

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Конспект лекцій
з дисципліни
«Основи автоматизованого проектування електричних машин»
Частина 1

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

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2018

Конспект лекцій з дисципліни «Основи автоматизованого проектування електричних машин» Частина 1 [Електронний ресурс]: навч. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», спеціалізації «Електричні машини і апарати» / КПІ ім. Ігоря Сікорського; уклад.: С.С. Цивінський. – Електронні текстові дані (1 файл: 16,4 Мбайт). – Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018 - 124 с.

*Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
(протокол № ____ від _____.____.20__р.)
за поданням Вченої ради ФЕА
(протокол № ____ від _____.____.20__р.)*

Електронне мережне навчальне видання

Конспект лекцій
з дисципліни
«Основи автоматизованого проектування електричних машин»
Частина 1

Укладач Цивінський Сергій Станіславович, канд. техн. наук, доц.

Відповідальний
редактор

Рецензент

© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2018

Зміст

Вступ.....	6
Розділ № 1. Мета і задачі дисципліни.....	7
1.1. Етапи проектування	8
1.2. Стандартизація	10
1.2.1. Історична довідка	10
1.2.2. Визначення стандартизації, її мета і об'єкти	12
1.2.3. Форми стандартизації	12
1.3. Стандартизація в електромашинобудуванні України	14
Розділ № 2. Основи теорії проектування ЕМПЕ	16
2.1. Головні вимоги до ЕМПЕ, що проектується	16
2.1.1. Розрахункова (електромагнітна) потужність.....	18
2.1.2. Основні розміри	20
2.1.3. Електромагнітні навантаження	21
2.2. Зв'язок електромагнітної потужності ЕМПЕ з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою	23
2.2.1. Трансформатори.....	23
2.2.2. Машини постійного струму.....	24
2.2.3. Машини змінного струму	26
2.3. Узагальнені вирази для ЕРС обмоток і розрахункової потужності.....	28
Розділ № 3. Електромашинні сталі та геометрично подібний ряд	31
3.1. Стала Арнольда	31
3.1.1. Трансформатори.....	32
3.1.2. Машини постійного струму.....	32
3.1.3. Машини змінного струму	33
3.2. Універсальна стала.....	33
3.2.1. Трансформатори.....	33
3.2.2. Машини постійного струму.....	35
3.2.3. Машини змінного струму	37
3.3. Порівняння сталей	38
3.4. Геометрично подібний ряд	39
Розділ № 4. Проектування трансформаторів	42
4.1. Вихідні дані	42
4.1.1. Номінальна потужність.....	42
4.1.2. Номінальні напруги.....	43
4.1.3. Число фаз.....	43
4.1.4. Схеми та групи з'єднання	44
4.1.5. Струм неробочого ходу.....	44
4.1.6. Втрати неробочого ходу	44
4.1.7. Втрати короткого замикання	45
4.1.8. Напруга короткого замикання	45
4.1.9. Вид і ступені регулювання напруги	46
4.1.10. Системи охолодження.....	47
4.1.11. Кліматичне виконання та категорія розміщення.....	47
4.2. Визначення основних розмірів трансформатора	47
4.2.1. Стала Арнольда	48

4.2.2.	Універсальна стала.....	48
4.2.3.	Рекомендація [1].....	48
Розділ № 5. Конструкція сучасних трансформаторів		51
5.1.	Конструкції магнітних систем.....	51
5.2.	Конструкції систем обмоток. Конструктивні типи обмоток	56
5.2.1.	Загальні відомості	56
5.2.2.	Конструкція циліндрової обмотки з круглого проводу	60
5.2.3.	Конструкція циліндрових обмоток з прямокутного проводу.....	61
5.2.4.	Конструкція гвинтових обмоток	62
5.2.5.	Конструкція безперервної спіральної котушкової обмотки	64
5.3.	Ізоляція обмоток.....	65
5.3.1.	Головна ізоляція	65
5.3.2.	Повздожня ізоляція	66
5.3.3.	Захист обмоток від перенапруг	67
5.4.	Конструкції елементів допоміжної системи.....	68
5.4.1.	Елементи конструкції, що підвищують електричну міцність	68
5.4.2.	Елементи конструкції, що підвищують термічну міцність.....	69
5.4.3.	Елементи конструкції, що підвищують механічну міцність	69
5.4.4.	Елементи конструкції, що сприяють регулюванню напруги і переміщенню трансформатора.....	70
5.4.5.	Елементи конструкції, що виконують інформаційну, контролюючу і захисну ролі.....	70
5.5.	Розрахунок обмоток трансформатора.....	71
5.5.1.	Циліндрові обмотки	72
5.5.2.	Проектування гвинтових обмоток.....	75
5.5.3.	Проектування неперервних спіральних котушкових обмоток	79
Розділ № 6. Втрати і напруга короткого замикання.....		84
6.1.	Розрахунок втрат короткого замикання	84
6.1.1.	Основні втрати в обмотках	84
6.1.2.	Додаткові втрати	87
6.1.3.	Повні втрати короткого замикання	89
6.2.	Розрахунок напруги короткого замикання	89
Розділ № 7. Механічний розрахунок обмоток.....		95
7.1.	Мета і задачі розрахунку	95
7.2.	Фізична картина раптового к.з.	95
7.3.	Розрахунок механічних сил в обмотках.....	101
7.4.	Міри по посиленню механічної стійкості обмоток	106
7.5.	Оцінка теплового стану обмоток при раптовому к.з.....	107
Розділ № 8. Розрахунок магнітного кола трансформатора.....		109
8.1.	Мета і завдання розрахунку.....	109
8.2.	Марка сталі і план шихтовки.....	109
8.3.	Розрахунок геометричних розмірів і маси магнітопроводу.....	111
8.4.	Розрахунок втрат і струму неробочого ходу	113
Розділ № 9. Тепловий розрахунок трансформатора.....		116
9.1.	Мета й завдання теплового розрахунку	116
9.2.	Процес теплопередачі трансформатора	116
9.3.	Розрахунок перевищень температур усередині та на поверхні обмоток	118

9.4. Тепловий розрахунок бака.....	120
9.5. Остаточний розрахунок перевищень температур	122
Список літератури.....	124

Вступ

Сучасне проектування електромеханічних та електромагнітних перетворювачів енергії (ЕМПЕ) використовує системи автоматичного проектування (САПр) за допомогою сучасних комп'ютерних технологій.

Основою САПр є загальновідомі методики, які базуються на класичних підходах до проектування. Цей підхід сформований на сучасному розумінні процесів в ЕМПЕ та багатому практичному досвіді. Важливою частиною САПр є і присутність математично сучасних методів оптимізації, які дозволяють спроектувати ЕМПЕ з найвигіднішими показниками, які формують у вигляді функцій мети.

Суттєвою особливістю САПр є автоматичне (комп'ютерне) виготовлення робочих креслень згідно з розробленими розрахунками.

Мета дисципліни "Основи автоматизованого проектування електричних машин" полягає в отриманні студентами теоретичних знань з проектування та умінні використовувати методики проектування окремих етапів безпосередніх розрахунків ЕМПЕ, які забезпечують надійність (електричну, термічну та механічну), вимоги до експлуатаційних властивостей та технології виготовлення, а також економічних показників. Без використання алгоритмів цих методик неможливе існування програмних продуктів САПр, а глибокі знання та вміння їх використовувати прискорюють процес пошуку і отримання оптимального варіанта.

Проведення практичних занять та виконання двох курсових проектів дозволяють закріпити та розширити теоретичні знання, вміння їх використовувати, а також придбати навички проектування силових трансформаторів та асинхронних машин.

Особливо треба відмітити, що матеріал конспекту складений з урахуванням відомостей у літературних джерелах. Для більшого запам'ятання великого обсягу інформації після основних параметрів подані опорні конспекти.

Розділ № 1. Мета і задачі дисципліни

Початку електромашинобудуванню поклало відкриття М. Фарадеєм закону електромагнітної індукції (1832-1833рр.). Більш ніж за півтора століття був пройдений шлях від простих моделей та пристроїв до сучасних конструкцій трансформаторів, двигунів та генераторів загального і спеціального призначення. Суттєво змінилися їх конструкції, робочі характеристики та техніко-економічні показники. Найбільш необхідні в промисловості, сільському господарстві та побуті електричні машини виробляються серіями.

Основи електромашинобудування незалежної України були закладені за роки СРСР. Широко відомі за кордоном та в Україні такі заводи як «Тяжмаш» та ХЕМЗ (місто Харків), Запорізький трансформаторний завод та багато інших, які випускають електричні машини та трансформатори, які відповідають сучасним світовим вимогам. Розробкою нових типів займаються галузеві науково-дослідні інститути, Інститути Академії наук України і заводські конструкторські бюро.

Процес виробництва електричних машин та трансформаторів, або електромеханічних перетворювачів енергії (ЕМПЕ), полягає в проектуванні, виготовленні та випробовуванні. Далі курс лекцій розглядає основи проектування ЕМПЕ з використанням для розрахунків комп'ютерної техніки.

Сучасний рівень розвитку ЕМПЕ характеризується високим рівнем розвитку теорій та методів проектування, а в поєднанні з існуючими технологіями виготовлення та культурою експлуатації дозволяє:

- виконувати різноманітні експлуатаційні умови, які вимагаються від ЕМПЕ;
- виготовляти різноманітні конструкційні форми;
- високо використовувати активні і конструкційні матеріали;
- створювати нові та більш сучасні ЕМПЕ з урахуванням новітніх розробок в галузі металургії, ізоляції, технології та теорії проектування;

В зв'язку з цим метою дисципліни є:

- вивчення загальних основ теорії проектування;
- вміння використовувати знання загальних закономірностей до проектування конкретних типів ЕМПЕ;
- отримання навиків по проектуванню ЕМПЕ та оформленню текстової і конструкторської проектної документації.

