\sigma_p < 22...25 \text{ МПа}$. Напряга $\sigma_{сж} < 18...20 \text{ МПа}$ для трансформаторів потужністю до 6300 кВ·А, а для великих потужностей $\sigma_{сж} < 35...40 \text{ МПа}$.

При аварійному КЗ вважають, що внаслідок короткочасності процесу усе тепло, що виділяється в обмотках, йде тільки на їх нагрівання, підвищуючи температуру.

Температуру обмотки через t_κ після виникнення КЗ можна визначити:

- для мідних обмоток

$$\Theta_{\kappa\mu} = \frac{670t_{\kappa}}{12,5\left(\frac{U_{\kappa}}{\Delta}\right)^2 - t_{\kappa}} + \Theta_{\mu}; \quad (2.20)$$

- для алюмінієвих обмоток

$$\Theta_{\kappa\alpha} = \frac{670t_{\kappa}}{5,5\left(\frac{U_{\kappa}}{\Delta}\right)^2 - t_{\kappa}} + \Theta_{\mu}, \quad (2.21)$$

де Θ_{μ} - початкова температура, °С.

Згідно стандарту ГОСТ 11677-75 для класу нагрівостійкості ізоляції А прийняти температури $\Theta_{\kappa\mu} \leq 250^{\circ}\text{C}$, $\Theta_{\kappa\alpha} \leq 200^{\circ}\text{C}$ при тривалості КЗ $t_{\kappa} = 5\text{с}$ та $\Theta_{\mu} = 90^{\circ}\text{C}$.

Задача 2.16. Визначити зусилля, які діють на обмотки трифазного силового масляного трансформатора, якщо відомо: $S_{\mu} = 6300 \text{ кВ}\cdot\text{А}$, номінальний фазний струм обмотки ВН $I_{\phi\mu} = 104 \text{ А}$, $U_{\kappa} = 7,5\%$, кількість витків обмотки $W_{\text{ВН}} = 640$, $k_{\mu} = 1,55$, $\beta = 1,35$, $a_p = 6,7 \text{ см}$, $l = 126 \text{ см}$, $l_{\kappa} = 14,4 \text{ см}$, $l'' = 7,5 \text{ см}$, коефіцієнт $m = 4$.

Задача 2.17. Визначити напругу на розрив і стиснення в обмотках при відомих: $F_p = 3,55 \cdot 10^6 \text{ Н}$, $F_{\text{сж}} = 2,6 \cdot 10^5 \text{ Н}$, кількість витків $W = 640$, переріз провідника $\Pi = 57,9 \text{ мм}^2$, число рейок $n = 12$, розміри прокладок $a \times b = 5,8 \times 4,0 \text{ см}$.

Задача 2.18. Визначити температуру обмоток після $t_{\kappa} = 5\text{с}$ з раптового КЗ трансформатора потужністю $S_{\mu} = 4000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ з напругою $U_{\kappa} = 6,5\%$ і густиною струму $3,1 \text{ А/мм}^2$. Яка буде температура, якщо обмотки виконані з алюмінію і густина струму $j = 1,75 \text{ А/мм}^2$?

Питання для самоконтролю

1. Внаслідок якої взаємодії з'являються електродинамічні зусилля, які діють на обмотки трансформатора?
2. Показати напрями електродинамічних зусиль, які діють на два провідника, якщо по ним протікають струми однакових і протилежних напрямків.
3. При якому струмі електродинамічні зусилля найбільші? Дати загальний вираз.
4. Чи залежить найбільший струм раптового КЗ від фази напруги у момент початку КЗ?
5. Показати напрямки дій електромеханічних сил на обмотки трансформатора.
6. Що роблять додаткові сили F_{oc}'' при нерівних висотах обмоток?
7. Дати загальний вираз для зусилля F_p .
8. Дати загальний вираз для зусилля F_{oc}'' .
9. Які частини обмоток перевіряють на механічну міцність?
10. Які існують оцінки щодо нагрівання обмоток при раптовому КЗ?

2.5. Розрахунок магнітного кола

Метою розрахунку є визначення величин втрат (p_0 , кВт) і струму (i_0 , %) неробочого ходу при номінальній напрузі. Вважають, що втрати в магнітному колі p_0 дорівнюють втратам в сталі при номінальному навантаженні, а струм i_0 відповідає струму первинної обмотки при неробочому ході.

Згідно з вимогами стандарту ГОСТ 11677-75 відхилення втрат p_0 складає не більше +15%, а струму i_0 не більше +30% від заданих величин у виготовленому трансформаторі (при проєктуванні – половину від вказаних величин).