Поставлена мета досягається при розв'язанні наступних задач:

- вивчення загальних закономірностей, які характеризують зв'язок розрахункової потужності з основними геометричними розмірами та електромагнітними навантаженнями;
- вивчення методів електромагнітного розрахунку трансформаторів та електричних машин;
- вивчення загальних основ вентиляційного, теплового і механічного розрахунків ЕМПЕ;
- виконання двох курсових проектів по ЕМПЕ загального призначення (трансформатор та асинхронний двигун);
- оформлення текстової та конструкторської документації курсових проектів згідно з умовами стандартів.

Поставлена мета та розв'язування задач забезпечується лекціями, практични-

ми заняттями, курсовими проектами.

Успішному вирішенню поставленої мети допомагають знання, отримані з дисциплін: «Теоретичні основи електротехніки», «Електричні машини», «Вища математика», «Фізика», «Прикладна механіка», «Технічне креслення» та інших, викладених протягом перших трьох років навчання.

1.1. Етапи проектування

Умовно процес проектування можна розділити на наступні етапи:

- підготовчий;
- розрахунковий;
- створення робочої конструкторської документації.

Підготовчий етап починається з отримання від замовника або створення за вказівкою замовника основних вимог до ЕМПЕ, який буде проектуватися. Ці вимоги можуть бути представлені у вигляді технічного завдання (ТЗ) або технічних вимог (ТВ). В них обов'язково вказується номінальна потужність та напруга, а також інші експлуатаційні вимоги.

Виходячи з поставлених вимог, проектувальник повинен оцінити можливість їх виконання, вибрати та запропонувати ту чи іншу конструкцію ЕМПЕ, активні, ізоляційні та конструктивні матеріали, передбачити просту технологію виготовлення при мінімально-можливих фінансових витратах.

Попереднє рішення підготовчого етапу повинно відповідати діючим стандартам і бути затверджене замовником.

Розрахунковий етап проектування повинен виконати наступні вимоги:

- ЕМПЕ, що проектується, повинен бути надійним;
- ЕМПЕ, що проектується, повинен задовольняти експлуатаційні характеристики згідно вимогам;
- спроектованому ЕМПЕ повинна бути дана економічна характеристика.

Під надійністю розуміють електричну, теплову та механічну міцність ЕМПЕ в усіх режимах роботи, вказаних в технічному завданні. Міцність забезпечується електромагнітним, тепловим, вентиляційним та механічним розрахунками.

Експлуатаційні можливості ЕМПЕ забезпечуються відповідним вибором основних розмірів та електромагнітним розрахунком, який включає в себе: розрахунок обмоток, магнітного кола, параметрів та експлуатаційних характеристик.

Розрахунковий етап закінчується економічною оцінкою спроектованого ЕМПЕ, враховуючи вартість матеріалів, затрат на виробництво та експлуатацію.

Третій, кінцевий етап проектування включає складання робочої конструкторської документації, тобто робочих креслень на деталі та складальні креслення вузлів, конструкція та розміри яких визначені на розрахунковому етапі.

Робочі креслення передають на завод або цех для виготовлення та складання готового виробу.

Викладений вище підхід до проектування у повній мірі використовується при виготовленні ЕМПЕ в малих кількостях на невеликих приватних підприємствах.

При проектуванні серій або великих партій ЕМПЕ державними організаціями або крупними приватними фірмами використовується поетапний звіт про виконану

роботу. Кожний звіт в деякій мірі містить викладене вище і відображає стадію розробки, тобто проектування.

Міждержавний стандарт ГОСТ 2.103-68 встановлює етапи розробки конструкторської документації на вироби в усіх галузях промисловості:

- технічне завдання;
- технічна пропозиція;
- ескізний проект;
- технічний проект;
- розробка робочої документації:
 - а) для експериментального зразка (партії);
 - б) для установлювальних серій;
 - в) серійного або масового виробництва, яке триває вже довгий час.

Згідно цього стандарту, технічне завдання встановлює основне призначення, технічні й тактико-технічні характеристики, показники якості та техніко-економічні показники, які вимагаються від виробу (ЕМПЕ).

Технічна пропозиція – сукупність конструкторських документів, які містять обґрунтування доцільності розробки на основі аналізу технічного завдання, пропонування різноманітних варіантів рішень та їх аналіз, патентні матеріали. Звітній документації на цій стадії надається літера «П».

Ескізний проект – сукупність конструкторських документів, які містять принципові конструктивні рішення й данні з основними параметрами та габаритними розмірами виробу, що проектується (розробляється), виготовлення та випробовування макету. Документації на цій стадії розробки надається літера «Е».

Технічний проект – сукупність конструкторських документів, які містять кінцеве технічне рішення, яке дає повну уяву про устрій (конструкції) та розмірах ЕМПЕ, яких достатньо для розробки робочої документації, виготовлення і випробовування макетів. Документації на цій стадії розробки надається літера «Т».

Розробка робочої документації – сукупність конструкторських документів (робочі креслення деталей та складальних одиниць, технологічного оснащення), призначених для виготовлення й випробовування експериментального зразка (експериментальної партії). В цьому випадку документації надається літера «О1», «О2» та ін.

Конструкторська документація по виготовленню установлювальної серії з урахуванням коректив у документах з попередніми випробовуваннями зразків надається літера «А».

Для довготривалого серійного або масового виробництва документації надають літеру «Б».

В разі індивідуального виробництва конструкторським документам надається літера «І».

Опорний конспект по даному параграфу приведений на рис. 1.1.

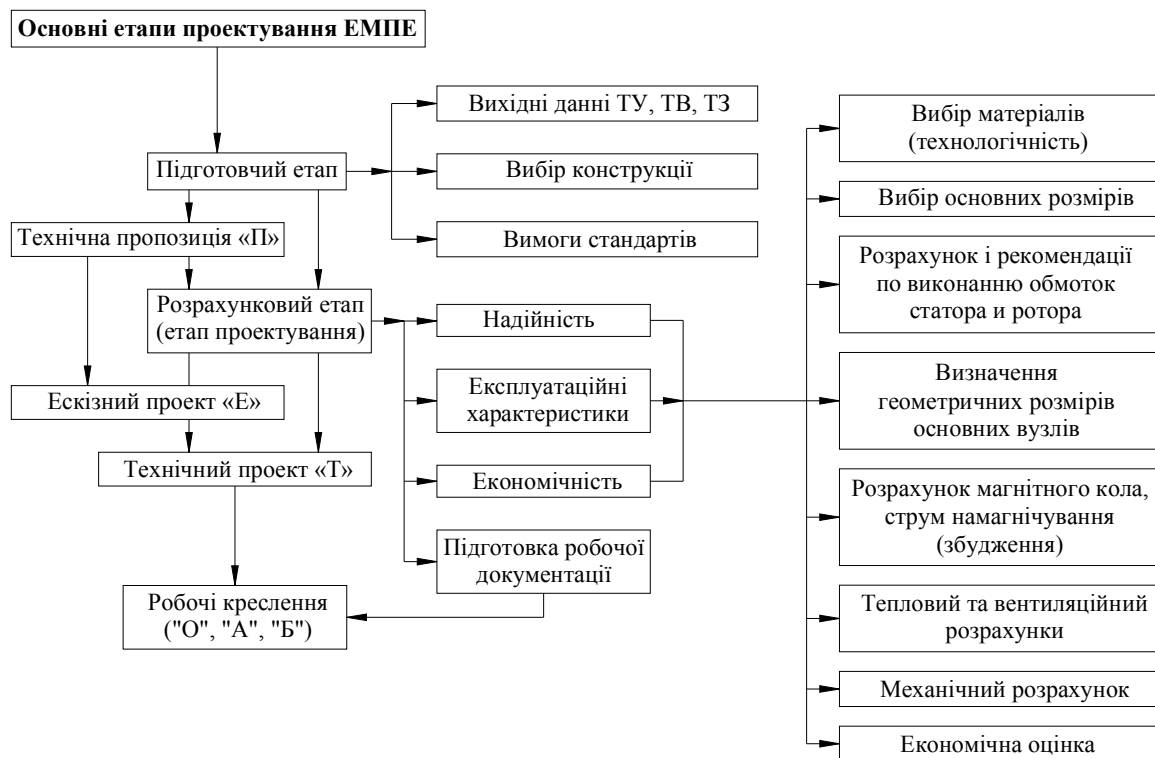


Рис. 1.1.

1.2. Стандартизація

1.2.1. Історична довідка

Однією з характерних особливостей різноманітних етапів розвитку людства є рівень продуктивності праці. Збільшення продуктивності праці призводило до збільшення кількості виробів з одночасним збільшенням вимог до їх якості. Ці тенденції призвели до створення виробів одного призначення в великих кількостях, однакових за формою, кольором, якістю, тобто ідентичних.

Це прагнення проглядається на всьому шляху розвитку людства. Наведемо приклади.

Давній Єгипет – рецепти бальзамування мумій були визначеними за складом; чиновники фараонів суворо контролювали розміри і якість будівельної цеглини для будівництва різних споруд.

Перу (Південна Америка) – в м. Куско (2000 р. до н . е.) побудований храм із кам'яних глин біля 3 м завдовжки, які відшліфовані і укладені так, що між глинами не проходить лезо бритви.