Враховуючи, що струм неробочого ходу має активну i_{0a} і реактивну i_{0p} складові, при розрахунках знаходять кожен з цих складових і результуючий струм

$$i_0 = \sqrt{i_{0a}^2 + i_{0p}^2}. \quad (2.22)$$

Активну складову розраховують як

$$i_{0a} = \frac{p_0}{10 \cdot S_n}, \% \quad (2.23)$$

де p_0 підставляють у ватах, а S_n – у кВ·А.

В загальному випадку втрати в магнітопроводі трансформатора визначають

$$p_0 = \sum_{i=1}^n p_{y\partial i} G_i, \text{ Вт} \quad (2.24)$$

де $p_{y\partial i}$, Вт/кг – питомі втрати на одиницю маси, які залежать від величини індукції B_i (Тл) у i -му відрізку магнітного кола; ці втрати знаходять за таблицями [1] із залежності $p_{y\partial i} = f(B_i)$, Вт/кг; G_i – маса i -тої частини магнітопроводу, де індукція однакова, кг.

Втрати неробочого ходу p_0 мають складові: у стержнях, ярмах, кутах (для холоднокатаних сталей). Втрати в кутах магнітопроводу розрізняють: в кутах при повороті магнітних силових ліній повздовж площини листів (їх так називають – втрати у кутах) і в місцях стиків пластин за рахунок обгину немагнітних проміжків поперек листів магнітопроводу (їх називають втратами у «зазорі» [1]). До речі, остання назва суперечить фізичній суті.

Для трифазної стержневої плоскої системи трансформатора втрати в холоднокатаній сталі розраховують:

$$p_0 = [K_{n.p.} \cdot K_{n.з.} (p_c \cdot G_c + p_y \cdot G_y' - 4p_y \cdot G_y + \frac{p_c + p_y}{2} \cdot K_{n.y.} \cdot G_y + \sum p_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3) \cdot K_{n.я.} \cdot K_{n.n.} \cdot K_{n.ш.}], \quad (2.25)$$

де p_c (Вт/кг) – питомі втрати в сталі стержнів, що визначають по уточненій індукції у стержні для вибраної марки сталі з таблиць [1];

p_y (Вт/кг) – питомі втрати в сталі ярем, що визначають подібно попередньому випадку, але використовуючи уточнене значення індукції у ярмі;

p_3 (Вт/кг) – питомі втрати у «зазорі», що визначають за [1] з урахуванням ін-

дукції, яку для прямих стиків у зоні стержня приймають рівній індукції в стержні (B_c), а для стиків у зоні ярма приймають рівною індукції в ярмі (B_y); для косих стиків індукцію вважають $B_3 = B_c / \sqrt{2}$;

n_3 – кількість однотипних кутів (проміжків);

Π_3 – площа проміжку(стику), яка рівна при прямих стиках площі стержня (Π_c) або ярма (Π_y), а для косих стиків приймають $\Pi_3 = \sqrt{2}\Pi_c$;

G_c, G'_y, G_y – відповідно маси стержнів, ярем і кутів, визначених за рекомендаціями [1].

У наведений вираз входять коефіцієнти, які враховують особливості конструкції і технології виготовлення. Їх чисельні значення приведені в [1]. Нижче наведена суть цих коефіцієнтів, що враховують збільшення втрат за рахунок впливу:

$K_{n.p.}$ – різкі листів сталі;

$K_{n.з.}$ – наявність або відсутність заусениць;

$K_{n.y.}$ – відхилення магнітних силових ліній від напрямку прокату в кутку і формі кута.

$K_{n.я.}$ – форми перерізу ярма;

$K_{n.n.}$ – пресування;

$K_{n.ш.}$ – перешихтовки верхнього ярма.

У загальному випадку величину індукції в i -тій ділянці магнітного кола уточнюють по формулі:

$$B_i = \frac{U_{1(2)}}{2\sqrt{2} f_1 W_{1(2)} \Pi_i}, \quad (2.26)$$

де $U_{1(2)}$ – фазна напруга первинної (вторинної) обмотки;

$W_{1(2)}$ – кількість витків у фазі відповідних обмоток; f_1 – частота напруги та струмів; Π_i – площа перерізу чистого заліза i -тої ділянки магнітопроводу.

Розрахована потужність втрат не повинна перевищувати плюс 7,5% від заданого значення у вихідних даних.

Використовуючи величину p_0 , по формулі (2.23) розраховують активну складову струму неробочого ходу i_{0a} .

Намагнічуюча потужність для того ж конструктивного виконання трансформатора розраховують по формулі аналогічній попередній формулі для втрат:

$$Q_0 = [K_{m.p.} \cdot K_{m.з.} (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G'_y - 4q_y \cdot G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \cdot K_{m.y.} \cdot K_{m.пл.} \cdot G_y + \\ + \sum q_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3) \cdot K_{m.я.} \cdot K_{m.n.} \cdot K_{m.ш.}], \quad (2.27)$$

де q_c і q_y ($B \cdot Ap / \text{кг}$) – питомі намагнічуючі потужності у стержні та ярмі, що визначаються за відповідними уточненими величинами індукцій з таблиць [1] в залежності від марки сталі;

q_3 ($B \cdot Ap / \text{м}^2$) – питома намагнічуюча потужність проміжків, що визначається за тими ж таблицями і індукціями, подібно до p_3 .

Чисельні значення має такі ж як у формулі (2.25). Фізична суть коефіцієнтів така ж як у (2.25), якщо літеру « n » замінити на літеру « m ». Числові значення цих коефіцієнтів наведені у [1].

Намагнічуюча потужність визначає реактивну складову струму неробочого ходу:

$$i_{0p} = \frac{Q_0}{10 \cdot S_n}, \%, \quad (2.28)$$

де Q_0 має розмірність $B \cdot Ap$, а S_n - $\kappa B \cdot A$.

Повний струм неробочого ходу знаходять по формулі (2.22), величина якого у спроектованому трансформаторі не повинна перевищувати більше плюс 15% від вихідних даних.

Задача 2.19. Один з трансформаторів має стержень з гарячекатаної сталі, де індукція 1,4 Тл. Другий трансформатор має стержень з холоднокатаної сталі, де індукція 1,6 Тл. В обох випадках коефіцієнти заповнення і магнітні потоки у стержнях однакові. Як співвідносяться діаметри стержнів у цьому випадку? Чому в сучасному трансформаторобудуванні віддається перевага холоднокатаній сталі?

Задача 2.20. Визначити активну площину перетину стержня (тільки сталі) магнітопроводу, якщо відомі дані наведені у табл. 2.15.

Таблиця 2.15

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Діаметр стержня D_c , м	0,09	0,16	0,22	0,28	0,34	0,38
Коефіцієнт заповнення сталі ізоляцією, K_z	0,95	0,95	0,97	0,95	0,97	0,95
Наявність пресуючої пластини	немає	немає	немає	є	є	є

Задача 2.21. Розрахувати величину магнітної індукції в стержні магнітопроводу трансформатора, використовуючи дані табл. 2.16 та додаткові відомості, які наведені до відповідних варіантів у табл. 2.15. Частота мережі 50 Гц.

Таблиця 2.16

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Величина фазної напруги, U , В	230	230	400	525	3150	10500
Кількість витків обмотки, W	120	37	34	27	112	300

Задача 2.22. Знайти кількість витків обмотки ВН трифазного трансформатора, використовуючи дані табл. 2.15 і дані табл. 2.17, у яких номери варіантів співпадають. Прийняти стандартну частоту мережі.

Таблиця 2.17

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Величина лінійної напруги, U , В	400	400	400	525	3150	10500

Таблиця 2.17

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Магнітна індукція в стержні, B_c , Тл.	1,57	1,59	1,58	1,61	1,59	1,59
Схема з'єднання обмоток	У	У	Д	Д	Д	Д

Задача 2.23. Розрахувати індукцію у перерізі стержня використовуючи дані з табл. 2.18. Частота мережі дорівнює 50 Гц.

Таблиця 2.18

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, S_n , кВ·А	25	160	630	1600	2500	6300
Напруга мережі обмотки НН, В	400	400	400	525	3150	10500
Кількість витків обмотки НН	120	37	34	27	112	300
Схема з'єднання обмоток НН	У	У	Д	Д	Д	Д
Діаметр стержня d_c , м	0,09	0,16	0,22	0,28	0,34	0,38
Кількість пакетів у стержні	5	6	8	7	8	9
Пресуюча пластина	немає	немає	немає	є	є	є
Коефіцієнт заповнення сталлю, k_3	0,95	0,97	0,95	0,96	0,97	0,97

Задача 2.24. Оцінити масу магнітопроводу тристержневого плоского трансформатора, дані якого наведені в табл. 2.19. Питома маса електротехнічної сталі прийняти 7650 кг/м^3 .

Таблиця 2.19

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	100	400	630	1000	4000	6300
Діаметр стержня, d_c , м	0,12	0,17	0,2	0,24	0,36	0,38
Кількість ступенів у стержні/ярі	6/5	6/5	7/5	7/6	9/7	9/7
Відстань між центрами стержнів, S , м	0,26	0,61	0,44	0,47	0,67	0,69
Висота стержня, l_c , м	0,414	0,65	0,84	0,92	0,84	1,43
Наявність пресуючої пластини	немає	немає	немає	є	немає	немає
Коефіцієнт заповнення сталлю, k_3	0,96	0,96	0,96	0,95	0,97	0,96

Задача 2.25. Дати порівняння питомих втрат у холоднокатаній і гарячекатаній сталі марок 3404 та 1513 при індукції 1,5 Тл і товщині листів сталей 0,35 мм.