Антична Греція – використовувались в будівництві однакові колони, портики та інші елементи.

Вавилон — вавилонська вежа одне із семи див світу заввишки 90м, побудована із однакових за розміром цеглин, скріплених однаковим розчином, а 15-й поверх облицьований однаковою за кольором і розміром глазурованою блакитною плиткою.

Давній Рим – мав водопровід з діаметром труб, що входять в дім, не більше 90мм; збільшення за межі цієї величини суворо каралося законом;

XIII – XVI ст. до н.е. архітектор і інженер імператора Юлія Цезаря і Августа – Ветрувій в 10-и книгах виклав метод пропорційних чисел, який був забутий, і тільки в XIX столітті Розенбахер (Німеччина) знову описав; зараз цей метод носить назву – «принцип пропорційності» і широко використовується при моделюванні об'єктів дослідження.

В феодальну епоху створення ідентичних за призначенням виробів все більше проявляється в промисловості та військовій справі.

Венеція – в XV сторіччі на верфях було налагоджене поточне будівництво однакових кораблів з однаковим озброєнням, однаковими запасними частинами (щогла, вітрила і т.п.).

Англія – ткачі виготовляли тканини з певною основою, з однаковою кількістю ниток і т.п., майстер перевіряв і ставив знак (якості).

Франція – в 1785 р. інженер Леблан виготовив 50 рушниць із взаємозамінними замками; до цього у кожній рушниці був затвор індивідуального виконання.

США – в 1783-1793 рр. інженер Елі Вітней уклав договір на постачання армії Півночі 10 тисяч рушниць з взаємозамінними частинами.

Бурхливий розвиток промисловості й торгівлі при молодому капіталізмі вимагав введення певних норм і вимог до виробів з метою взаємозаміни і розширення ринків збуту. Створення залізниць вимагало нормувати розміри колій, проміжок між колесами потягу і вагонів і т.п.

Оскільки незалежна Україна є правонаступницею СРСР, то цікаво простежити розвиток стандартизації, як в царській Росії, так і в СРСР.

Початком стандартизації в Росії вважають 1555 р., коли Іван Грозний направив у Новгород пушкарів Болотова й Олексієва для контролю розмірів ядер за допомогою кружал (калібрів).

Значний внесок в розвиток стандартизації зробив Петро I, який в 1694-1696 рр. видав «Первое собрание законов Российской империи». В ці ж роки він ввів зразки міри, креслення при виготовленні кораблів, далі ним уніфіковано зброю для солдат і драгунів.

Існують відомості, що в 1761р. (за 24 р. до Леблана) російський державний діяч граф Шувалов дав технічні умови Тульським зброярам на виготовлення зброї з взаємозамінними вузлами та деталями. В XIX ст. Тульський збройний завод випускає зброю з взаємозамінними частинами: в 1812р. – 7 тисяч на місяць, а в 1837р. – 30 тисяч на місяць.

Розвиток капіталізму в Росії викликав бурхливий зріст в галузях транспорту, промисловості, сільського господарства. Будучи в основному аграрною країною, в Росію почали завозити промислове і сільськогосподарське обладнання з країн Західної Європи. Про це свідчить той факт, що існувало близько 50 типорозмірів колій для потягів, а на Московсько-Рязанській залізній дорозі існувало лівостороннє направлення руху (як у Великобританії).

З самого початку радянська влада приділяла значну увагу стандартизації.

1918р. – декрет «О введении международной метрической системы мер и весов».

1923р. – декрет «О стандартизации экспортируемых товаров».

1926р. – введено стандарти, які скорочують випуск типорозмірів профілів прокату з 3539 до 785.

1927р. – проведено уніфікацію сільськогосподарських машин з 800 типорозмі-

рів до 100 і т.п.

1927-1928рр. – стандартизовані вироби інструментального господарства і кріплення (болтів, гайок, гвинтів, шайб і т.п.).

В СРСР питаннями стандартизації займався Комітет стандартів, мір і вимірювальних приладів при Раді Міністрів, яка упорядковувала систему стандартів. Крім звичайних стандартів на вироби були розроблені та впроваджені єдині системи стандартів, наприклад ЕСКД. В 1961 р. стандартом ГОСТ 9867-61 введена міжнародна система одиниць – «СІ». Стандартами СРСР були охоплені майже всі сторони діяльності людства і держави. До моменту розпаду в СРСР налічувалось біля 30000 державних стандартів.

Частина державних стандартів СРСР діє на території України. Ці стандарти (ГОСТ) називають міждержавними. Створюються нові стандарти в Україні (ДСТУ – Державні стандарти України).

1.2.2. Визначення стандартизації, її мета і об'єкти

Стандартизація (згідно стандарту ГОСТ 1.0-68) – встановлення застосування правил з метою упорядкування діяльності в певній області на користь і при участі усіх зацікавлених сторін, зокрема, для досягнення загальної оптимальної економії при дотриманні умов експлуатації (використання) і вимог безпеки.

Основною метою стандартизації є прискорення технічного прогресу, підвищення ефективності суспільного виробництва і продуктивності праці, покращення якості продукції, забезпечення охорони здоров'я населення і безпеки праці.

Об'єктами стандартизації є: одиниці фізичних величин, терміни і визначення, вимоги до продукції і виробничих процесів, вимоги по забезпеченню безпеки людства і збереженню матеріальних цінностей і т.п.

1.2.3. Форми стандартизації

Розрізняють наступні форми стандартизації:

- стандарт;
- нормаль;
- уніфікація;

Стандарт – нормативно-технічний документ по стандартизації, що встановлює комплекс норм, правил, вимог до об'єкта стандартизації і затвердженого компетентними органами.

Стандарт – найвища форма стандартизації, розрізняють наступні категорії стандартів:

- міждержавний стандарт (ГОСТ);
- державний стандарт України (ДСТУ);
- галузевий стандарт (ГСТ);
- республіканський стандарт (РСТ);
- стандарти підприємства (СТП);

Сфера діяльності стандартів визначена їх назвою.

Існує 12 видів стандартів. Вид стандарту визначає його зміст. Наприклад, стандарти на технічні умови, параметри і розміри виробів, на методи випробувань і т.п.

Нормаль – форма стандартизації, яка доповнює стандарти, має направлену сферу діяльності, встановлює певні вимоги, правила і норми на деталі, вузли конструкцій виробів, якість матеріалів, технологічні процеси і т.п.

В ряді випадків нормаль перетворюють в стандарт. Нормалі бувають:

- міждержавні;
- міжгалузеві;
- галузеві;
- заводські: загальнозаводські, цехові;

Прикладом галузевої нормалі може слугувати нормалізований ряд розмірів діаметрів стрижнів силових трансформаторів.

Уніфікація – зменшення великої кількості типорозмірів виробів, їх деталей і вузлів матеріалів і т.п., маючих однакове призначення.

Уніфікація - найдешевша і найбільш економічна форма стандартизації, яка може бути реалізована як:

- зменшення кількості різних типорозмірів і видів виробів одного і того ж призначення; наприклад, зменшення в 20-х роках артикулів льняних тканин, що випускалися в текстильній промисловості з 2740 до 214, що дозволило збільшити об'єм виготовлення тканин, здешевити їх вартість;

- скорочення різноманітності матеріалів, деталей і вузлів в конструкції самого виробу, наприклад, застосування болтів, однакових за розміром;

- міжтипова уніфікація, тобто застосування одних і тих самих вузлів і деталей конструкцій та матеріалів для різних типів виробів. Наприклад, одні й ті самі розміри валів, підшипникових щитів, станин та інше використовують для електричних машин, які відрізняються потужністю чи частотою обертання;

- типізація – зведення різноманітності конструкцій механізмів різного призначення до невеликої кількості яка дозволяє виконувати ті ж функції, наприклад, на базовій конструкції трактора за допомогою зміни підвісного обладнання можна орати, сіяти, косити і т.п..

Опорний конспект до параграфу 1.2.3. приведений на рис. 1.2.



Рис. 1.2.

1.3. Стандартизація в електромашинобудуванні України

На даний момент на території України діють:

- міждержавні стандарти, вимоги яких розповсюджуються на країни СНД, які входять в міжнародну раду по стандартизації, метрології і сертифікації (МГС); це державні стандарти колишнього СРСР, тому вони мають позначення – ГОСТ;
- державні стандарти, створені за час незалежної України; вони мають позначення ДСТУ (державний стандарт України);
- республіканські, галузеві і стандарти підприємств; застосовуються або ті, що діяли в СРСР, або уточнені.

В цілому необхідно відмітити, що в Україні йде інтенсивне створення нових стандартів. Наприклад, стандарт ДСТУ 3008-95. Звіти у сфері науки і техніки. Структура і правила оформлення.

Одночасно уточнюються дії стандартів з урахуванням сучасних світових вимог і рекомендацій міжнародних організацій. Наприклад, з урахуванням рекомендацій Міжнародної електротехнічної комісії (МЕК) і МГС. Створений стандарт ДСТУ 2818-94 (ГОСТ 30149-95) Машини електричні обертові. Позначення літерні та одиниці вимірів.

Міждержавні стандарти (ГОСТи) сформовані у вигляді одиничних стандартів (ГОСТ XXXX-XX) та у вигляді єдиних систем (ГОСТ 2.XXX-XX).

Прикладом одиничного стандарту є стандарт ГОСТ 183-74. Машини електричні обертові. Загальні технічні умови.