Задача 2.26. Розрахувати втрати і активну складову струму неробочого ходу у відсотках магнітопроводу трифазного тристержневого трансформатора, дані якого наведені у табл. 2.20 2.20. Потрібні числові значення потрібних величин для розрахунку знайти у [1].

Таблиця 2.20

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, S_n , кВ·А	100	400	630	1000	4000	6300
Діаметр стержня, м	0,12	0,17	0,2	0,23	0,36	0,4
Індукція у стержні, Тл	1,6	1,61	1,62	1,55	1,58	1,59
Індукція у ярмі, Тл	1,58	1,54	1,58	1,52	1,55	1,57
Площина перерізу: -стержнів, P_c , m^2 -ярма, P_y , m^2	0,01 0,0102	0,02 0,0206	0,0277 0,0284	0,0355 0,0361	0,09 0,092	0,11 0,115
Маса стержня, G_c , кг; Маса ярма, G'_y , кг	99 81	340 240,8	493 366	780 516	1862 1893	3390 2500
Кількість кутів: -прямих -косих	2 4	2 4	2 4	2 4	2 4	2 4
Марка сталі магнітопро- воду	3404	3404	3404	3404	3404	3404
Товщина листів сталі магнітопроводу, мм	0,35	0,35	0,3	0,35	0,3	0,35
Шихтовка пластинами	Одна пластина	Одна пластина	Дві плас- тини	Дві плас- тини	Одна пластина	Дві плас- тини

Задача 2.27. Визначити потужність намагнічування магнітопроводу і реактивну складову струму неробочого ходу у відсотках тристрижневого плоского трансформатора, використовуючи дані табл. 2.21. Додаткові дані, необхідні для розрахунків, знайти у [1].

Таблиця 2.21

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність, S_n , кВ·А	250	630	1000	2500	4000	6300
Індукція у стержні, B_c , Тл	1,61	1,57	1,58	1,58	1,57	1,57
Індукція у ярмі, B_y , Тл	1,58	1,58	1,55	1,56	1,55	1,57
Діаметр стержня, м	0,16	0,2	0,24	0,3	0,33	0,39
Площина перерізу: -стержня, P_c , m^2 ; -ярма, P_y , m^2	0,0175 0,018	0,0275 0,0283	0,04 0,042	0,063 0,065	0,0773 0,0795	0,1072 0,109
Маса стержнів, G_c , кг	219	573	768	1620	2893	2876

Таблиця 2.21

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Маса ярма, $G'_я$, кг	186	375	625	1136	1601	2337
Кількість кутів: -прямих; -косих	2 4	2 4	2 4	2 4	2 4	2 4
Марка електротехнічної сталі	3405	3404	3405	3404	M4X	3405
Товщина листів сталі, мм	0,3	0,35	0,35	0,3	0,28	0,35
Шихтовка пластин	Одна пластина	Дві пластини	Одна пластина	Дві пластини	Одна пластина	Дві пластини

Задача 2.28. Вказати величину струму неробочого ходу у відсотках, використовуючи дані табл. 2.22.

Таблиця 2.22

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Номінальна потужність, S_n , кВ·А	100	250	400	630	1000	2500
Втрати неробочого ходу, p_x , Вт	335	786	998	1660	2130	4070
Намагнічуюча потужність, Q_x , ВАр	1209	2900	4913	8435	14360	13000

Питання для самоконтролю

1. Яка мета теплового розрахунку трансформатора?
2. Мета теплового розрахунку трансформатора
3. Які способи теплопередачі мають місце у трансформаторі?
4. Які перепади температур розраховують у трансформаторі?
5. Як розподіляється температура в обмотках трансформатора?
6. З яких поверхонь відводиться тепло у циліндричних та гвинтових обмотках?
7. Написати загальний вираз для кількості тепла при передачі теплопровідністю.
8. Написати загальний вираз для кількості тепла при передачі конвекцією.
9. З яких міркувань розраховують розмір бака трансформатора?
10. Якими способами віддається тепло від трансформатора в оточуюче повітря?
11. Для чого призначені радіатори?

2.6. Тепловий розрахунок

Втрати, що виділяються в обмотках, магнітопроводі і конструктивних елементах, проявляються у вигляді нагрівання цих частин конструкції силового масляного трансформатора. У сталому тепловому режимі усе тепло (або тепловий потік) трансформатора віддається в оточуюче середовище.

Величина температури нагрівання залежить також від температури оточуючого

середовища, тому при розрахунках знаходять перевищення температури окремих частинах трансформатора над оточуючим повітрям, температуру якого приймають згідно міждержавного стандарту ГОСТ 11677-85 – 40°C. Величина цього перевищення складається з перевищень температур на окремих ділянках в напрямку до оточуючого повітря і не повинна бути більш припустимого для певного класу нагрівостійкості ізоляції. Для силових масляних трансформаторів це перевищення не більше ніж 65°C (клас нагрівостійкості масла та ізоляції – “А”).

Формули для розрахунку перевищень (перепадів) температури на окремих ділянках залежать від способу теплопередачі, яка може бути: теплопровідністю, випромінюванням та конвекцією.

Теплопередача теплопровідністю відбувається у середовищах обмоток та магнітопроводу (від найбільш гарячої точки до поверхонь).

Для циліндричних обмоток, при умові однакового відведення тепла з обох бокових поверхонь, середнє перевищення між самої гарячої серединою і поверхнею розраховують згідно формулі:

$$\Delta\theta_{o.cp} = \frac{2}{3} \cdot \frac{p \cdot a^2}{8\lambda_{cp}}, \quad (2.29)$$

де p – втрати в одиниці об’єму обмотки, які знаходять згідно рекомендаціям [1], $Вт/м^3$; a – радіальний розмір обмотки, $м$; λ – середня питома теплопровідність обмотки [1], $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

Якщо виконання циліндричної обмотки на паперобакелітовому циліндрі і має одну відкриту поверхню, то формула (2.29) приймає вигляд:

$$\Delta\theta_{o.cp} = \frac{2}{3} \cdot \frac{p \cdot (0,75 \cdot a)^2}{2\lambda_{cp}}, \quad (2.30)$$

У малошарових циліндричних, гвинтових і безперервних спіральних котушкових обмотках перевищення (тобто внутрішній перепад) температур знаходять:

$$\Delta\theta_o = \frac{q \cdot \delta}{\lambda_{iz}}, \quad (2.31)$$

де $q = \theta/S$ – щільність теплового потоку, $Вт/м^2$; δ – однобічна товщина ізоляції прямокутного проводу, $м$; λ_{iz} – питома теплопровідність ізоляції, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

Далі тепло віддається з поверхонь обмоток у охолоджуюче трансформаторне масло конвекційним шляхом завдяки різниці температур. Ця різниця (або перепад) температур поверхні обмоток над охолоджуючим маслом при відсутності радіальних охолоджуючих каналів дорівнює:

$$\Delta\theta_{o.m} = k \cdot q^{0,6}, \quad (2.32)$$

де $k = 0,285$ – коефіцієнт при наявності охолоджуючих каналів, розміри яких відповідають рекомендаціям [1].

Перепад температури між поверхнями обмоток та охолоджуючим маслом при наявності радіальних каналів охолодження

$$\Delta\theta_{o.m} = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot 0,35 \cdot q^{0,6}, \quad (2.33)$$

де k_1 – коефіцієнт, що враховує швидкість руху масла усередині обмотки [1]; k_2 – ко-

ефіцієнт, що враховує утруднення руху масла в обмотках ВН, НН і СН [1]; k_3 – коефіцієнт, що враховує геометрію каналу [1].

Знайдені перевищення дозволяють визначити середнє перевищення температури обмотки над температурою охолоджуючого масла:

$$\Delta\theta_{o.m.cp} = \Delta\theta_{o.cp} + \Delta\theta_{o.m}, \quad (2.34)$$

Надалі тепло віддається охолоджуючим маслом внутрішнім поверхням бака і радіаторів, з зовнішніх поверхонь яких – у оточуюче повітря шляхом конвекції та випромінювання.

Розміри бака знаходять з урахуванням розмірів активної частини та необхідних ізоляційних проміжків між стінками баку і частинами які знаходяться під напругою [1]. Знайдені розміри бака по довжині (А), по ширині (В) та по висоті (Н), дозволяють розрахувати площину конвекції вертикальних стінок овалного баку

$$P_{к.б.} = [2(A - B) + \pi B]H_{б.}, \quad (2.35)$$

та кришки баку

$$P_{к.кр.} = 0,5[(A - B) \cdot (B + \Delta B) + \pi(B + \Delta B)^2 / 4], \quad (2.36)$$

де $\Delta B = 0,1...0,2$ м – подвоєна ширина верхньої рамки бака; 0,5 – коефіцієнт, що враховує ефективність охолодження конвекцією кришки бака.