Стандарти єдиної системи містять сукупність стандартів з вимогами в певній області. Наприклад, єдина система конструкторської документації (ЄСКД) має позначення стандартів ГОСТ 2.XXX-XX, містить 10 груп. Стандарт ГОСТ 2.3XX-XX. Загальні правила виконання креслень; стандарт ГОСТ 2.305-68. Зображення – види, розрізи, перерізи.

Стандарти ДСТУ існують як поодинокі.

В області проектування, виготовлення, виробництва і експлуатації електричних машин і трансформаторів є велика кількість стандартів. Їх можна поділити на стандарти:

- загальні;
- для електричних машин і трансформаторів загального призначення;
- для спеціальних ЕМПЕ.

Загальні стандарти групуються навколо базового стандарту. Для електричних машин базовим стандартом є стандарт ГОСТ 183-74Е. Машини електричні обертові. Загальні технічні вимоги. Для силових трансформаторів – ГОСТ 11677-75. Трансформатори силові. Загальні технічні вимоги. Базовий стандарт доповнюють стандарти із загальними вимогами. Наприклад, для електричних машин стандарт ГОСТ 23366-78. Ряд номінальних напруг постійного і змінного струму, або стандарт ГОСТ 19780-81. Колектори і контактні кільця електричних машин. Діаметри. Для трансформаторів – ГОСТ 3484-77. Трансформатори силові. Методи випробувань, або стандарт – ДСТУ 3270-95 Трансформатори силові. Терміни та визначення.

Стандарти для електричних машин і трансформаторів загального призначення складені на основі параметрів створених серій. Прикладом можуть бути стандарти:

- ДСТУ 2365-94. Машини електричні потужністю до 400 кВт включно. Двигу-

ни. Загальні технічні умови;

- ГОСТ 11920-73Е. Трансформатори трифазні силові масляні загального призначення потужністю 1000-80000 кВ·А напругою до 35 кВ включно. Технічні умови.

Спеціальні стандарти містять вимоги до електричних машин і трансформаторів вузько направленої призначення, повинні враховувати вимоги базового і загального стандартів. Прикладом можуть бути стандарти:

- ГОСТ 304-62. Генератори зварювальні. Загальні технічні умови.

- ГОСТ 24875-88. Тахогенератори. Загальні технічні умови.

- ГОСТ 20416-75. Трансформатори освітлювальні рудникові. Загальні технічні умови.

Широко застосовуються нормалі в електромашинобудуванні на технологічні процеси, оснащення і окремі вузли. Наприклад, розмірний ряд діаметрів стрижнів трансформаторів нормалізований.

Уніфікація є невід'ємною частиною виробництва. Особливо вона проявляється на відрізках серій. Наприклад, на одних і тих самих розмірах листів заліза магнітопроводу статора і ротора, валів, підшипникових щитів і кріплення виготовляються асинхронні двигуни різні за потужністю і частотою обертання.

Приступаючи до проектування, необхідно в першу чергу вивчити вимоги стандартів. Для цього необхідно скористатися класифікатором, який знаходиться в бібліотеках і магазинах по продажу стандартів. Класифікатор розбитий на розділи, які мають позначення за допомогою літер. Наприклад, А – горна справа, Е – електричне і електротехнічне обладнання і т.п. Розділи мають підрозділи, позначення яких включають літеру і цифри. Наприклад, позначення Е61 – електродвигуни; Е64 – трансформатори. Із конкретного підрозділу необхідно вивчити вимоги стандартів, які відносяться до типу ЕМПЕ, що проектується.

Особливо необхідно відмітити необхідність постійного вивчення матеріалів МЕК і стандартів закордонних країн, при умові можливого експорту.

Розділ № 2. Основи теорії проектування ЕМПЕ

2.1. Головні вимоги до ЕМПЕ, що проектується

Не дивлячись на різноманітність конструкторських форм, призначень і особливостей експлуатації ЕМПЕ, вони повинні задовольняти таким головним вимогам:

- мати високу надійність;
- мати необхідні експлуатаційні характеристики;
- бути максимально економічними.

Висока надійність забезпечується достатніми електричною, термічною і механічною міцностями.

Під електричною міцністю ЕМПЕ розуміють властивість ізоляційних матеріалів забезпечувати свої функції при заданих діапазонах змін напруги обмоток. Пробій ізоляції робочих і допоміжних обмоток та створення небажаних гальванічних зв'язків призводить до порушення нормальної роботи або до аварії. В сучасних потужних машинах напруга обмоток не перевищує 20-25 кВ.

Проблема електричної міцності повинна вирішуватись у процесі електромагнітного розрахунку при проектуванні обмоток.

Термічна міцність – здатність ЕМПЕ забезпечувати надійну роботу у допустимих межах нагріву окремих частин конструкції. Нагрівання ЕМПЕ відбувається за рахунок втрат енергії в сталі магнітопроводу (магнітні втрати), в провідниках обмоток (електричні втрати) і на тертя (механічні втрати). В ряді випадків необхідно враховувати втрати від вторинних факторів. Відведення тепла від ЕМПЕ створюється різними способами охолодження. Найбільш допустиме нагрівання ЕМПЕ обумовлюється класом нагрівостійкості ізоляції. Нагрівання більше допустимих норм призводить до скорочення терміну роботи ЕМПЕ або до втрати працездатності. Наприклад, при перевищенні допустимого нагріву на 5°C ізоляції класу нагрівостійкості «А», її термін працездатності скорочується в 2 рази. Зазвичай, період нормальної роботи ЕМПЕ, що закладається при проектуванні, планується 15-20 років. До того ж невдалий вибір і виконана конструкція та порушення технології виготовлення можуть призвести до створення зон або ділянок з підвищеним нагрівом (місцевий перегрів), що знижує також тривалість використання, а в ряді випадків призводить до порушень, що виводить з ладу ЕМПЕ.

Оцінка термічної міцності здійснюється при тепловому розрахунку ЕМПЕ на стадії проектування. При реальному проектуванні силових масляних трансформаторів загального призначення використовують клас нагрівостійкості «А», а електричних машин – «В» або «F».

Під механічною міцністю ЕМПЕ, що проектується, розуміють здатність конструкції витримати, не виходячи з ладу, механічні зусилля у межах робочих і аварійних режимів. Особливо гостро стоїть проблема механічної міцності ЕМПЕ великих потужностей. Наприклад, при раптових коротких замиканнях струми в обмотках ЕМПЕ можуть досягнути 10-20-ти кратних значень номінальних струмів. При цьому електродинамічні зусилля між провідниками пропорційні квадрату струму в цих провідниках, тобто в 100-400 разів більше ніж при номінальному режимі. Тому необхідно посилювати кріплення і монолітність обмоток.

На механічну міцність впливають і відцентрові зусилля, які діють в обертових частинах ЕМПЕ. В ряді випадків вони обмежують можливості виконання ЕМПЕ або потребують значних дій конструктивного характеру. Значні механічні зусилля від відцентрових зусиль обмежують розмір діаметра ротора високошвидкісних електричних машин. Наприклад, діаметр ротора сучасних потужних турбогенераторів, які мають частоту обертання 3000 об/хв., обмежений 1200 мм, тому що подальше збільшення діаметра призводить до недопустимих механічних зусиль, які можуть призвести до руйнування ротора. Найбільшу частоту обертання (150000-200000 об/хв.) мають високочастотні асинхронні двигуни малої потужності, які використовуються в текстильній промисловості (намотки, змотка ниток).

Вимоги механічної міцності розповсюджуються на всі вузли і деталі (навіть на кріплення до фундаменту) електричних машин і трансформаторів і обов'язково перевіряються при проектуванні відповідними механічними розрахунками.

Особливо слід відмітити, що перераховані вимоги міцності в загальному випадку взаємопов'язані і при проектуванні ЕМПЕ повинні розглядатись в єдиному комплексному підході, бо вимоги до надійності ЕМПЕ в роботі є головними, або «жорсткими».

Спроектований і виготовлений ЕМПЕ повинен відповідати експлуатаційним вимогам, викладеними в технічному завданні. До таких вимог для силових трансформаторів загального призначення відносяться втрати і напруга короткого замикання, втрати і струм неробочого ходу й інші, а для електричних машин – величина ККД, $\cos\phi$, величина махового моменту, ступінь захисту і т.п.

Експлуатаційні характеристики забезпечуються шляхом багатоваріантних розрахунків в процесі проектування, високою точністю виготовлення і культурою експлуатації. Багатоваріантні розрахунки дозволяють обрати найкращий варіант з урахуванням вимог експлуатації і економічних витрат. При цьому слід відмітити, що вимоги до відповідних експлуатаційних характеристик є менш «жорсткими», ніж вимоги надійності. Це зумовлене тим, що конкретними стандартами (наприклад, стандартом ГОСТ 183-74) задаються відхилення експлуатаційних параметрів від тих, що вимагаються. ЕМПЕ, що проектується, повинен бути не гіршим за існуючі.

Максимальна економічність ЕМПЕ – одна із основних загальних вимог і враховує:

- економічність проектування;
- економічність виробництва;
- економічність експлуатації.

Економічність на стадії проектування складається із зниження працевтрат на розрахунки. Це досягається застосуванням сучасних систем автоматизованого проектування (САПР), використання новітніх методик розрахунку і високої кваліфікації проектанта. На цій стадії здійснюється економічна оцінка вибору конструкції ЕМПЕ, технології виготовлення, а також експлуатаційних витрат.

Економічність виробництва полягає в зниженні собівартості ЕМПЕ в процесі виготовлення. Це досягається: зниженням працевтрат шляхом застосування автоматизації і механізації виробничих процесів (наприклад, автоматизовані лінії по виготовленню валів, підшипникових щитів, станин при серійному виробництві; застосуванням верстатів, що використовують комп'ютерну техніку і т.п.); економією матеріалів – впровадженням безвідходних і маловідходних технологій; підвищенням коефіцієнта використання сучасного виробничого обладнання; максимальною уніфі-

кацією.

Економічність ЕМПЕ в експлуатації визначається:

- енергетичними показниками (ККД, $\cos\phi$), які впливають на сплату невиробничих втрат електроенергії;
- зниження втрат на планові ремонти;
- зменшення втрат на сплату обслуговуючого персоналу;
- застосування автоматичних систем управління (АСУ);
- культурою обслуговування і експлуатації.

Слід відзначити діалектичне протиріччя між витратами на виробництво і експлуатацію. Ця суперечність вирішується відповідними стандартами або вимогами замовників. Наприклад, існуючі стандарти на серійні силові трансформатори і електричні машини встановлюють вимоги, які ґрунтуються на мінімумі сумарних затрат в виробництві і експлуатації.

Із перерахованих вище головних вимог до ЕМПЕ випливає, що основа для виконання і експлуатації закладається при проектуванні. Тому інженер-проектувальник повинен володіти глибокими знаннями теорії ЕМПЕ, знати останні досягнення в областях теорії проектування, конструювання, технології матеріалознавства, вміти користуватись сучасними методиками розрахунку з використанням САПР, мати навички аналізу результатів розрахунків і оформлення конструкторської документації.

2.1.1. Розрахункова (електромагнітна) потужність

В технічному завданні або в технічних вимогах на ЕМПЕ, що проектується, обов'язково задаються: корисна потужність, напруга, ККД, $\cos\phi$, й інші параметри. Забезпечити ці вимоги можна при певній внутрішній потужності ЕМПЕ. Ця потужність отримала назву розрахункової або електромагнітної.

Під електромагнітною потужністю розуміють внутрішню потужність, яка за допомогою електромагнітного поля передається через повітряний проміжок в електричних машинах, а в трансформаторах через магнітопровід.

В загальному випадку електромагнітна потужність визначається виразом

$$S_{EM} = m \cdot E_1 \cdot I_1, \quad (2.1)$$

де E_1 – ЕРС якорної (робочої) обмотки; I_1 – струм тієї ж обмотки; m – кількість фаз.

У вираз (2.1) входять фазні значення ЕРС і струму при номінальному навантаженні.

Для визначення електромагнітної потужності через вихідні данні вводять коефіцієнт:

$$K_E = \frac{E_1}{U_1}, \quad (2.2)$$

де U_1 – фазна напруга робочої обмотки.

Використовуючи вираз (2.2) можна записати для будь якого ЕМПЕ:

$$S_{EM} = m \cdot K_E \cdot U_1 \cdot I_1 = K_E \cdot S_{ном}. \quad (2.3)$$

Для силових двообмоткових трансформаторів $K_E \approx 1$, тому що $U_1 \cong E$, звідси слідує:

$$S_{EM} = S_{ном} = m \cdot U_1 \cdot I_1 \approx m \cdot U_2 \cdot I_2, \quad (2.4)$$

де U_2 і I_2 - номінальні фазні напруга і струм вторинної обмотки.

У вихідні данні силового трансформатора, що проектується, обов'язково входить номінальна потужність усіх фаз, тобто $S_{ном}$.

Електромагнітна потужність машин постійного струму

$$S_{EM} = P_{ЭМ} = E_a \cdot I_a = K_E \cdot U_a \cdot I_a, \quad (2.5)$$

де U_a і I_a - напруга і струм якірної обмотки.

Для двигунів постійного струму

$$P_{EM} = K_E \cdot U_a \cdot I_a = K_E \cdot P_1 = K_E \cdot \frac{P_2}{\eta}, \quad (2.6)$$

де P_2 - корисна потужність, що задається; η - необхідний ККД двигуна при номінальній напрузі; $K_E = 0,93 \div 0,96$ - коефіцієнт, який характеризує співвідношення E_a / U_a , ($E_a < U_a$).

Електромагнітна потужність генератора постійного струму

$$P_{EM} = K_E \cdot U_a \cdot I_a = K_E \cdot P_2, \quad (2.7)$$

де P_2 - корисна потужність, яка задається в технічному завданні; $K_E = 1,02 \div 1,05$ - коефіцієнт більше одиниці, тому що $E_a > U_a$ в генераторному режимі.

Електромагнітна потужність асинхронного двигуна

$$S_{EM} = m \cdot E_1 \cdot I_1 = m \cdot K_E \cdot U_1 \cdot I_1 = K_E \cdot \frac{P_2}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.8)$$

де P_2 , η , $\cos \varphi$ - потужність на валу, ККД і коефіцієнт потужності при номінальному режимі; $K_E = 0,9 \dots 0,96$, тому що $E_a < U_a$.

Для синхронного двигуна

$$S_{EM} = m \cdot K_E \cdot U_1 \cdot I_1 = K_E \cdot S_{ном} = K_E \cdot \frac{P_2}{\eta \cdot \cos \varphi}, \quad (2.9)$$

де P_2 , η , $\cos \varphi$ - задані для номінального режиму; $K_E = 1,02 \dots 1,05$, тому що $E_1 > U_1$ (через перезбудження $\cos \varphi$ ємнісний відносно мережі живлення).

Синхронний генератор повинен мати

$$S_{EM} = m \cdot K_E \cdot U_1 \cdot I_1 = K_E \cdot S_{ном}, \quad (2.10)$$

де $S_{ном}$ - вихідна потужність генератора; $K_E = 1,02 \dots 1,05$, тому що $E_1 > U_1$, як і в режимі синхронного двигуна.

Знайдені числові значення електромагнітних потужностей є основою для подальших розрахунків.

2.1.2. Основні розміри

Електромагнітна (розрахункова або внутрішня) потужність, що дозволяє отримати потрібну на виході ЕМПЕ номінальну потужність, може бути забезпечена при певних розмірах. В теорії проектування ці розміри називають основними.

Під основними розмірами у трансформаторах розуміють:

- діаметр кола, описаного навколо ступінчастої фігури перерізу стрижня, або що теж саме – діаметр стрижня D ;
- висоту обмотки (або середню висоту обмоток) L ;

На рис. 2.1 показані ці розміри

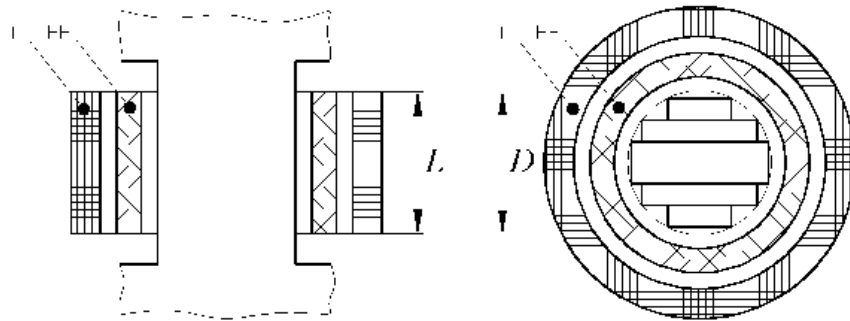


Рис. 2.1.

В обертових електричних машинах під основними розмірами розуміють: діаметр якоря D і розрахункову довжину магнітопроводу якоря L_δ .

В машинах змінного струму D – діаметр розточки (внутрішній) якоря (або статора), так званого «зовнішнього» якоря, рис. 2.2.

Для машин постійного струму D – зовнішній діаметр якоря (ротора), так званого «внутрішнього» якоря, рис. 2.3.

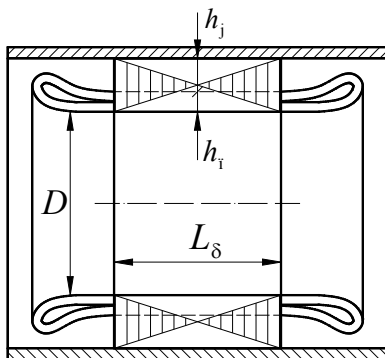


Рис. 2.2.

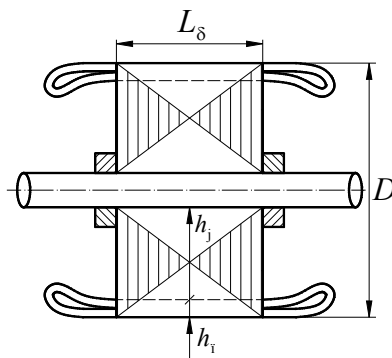


Рис. 2.3.

Розрахункова довжина L_δ дорівнює довжині пакету магнітопроводу якоря (статора) при відсутності радіальних каналів у ньому, рис. 2.2, рис. 2.3. При наявності n_k радіальних каналів з шириною каналу b_k та повною довжиною магнітопроводу L розрахункова довжина визначається приблизно так:

$$L_\delta = L - 0,5 \cdot n_k \cdot b_k, \quad (2.11)$$

На величини основних розмірів при постійній електромагнітній потужності впливають прийняті при проектуванні значення електромагнітних навантажень.

2.1.3. Електромагнітні навантаження

Під електромагнітними навантаженнями розуміють:

- лінійне (електричне) навантаження A , A/m ;
- індукцію (магнітне навантаження) у стрижні трансформатора B_c та у повітряному проміжку B_δ для електричних машин, $Tл$.