Для баку з навісними радіаторами орієнтована поверхня випромінювання приймають:

$$P_{в.} = k \cdot P_{к.б.}, \quad (2.37)$$

де $k = 1,5...2,0$ – коефіцієнт, враховуючий співвідношення (2.37) поверхні випромінювання до гладкої частини бака при навісних радіаторах.

З рівняння теплопередачі (додаток усіх втрат дорівнює потужності відданого тепла) знаходять необхідну повну поверхню конвекції:

$$\sum P_{к} = \frac{1,05 \cdot \sum p}{2,5 \cdot \Delta\theta_{б.в.}^{1,25}} - 1,12 P_{в.}, \quad (2.38)$$

де $\sum p = p_0 + p_{к} + p_{дооб}$ – повна потужність втрат, Вт; $\Delta\theta_{б.в.} = 50^{\circ}C - (5 - 6)^{\circ}C$ – максимально допустиме перевищення температури баку над оточуючим повітрям з урахуванням найбільшого дозволеного нагріву масла у верхніх шарах баку.

Використовуючи розраховану величину $\sum P_{к}$, знаходять необхідну поверхню конвекції радіаторів:

$$P_{к.p.} = \sum P_{к} - P_{к.б.} - P_{к.кр.}, \quad (2.39)$$

по якій підбирають кількість радіаторів [4] з необхідною поверхнею $P_{к.p.}$ та перевіряють можливість їх розташування навколо бака.

Після уточнення повної поверхні конвекції радіаторів та поверхні випромінювання знаходять уточнений перепад температур між баком і повітрям:

$$\theta_{б.в.} = \left[\frac{1,05(p_0 + p_{к} + p_{дооб})}{2,8P_{н} + 2,5P_{к}} \right]^{0,8}, \quad (2.40)$$

Середню температуру перевищення масла над внутрішньою поверхнею бака приблизно розраховують:

$$\Delta\theta_{\text{м.б.}} = k_1 \cdot 0,165 \left[\frac{\sum p}{\sum \Pi_{\kappa}} \right]^{0,6}, \quad (2.41)$$

де $k_1 = 1$ для природного охолодження маслом; $k_1 = 0,9$ для охолодження обдуванням.

Загальне перевищення повинно для класу нагрівостійкості ізоляції “А” виконувати умову:

$$\Delta\theta_{o.e} = \Delta\theta_{o.c.p} + \Delta\theta_{o.m} + \Delta\theta_{\text{м.б.}} + \Delta\theta_{\text{б.в.}} \leq 65, \quad (2.42)$$

де $\Delta\theta_{o.e}$ – перевищення температури обмотки над оточуючим повітрям.

Задача 2.29. Знайти поверхню охолодження обмотки трифазного трансформатора, дані якого наведені у табл. 2.23.

Таблиця 2.23

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Потужність S , кВ·А	100	400	250	1000	630	4000
Висота обмотки l , м	0,46	0,65	—	—	—	—
Тип обмотки	циліндрична	циліндрична	гвинт. однох.	гвинт. двоход.	гвинт. двоход.	неперервна
Зовнішній діаметр, м	0,18	0,25	0,23	0,27	0,29	0,59
Внутрішній діаметр, м	0,148	0,2	0,17	0,325	0,22	0,46
Наявність каналів	нема	один	канал між ходами	канал між ходами	хода спарені	канал між ко-тушками
Кількість витків або ко-тушок	—	—	40	16	21	72
Коефіцієнт закриття охолоджуючої поверхні	0,75	0,75	0,75	0,75	0,75	0,8

Задача 2.30. Знайти питомий тепловий потік обмотки НН трифазного трансформатора за даними табл. 2.24

Таблиця 2.24

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Основні втрати в обмотці, Вт	1185	1500	2170	2910	2870	7820
Тип обмотки	циліндрична	гвинтова одноход.	циліндрична	циліндрична	гвинтова двоход.	гвинтова двоход.
Наявність каналів охолодження	один	є	нема	один	спарені	між ходами
Висота обмотки, м	0,38	0,59	0,63	0,68	0,58	0,97
Зовнішній діаметр, м	0,172	0,23	0,25	0,26	0,29	0,37
Внутрішній діаметр, м	0,128	0,17	0,22	0,21	0,22	0,3
Кількість витків	37	40	25	40	21	22
Коефіцієнт закриття охолоджуючої поверхні	0,75	0,8	0,75	0,75	0,75	0,75

Таблиця 2.24

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт додаткових втрат	1,025	1,03	1,012	1,04	1,03	1,02

Задача 2.31. Знайти питомий тепловий потік обмотки ВН трифазного трансформатора по необхідним даним наведених у табл. 2.25.