Лінійне навантаження визначається виразом:

- для двообмоткових трансформаторів:

$$A = \frac{I_1 \cdot w_1}{L_1} = \frac{I_2 \cdot w_2}{L_2}, \quad (2.12)$$

- для електричних машин:

$$A = \frac{2 \cdot m \cdot I_1 \cdot w_1}{\pi \cdot D}, \quad A = \frac{N \cdot i_a}{\pi \cdot D_a} \quad (2.13)$$

де m – число фаз; w_1 – кількість послідовних витків у фазі; N – число активних провідників обмотки якоря.

В сучасних силових масляних трансформаторах лінійне навантаження має таке числове значення:

$$A = (200 \dots 450) A/cm = (2 \dots 4,5) \cdot 10^4 A/m,$$

для електричних машин загального призначення:

$$A = (100 \dots 700) A/cm = (1 \dots 7) \cdot 10^4 A/m \text{ – при охолодженні повітрям;}$$

$A = (1200 \dots 1600) A/cm = (12 \dots 16) \cdot 10^4 A/m$ – при форсованому або безпосередньому охолодженні.

Більш низьке значення лінійного навантаження відповідає ЕМПЕ більш низьких потужностей рис. 2.4.

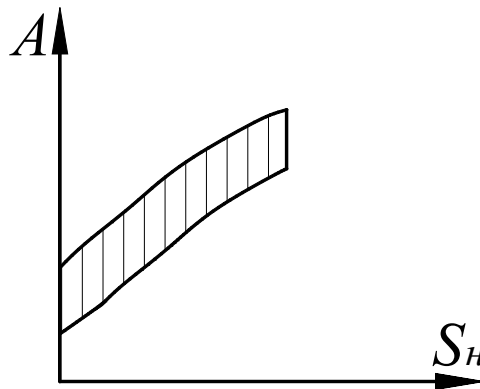


Рис. 2.4.

При проектуванні трансформаторів вважають за потрібне користуватися не лінійним навантаженням A , а густиною струму j . При цьому існує зв'язок

$$A = \frac{I_1 \cdot w_1}{L_1} = \frac{j \cdot \Pi_{B1} \cdot w_1}{L_1}, \quad (2.14)$$

де Π_{B1} – переріз витка, $мм^2$.

Густина струму в обмотках силових масляних трансформаторів загального

призначення потужністю до 16000 кВ·А, де згідно вимогам стандарту ГОСТ 11677-75 провідники виконують з алюмінію, приймають:

$$j = (1,5 \dots 2,0) \text{ А/мм}^2,$$

а в трансформаторах з мідними обмотками:

$$j = (2,2 \dots 3,5) \text{ А/мм}^2.$$

В сухих трансформаторах вказані величини знижуються приблизно в (1,5...2) рази.

В ЕМПЕ загального призначення величини індукції знаходяться у визначеному діапазоні, наприклад, в трансформаторах індукція у стрижні дорівнює:

$$B_c = (1,20 \dots 1,40) \text{ Тл} \text{ — для гарячекатаних сталей};$$

$$B_c = (1,55 \dots 1,70) \text{ Тл} \text{ — для холоднокатаних сталей}.$$

В електричних машинах індукція в повітряному проміжку має величини $B_\delta = (0,1 \dots 1,0) \text{ Тл}$.

Взагалі із збільшенням потужності ЕМПЕ індукція збільшується, рис. 2.5.

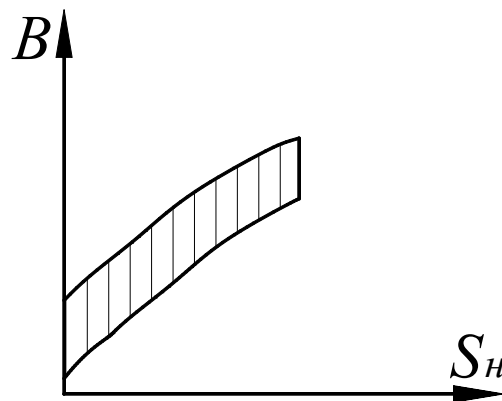


Рис. 2.5.

Як буде показано нижче, величини електромагнітних навантажень впливають:

- на основні розміри ЕМПЕ при заданій електромагнітній потужності, тобто на масу активних і конструкційних матеріалів; чим більше значення A і B , або їх добуток, тим менші основні розміри, менші витрати активних матеріалів, або, як прийнято вважати, збільшується використання активних матеріалів, вище числове значення відношення $S_{\text{ЭМ}} / m$, $B \cdot \text{А/кг}$;

- на величину втрат, котрі збільшуються зі збільшенням A і B , це впливає на величину ККД й нагрівання ЕМПЕ;

- на величини та співвідношення параметрів

$$r, x \sim \frac{A}{B}, \quad (2.15)$$

причому значення цього співвідношення важливе при забезпеченні експлуатаційних властивостей, які вимагаються.

На першому етапі проектування – визначенні основних розмірів – проектант задається величинами A і B з метою зменшення області пошуку ЕМПЕ з заданими експлуатаційними характеристиками. У зв'язку з цим знання меж змін величин електромагнітних навантажень є обов'язковою умовою при проектуванні.

2.2. Зв'язок електромагнітної потужності ЕМПЕ з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою

Зв'язок електромагнітної (розрахункової) потужності ЕМПЕ з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою (частотою обертання) представляє теоретичний інтерес і використовується на практиці для визначення основних розмірів ЕМПЕ.

2.2.1. Трансформатори

Для трансформаторів:

$$S_{EM} = S_{ном} = mE_1I_1 = mU_1I_1, \quad (2.16)$$

де ЕДС фази обмотки

$$E_1 = \pi\sqrt{2} \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot w_1. \quad (2.17)$$

Підставимо (2.17) в (2.16), отримаємо:

$$S_{EM} = m \cdot \pi\sqrt{2} \cdot f_1 \cdot \Phi \cdot (w_1 \cdot I_1), \quad (2.18)$$

або

$$S_{EM} = m \cdot \pi\sqrt{2} \cdot (\Phi \cdot F_1) \cdot f_1, \quad (2.19)$$

де $F_1 = w_1 \cdot I_1$ – МРС обмотки однієї фази.

З (2.19) слідує, що величина електромагнітної потужності визначається добутком основного магнітного потоку на МРС фази обмотки.

Магнітний потік можна виразити як

$$\Phi = B_c \cdot \Pi_c = B_c \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot K_c, \quad (2.20)$$

де B_c – індукція в стрижні; Π_c – площа перерізу чистого заліза електротехнічної сталі стрижня; D_c – діаметр кола, описаного навколо ступінчатої фігури стрижня;

$K_c = K_{кр} \cdot K_z$ – коефіцієнт заповнення площі круга сталлю; $K_{кр} = \frac{\Pi_{ст.ф}}{\Pi_{кр}}$ – коефіцієнт, який дорівнює відношенню площі перерізу ступінчатої фігури стрижня $\Pi_{ст.ф}$

до площі круга стрижня $\Pi_{кр}$; $K_z = \frac{\Pi_{Fe}}{\Pi_{ст.ф}}$ – коефіцієнт, який дорівнює відношенню

площі сталі Π_{Fe} до площі ступінчатої фігури.

Замінімо у виразі (2.19) магнітний потік Φ виразом (2.20) та використаємо

$$I_1 \cdot w_1 = A \cdot L. \quad (2.21)$$

Тоді після спрощення отримаємо

$$S_{EM} = S_{ном} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \cdot m \cdot K_c \cdot (D_c^2 \cdot L) \cdot (A \cdot B_c) \cdot f_1, \quad (2.22)$$

де A – лінійне навантаження, A/m ; L – висота обмотки, m .

З (2.22) роблять висновок, що електромагнітна потужність трансформатора пропорційна:

- добутку основних розмірів – $(D_c^2 \cdot L)$, який називається умовним об'ємом активної частини;
- добутку електромагнітних навантажень – $(A \cdot B_c)$;
- частоті мережі живлення – f_1 ;
- коефіцієнту заповнення перерізу стрижня сталлю – K_c .

2.2.2. Машини постійного струму

Розрахункова потужність машини постійного струму дорівнює

$$S_{EM} = P_{EM} = E_a \cdot I_a, \quad (2.23)$$

де E_a та I_a – ЕРС та струм якоря при номінальному режимі.

ЕРС якоря зв'язана з магнітним потоком загальновідомим виразом

$$E_a = \frac{p \cdot N}{a} \cdot \Phi \cdot n_n, \quad (2.24)$$

де p – число пар полюсів машини; n_n – частота обертання якоря, $об/с$; N – повне число активних провідників обмотки якоря; a – число пар паралельних віток; Φ – магнітний потік на полюс, $Вб$.

Для довідки. Активні провідники обмотки якоря – провідники обмотки, що лежать у пазах, з'єднані між собою послідовно та утворюють паралельні вітки. Вони мають ефективний переріз q_{ef} , а $q_{ef} = n \cdot q_{el}$.

Струм якоря визначається як

$$I_a = 2a \cdot i_a, \quad (2.25)$$

де i_a – струм паралельної вітки обмотки якоря.

Підставимо у вираз (2.23) вирази (2.24) та (2.25), та отримаємо

$$P_{EM} = (2p \cdot \Phi) \cdot (N \cdot i_a) \cdot n_n. \quad (2.26)$$

Звідси витікає, що розрахункова потужність P_{EM} пропорційна добутку повного потоку $(2p \cdot \Phi)$ на повний струм (МРС) якоря $(N \cdot i_a)$ і на номінальну частоту обертання якоря n_n .

Для наступних перетворень виразимо струм якоря I_a через лінійне навантаження A , а магнітний потік Φ через індукцію у повітряному проміжку B_δ .

Виходячи із визначення, запишемо

$$A = \frac{N \cdot i_a}{\pi D_a} = \frac{NI_a}{2a\pi D_a}, \quad (2.27)$$

або

$$I_a = \frac{2a\pi D_a}{N} A, \quad (2.28)$$

де D_a – діаметр якоря (зовнішній діаметр ротора).

В загальному випадку магнітний потік під полюсом є інтегральною (сумарною) величиною. Зазвичай, розподіл магнітного потоку в просторі характеризують його густиною, тобто індукцією. На рис. 2.6 показано розподіл індукції протягом двох полюсних поділок. На полюсній поділці індукція розподіляється за складною залежністю – $B_x = f(x)$, де x змінюється від 0 до τ .

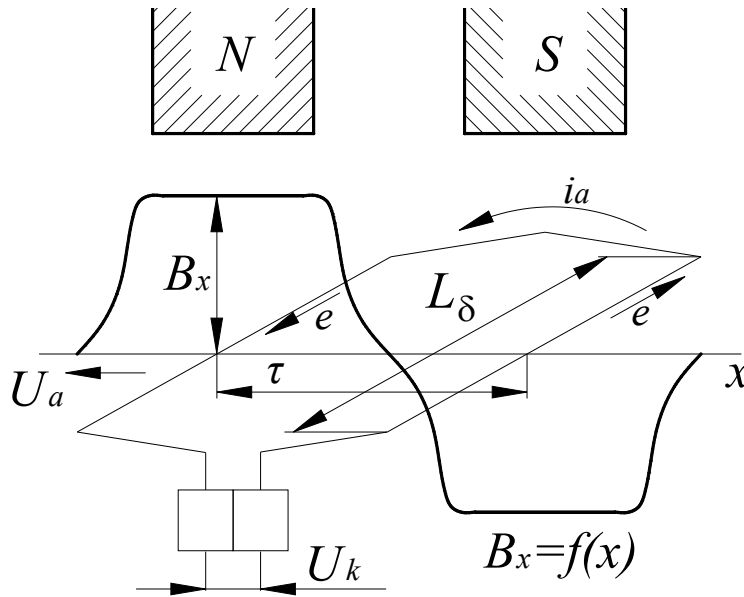


Рис. 2.6.

Магнітний потік під полюсом визначається

$$\Phi = \int_0^{\tau} B_x \cdot L_{\delta} \cdot dx, \quad (2.29)$$

де $L_{\delta} \cdot dx$ – площа, через яку проходить потік Φ_x .

На практиці користуватись виразом (2.29) незручно, тому для отримання тієї ж величини Φ , що визначає E_a , користуються спрощенням: площу реальної кривої $B_x = f(x)$ замінюють площею рівновеликого прямокутника. При цьому можуть бути два підходи: основою прямокутника слугує полюсна поділка τ , а висотою $B_x = B_{cp} = \text{const}$ (рис. 2.7), або деяка відстань b'_p (частина полюсної поділки, яку називають «розрахунковою довжиною полюсного наконечника»), а висота на цій відстані $B_x = B_{\delta(\max)} = \text{const}$ (рис. 2.8).

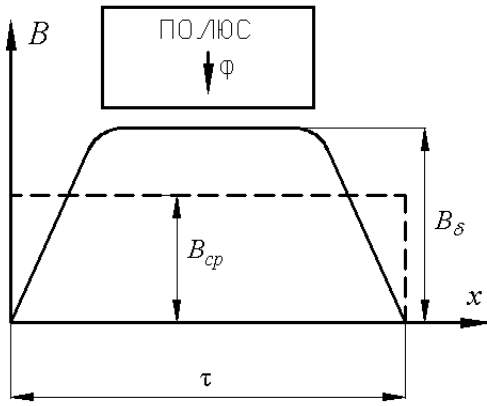


Рис. 2.7.

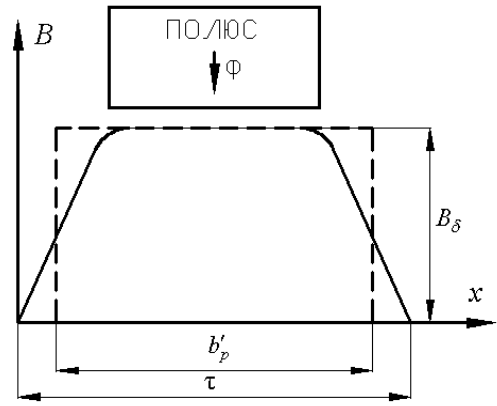


Рис. 2.8.

За рис. 2.7 магнітний потік дорівнює

$$\Phi = B_{cp} \cdot L_{\delta} \cdot \tau, \quad (2.30)$$

а за рис. 2.8 магнітний потік дорівнює

$$\Phi = B_{\delta} \cdot L_{\delta} \cdot b'_p, \quad (2.31)$$

де B_{cp} – середнє значення індукції на полюсній поділці (рис. 2.7); B_{δ} – найбільше (амплітудне) значення індукції на відстані b'_p (рис. 2.8).

В обох випадках

$$\Phi = B_{cp} \cdot L_{\delta} \cdot \tau = \alpha_{\delta} \cdot B_{\delta} \cdot L_{\delta} \cdot \tau = \frac{\pi \alpha_{\delta}}{2p} \cdot B_{\delta} \cdot D_a \cdot L_{\delta}, \quad (2.32)$$

де $\alpha_{\delta} = \frac{b'_p}{\tau} = \frac{B_{cp}}{B_{\delta}}$ – коефіцієнт полюсного перекриття, величина якого лежить у діапазоні 0,6...0,67; $\tau = \frac{\pi D_a}{2p}$ – полюсна поділка.

Враховуючи залежності (2.24), (2.28) і (2.32), кінцевий вигляд вираз (2.23) матиме такий

$$P_{EM} = \pi^2 \cdot \alpha_{\delta} \cdot (D_a^2 \cdot L_{\delta}) \cdot (A \cdot B_{\delta}) \cdot n_H, \quad (2.33)$$

Висновки по (2.33) рекомендується зробити самостійно, враховуючи висновки по (2.22).

2.2.3. Машини змінного струму

Для визначення необхідного зв'язку використаємо загальний вираз для електромагнітної потужності

$$S_{EM} = m \cdot E_1 \cdot I_1, \quad (2.34)$$

в який підставимо загальний вираз для ЕРС якірної (статорної) обмотки машин змінного струму

$$E_1 = \pi \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot \Phi \cdot K_{об}, \quad (2.35)$$

і замінимо

$$f_1 = p \cdot n_1. \quad (2.36)$$

В результаті отримаємо

$$S_{EM} = m \cdot \pi \cdot \sqrt{2} (p \cdot \Phi) \cdot (w_1 \cdot I_1) \cdot K_{об} \cdot n_1, \quad (2.37)$$

звідки слідує (як і в попередніх випадках), що розрахункова потужність машини змінного струму пропорційна добутку (сумарного) потоку $(p \cdot \Phi)$ на МРС фази обмотки $(w_1 \cdot I_1)$.

Далі виразимо зв'язок між фазним струмом I_1 і лінійним навантаженням A . За визначенням лінійне навантаження

$$A = \frac{2m \cdot w_1 \cdot I_1}{\pi D}, \quad (2.38)$$

де w_1 – послідовна кількість витків у фазі; I_1 – фазний номінальний струм; m – число фаз; D – діаметр якоря або розточки статора.

З (2.38) маємо, що

$$w_1 \cdot I_1 = A \cdot \frac{\pi D}{2m}. \quad (2.39)$$

У перетворенні енергії в машинах змінного струму основну функцію виконує перша гармоніка магнітного потоку у повітряному проміжку Φ (потік взаємоіндукції або основний), густина якого (індукція) має синусоїдальний розподіл вздовж полюсної поділки. Амплітуду індукції в повітряному проміжку $B_{\delta(max)}$ зазвичай записують як B_{δ} (для прискорення і спрощення запису індекс "max" відкидають).

Для вираження магнітного потоку Φ через величину індукції B_{δ} користуються викладеним вище методом рівних площ, використовуючи середню величину індукції B_{cp} , постійну за числовим значенням на всій полюсній поділці (рис. 2.9). Цей підхід зручний тим, що з курсу «Теоретичних основ електротехніки» відоме для синусоїди співвідношення

$$\frac{B_{cp}}{B_{max}} = \frac{2}{\pi}.$$

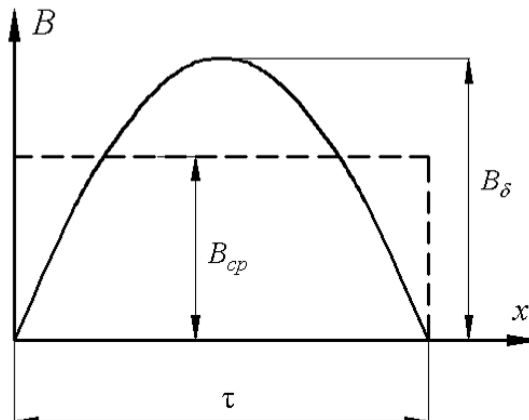


Рис. 2.9.