Таблиця 2.25

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Тип обмотки	циліндрична	циліндрична	циліндрична	котушкова	котушкова	котушкова
Кількість витків фази або котушок	928	448	2030	34	50	42
Основні втрати в обмотці	1100	3100	5200	10600	16680	25400
Зовнішній діаметр, м	0,25	0,34	0,43	0,49	0,65	0,685
Внутрішній діаметр, м	0,19	0,28	0,33	0,42	0,53	0,57
Висота обмотки, м	0,308	0,63	0,69	0,63	0,94	0,91
Присутність каналу в обмотці	один	один	є	є	спарені	є
Коефіцієнт додаткових втрат	1,015	1,02	1,015	1,025	1,04	1,03
Коефіцієнт закриття охолоджуючої поверхні	0,8	0,83	0,75	0,85	0,85	0,85

Задача 2.32. Знайти середній перепад температури в обмотці НН трифазного трансформатора. Дані для розрахунків подані в табл. 2.26.

Таблиця 2.26

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Втрати в обмотці НН, Вт	1550	1500	17200	4700	3200	13900
Тип обмотки НН	циліндрична	гвинт. од-ноходова	циліндрична	гвинт. дво-ходова	гвинт. дво-ходова	циліндрична
Присутність каналів	є	є	є	є	спарені	є
Висота обмотки, м	0,5	0,59	1,09	0,75	0,6	0,941
Кількість витків	36	40	348	17	19	211
Зовнішній діаметр обмотки	0,238	0,227	0,496	0,33	0,32	0,489
Внутрішній діаметр обмотки	0,168	0,168	0,385	0,274	0,25	0,385
Коефіцієнт закриття охолоджуючої поверхні	0,75	0,8	0,85	0,75	0,75	0,75
Обмотка розташована на ізоляційному циліндрі	так	так	так	так	так	так

Таблиця 2.26

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт додаткових втрат	1,01	1,02	1,03	1,02	1,03	1,03
Товщина ізоляції проводу на одну сторону, δ , мм	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25	0,25
Коефіцієнт теплопровідності, λ_{cp} , $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	0,17	0,17	0,042	0,17	0,17	0,0074

Задача 2.33. Знайти перепад температур в обмотці ВН трифазного трансформатора, дані якого наведені у табл. 2.27. Товщина ізоляції проводу на одну сторону становить 0,25 мм. Обмотка розташована на ізоляційному циліндрі.

Таблиця 2.27

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Коефіцієнт додаткових втрат	1,02	1,01	1,03	1,01	1,03	1,02
Втрати в обмотці, Вт	775	3070	5180	6183	10590	16000
Внутрішній діаметр обмотки, м	0,19	0,28	0,324	0,37	0,42	0,5
Зовнішній діаметр обмотки м	0,25	0,34	0,43	0,48	0,49	0,63
Коефіцієнт закриття охолоджуючої поверхні	0,75	0,84	0,75	0,8	0,85	0,8
Висота обмотки, $l_{об}$, м	0,38	0,63	0,69	0,82	0,63	1,25
Коефіцієнт теплопровідності, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$	0,5	0,55	0,58	0,038	0,17	0,17
Тип обмотки ВН	циліндрична	циліндрична	циліндрична	циліндрична	катушкова	катушкова
Наявність охолоджуючих каналів	нема	є	є	є	є	є
Кількість витків	986	448	2132	3159	220	789

Задача 2.34. Знайти перевищення температури поверхні обмотки над охолоджуючим трансформаторним маслом. Дані для розрахунку подані у табл. 2.28. При розрахунках коефіцієнт κ_3 прийняти рівним 0,95.

Таблиця 2.28

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Питомий тепловий потік, $Вт/м^2$	1100	1200	1140	1300	1330	1250
Тип обмотки	циліндрична	циліндрична	гвинтова	котушкова	циліндрична	котушкова
Місце розташування	НН	ВН	НН	ВН	НН	ВН

Задача 2.35. У скільки разів зміниться питомий тепловий потік обмотки, якщо не виконувати осьовий канал у циліндричній обмотці? Що буде в чотирьохходовій гвинтовій обмотці, якщо замість виконання каналів між кожним ходом усі ходи спарювати?

Задача 2.36. Як визначити попередню температуру перевищення стінок баку і радіаторів над оточуючим повітрям, якщо відомі: середній перепад температури в обмотці $\Delta Q_{o,cp} = 2^\circ C$, температура перевищення поверхні обмотки над охолоджуючим маслом $\Delta Q_{o,b} = 21^\circ C$, а також температура перевищення масла над температурою внутрішніх стінок баку і радіаторів $\Delta Q_{m,5} = 3^\circ C$.

Задача 2.37. Визначити необхідну поверхню конвекції баку з радіаторами, використовуючи дані табл. 2.29. Використовувати бак з навісними радіаторами.

Таблиця 2.29

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Втрати короткого замикання, $p_{к.з.}$, Вт	8900	10600	17200	25900	30700	46760
Втрати неробочого ходу, p_0 , Вт	1780	2230	2900	4070	5800	7650
Орієнтований перепад температури між стінками баку і радіаторів та оточуючим повітрям, $\Delta Q_{б.в.}$, $^\circ C$	30	35	31	30,7	20,2	21
Поверхня конвекції гладкої стінки баку, $П_{к.зл}$, $м^2$	6,0	7,0	6,5	9,6	14,9	13,7

Задача 2.38. Вибрати необхідну кількість радіаторів, можливість їх розміщення та остаточне перевищення температури поверхонь баку і радіаторів над оточуючим повітрям. Для розрахунків використати дані табл. 2.30. Використати бак з навісними радіаторами. Вибір поверхні конвекції одного радіатора по.

Таблиця 2.30

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Втрати короткого замикання, $p_{к.з.}$, кВт	1,97	2,0	3,88	5,75	7,89	8,25
Втрати неробочого ходу, p_0 , кВт	0,33	0,345	0,79	1,1	1,35	1,66

Таблиця 2.30

Величина	Варіанти					
	1	2	3	4	5	6
Орієнтований перепад температури між стінками баку і радіаторів та оточуючим повітрям, $\Delta Q_{б.в}, ^\circ C$	38	32	40	36	36,2	38,6
Розмір овального баку:						
-довжина, А, м;	0,89	1,15	1,16	1,2	1,42	1,43
-ширина, В, м;	0,36	0,46	0,47	0,48	0,56	0,6
-висота баку, Н, м	0,83	1,45	1,2	1,45	1,6	1,65

Питання для самоконтролю

1. Що обумовлює нагрівання окремих частин трансформатора?
2. Які втрати мають місце у трансформаторі?
3. Яка різниця між температурами нагрівання і перевищенням(перепадом)?
4. Якими способами передається тепло (тепловий потік)?
5. Поясніть суть питомого теплового потоку обмотки? Як його розраховують?
6. Напишіть формули, по яким розраховують перепад температур між поверхнею обмотки і охолоджуючим маслом. Який спосіб теплопередачі?
7. Чому не розраховують перепад температури між магнітопроводом та охолоджуючим маслом? Коли це потрібно?
8. Коли враховують втрати в сталі магнітопроводу?
9. Якими способами стінки баку і радіатори віддають тепло в оточуюче середовище?
10. Напишіть рівняння теплового балансу трансформатора загального призначення.
11. Як вибирають необхідну кількість радіаторів?
12. Чому треба робити перевірку розміщення радіаторів та уточнювати їх поверхню випромінювання?
13. Який клас нагрівостійкості масляного трансформатора?
14. Вкажіть найбільшу температуру перевищення обмоток над оточуючим повітрям (середовищем).
15. Ваші дії при проектуванні і на практиці для зменшення перевищення температури обмоток над оточуючим середовищем.

Список використаної літератури

1. Проектування трансформаторів / В.В. Чумак, С.С. Цивінський, М.А. Коваленко, В.В. Котлярова. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2025. – 271 с.
2. Проектування електромеханічних перетворювачів енергії. Трансформатори. Основи автоматизованого проектування електричних машин - 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / О.М. Давидов, С.С. Цивінський; КПІ ім. Ігоря Сікорського. – Електронні текстові данні (1 файл: 16 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2017. – 171с.
3. Лябук М.Н. Розрахунок і конструювання силових трансформаторів. Навчальний посібник / М.Н. Лябук. – Луцьк. РВВ ЛДТУ, 2004. – 198 с.
4. Мілих В.І. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / Мілих В.І. Осташевський М.О., Юр'єва О.Ю. – Харків : ФОП Панов А.М., 2017. – 452 с.
5. Андрієнко В.М., Куєвда В.П. Електричні машини: Навч. Посіб. – К.: НУХТ, 2010. – 366с.
6. Transformer Design Principles: With Applications to Core-Form Power Transformers, Robert M. Del Vecchio, Bertrand Poulin, Pierre T. Feghali, Dilipkumar M. Shah, Rajendra Ahuja, CRC Press; 2nd edition, June 2, 2010, 636 pages, ISBN: 978-1439805824
7. Power Transformer Design Practices, Fang Zhu, Baitun Yang, CRC Press; 1st edition, March 22, 2021, 282 pages, ISBN: 978-0367418434.