Таким чином, можна записати

$$\Phi = B_{cp} \cdot \tau \cdot L_{\delta} = \frac{2}{\pi} B_{\delta} \cdot \tau \cdot L_{\delta}, \quad (2.40)$$

а при заміні $\tau = \frac{\pi D}{2p}$ отримують

$$\Phi = \frac{1}{p} \cdot B_{\delta} \cdot D \cdot L_{\delta}. \quad (2.41)$$

У вираз (2.37) підставимо (2.39) і (2.41) і отримаємо кінцевий вираз для машин змінного струму

$$S_{EM} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} K_{об} \cdot (D^2 \cdot L_{\delta}) \cdot (A \cdot B_{\delta}) \cdot n_1. \quad (2.42)$$

Висновки по (2.42) зробити самостійно.

2.3. Узагальнені вирази для ЕРС обмоток і розрахункової потужності

Принцип дії ЕМПЕ заснований на законі електромагнітної індукції, котрий має математичний запис

$$e = B \cdot l \cdot v, \quad (2.43)$$

у трактовці Фарадея та

$$e = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (2.44)$$

у трактовці Максвелла.

Цей закон дозволяє ЕРС робочих (якірних) обмоток ЕМПЕ записати (розрахувати) одним, загальним виразом, в якому особливості конкретного ЕМПЕ враховуються числовим значенням коефіцієнта.

Історично першими були створені електричні машини постійного струму. Використовуючи вираз для закону електромагнітної індукції в трактовці Фарадея (2.43), отримано вираз для ЕРС якоря

$$E_a = \frac{p \cdot N}{a} \cdot \Phi \cdot n_n. \quad (2.45)$$

Виразимо число активних провідників обмотки якоря N через кількість витків w_a у паралельній вітці. Легше цей вираз отримати, виразивши w_a через N :

$$w_a = \frac{N}{2 \cdot 2a} = \frac{N}{4a}, \quad (2.46)$$

звідки

$$N = 4a \cdot w_a. \quad (2.47)$$

Підставимо (2.47) в (2.45) і отримаємо

$$E_a = 4w_a \cdot \Phi \cdot p \cdot n_n. \quad (2.48)$$

Вираз ЕРС якоря машини постійного струму (2.48) можна записати у вигляді

$$E_a = 4w_a \cdot \Phi \cdot f_a, \quad (2.49)$$

де $f_a = p \cdot n_n$ – частота струму в провідниках якоря, або частота перемагнічування ротора.

Порівнюючи вирази для ЕРС (2.49), (2.17) і (2.35), можна вивести загальний вираз

$$E = \pi \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot w_1 \cdot K_{об1} \cdot \Phi, \quad (2.50)$$

де $f_1 = f_a$ – частота зміни повного потоку Φ на полюс (стрижня) відносно кількості послідовно підключених витків $w_1 = w_a$ у фазі (або паралельній вітці);

$K_{об1}$ – обмоткових коефіцієнт, який для машин постійного струму дорівнює 1/1.11, для трансформаторів дорівнює одиниці, а для машин змінного струму – добутку $K_{ск} \cdot K_{ук1} \cdot K_{р1}$.

Аналізуючи вид виразів (2.19), (2.26) і (2.37), можна зробити висновок, що величина розрахункової потужності залежить від:

- добутку повного або сумарного потоку машини (або стрижня) – $p \Phi$ (або Φ_c) – на повну МРС обмоток – $mF_1 = mw_1I_1$ (або $N \cdot i_a$);
- частоти f_1 (частоти обертання якоря n_1).

Зв'язок електромагнітної потужності з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою (частотою обертання) також можна записати в загальному для всіх ЕМПЕ вигляді

$$S_{эм} = K \cdot (D^2 \cdot L_\delta) \cdot (A \cdot B) \cdot f_1, \quad (2.51)$$

де $K = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \cdot m \cdot K_c$ – для трансформаторів, в яких число фаз і стрижнів співпадають

(в загальному випадку замість m потрібно ставити кількість стрижнів);

$K = \frac{\pi^2 \cdot \alpha_\delta}{p}$ – для машин постійного струму;

$K = \frac{\pi^2}{\sqrt{2} \cdot p} \cdot K_{об1}$ – для машин змінного струму.

Наведені вище вирази дозволяють показати загальність підходу до проектування ЕМПЕ, передбачити й оцінити вплив тієї чи іншої величини на кінцевий результат, зменшити діапазон пошуку варіанта ЕМПЕ, спроектованого з потрібними експлуатаційними й тактико-технічними показниками.

Прикладом можуть слугувати найпростіші судження. Наприклад, при постійній розрахунковій потужності і частоті (або частоті обертання) збільшення добутку електромагнітних навантажень $(A \cdot B)$ призводить до зменшення умовного об'єму $(D^2 \cdot L_\delta)$, тобто зменшенню маси та габаритів ЕМПЕ. Щоправда, значне збільшення $(A \cdot B)$ або якоїсь складової добутку обмежено неприпустимим, наприклад, нагрівом або зміною експлуатаційних характеристик.

Якщо прийняти постійними електромагнітну потужність і електромагнітне навантаження, то збільшення частоти (або частоти обертання) призводить до зменшення $(D^2 \cdot L_\delta)$, тобто до зниження маси. Ця обставина використовується для ЕМПЕ в автономних пристроях. Наприклад, в літаках використовується частота 400 Гц.

Знання узагальнених виразів для ЕМПЕ дозволяє найбільш ефективно й економічно проводити проектуванню розрахунок будь якого типу ЕМПЕ, враховуючи його особливості.

Схематично викладене вище зображено на рис. 2.10 і може слугувати в якості опорного конспекту.

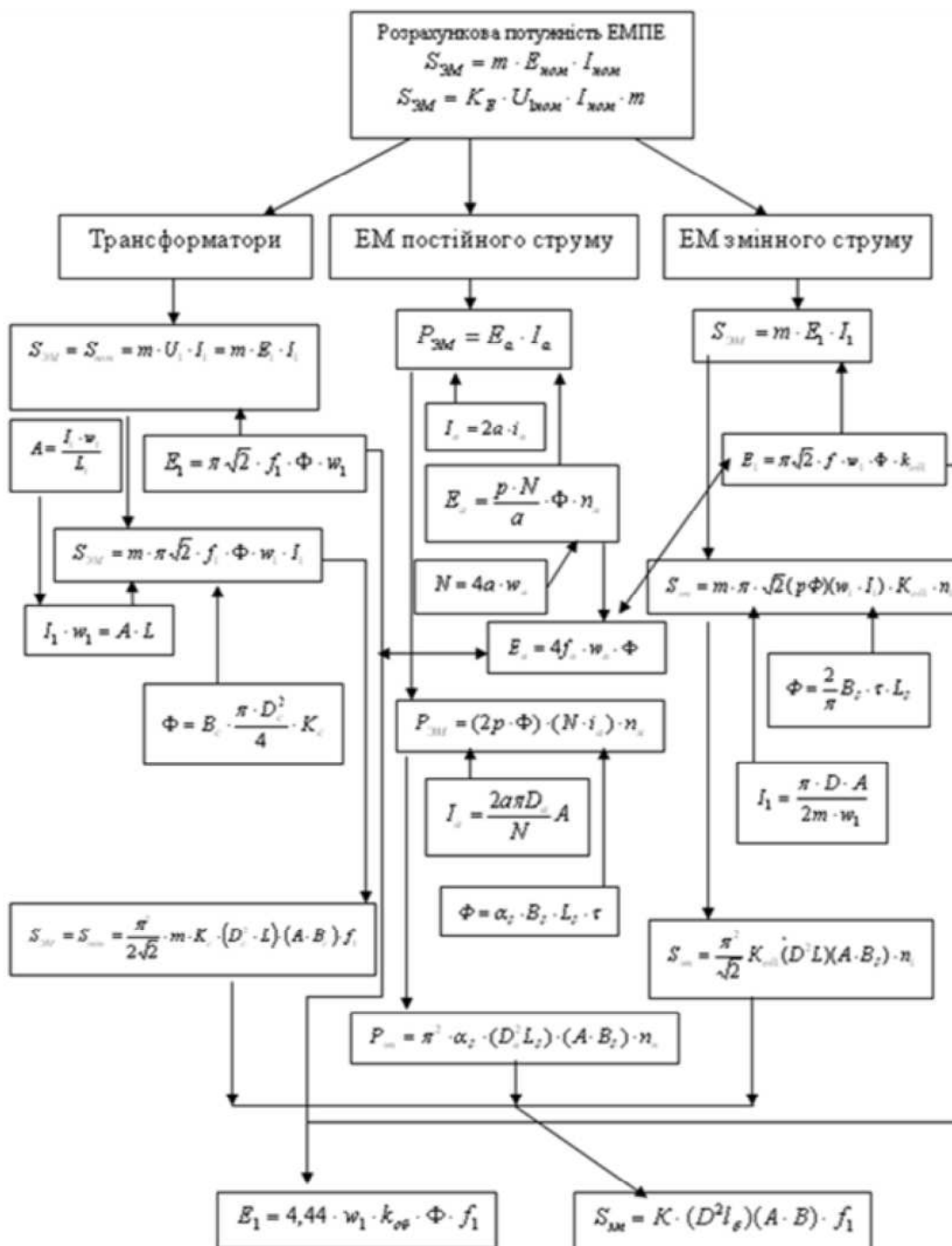


Рис. 2.10.

Розділ № 3. Електромашинні сталі та геометрично подібний ряд

Процес проектування ЕМПЕ складається з проведення багатоваріантних розрахунків, з яких обирається один, що в найбільшій мірі задовольняє техніко-економічні показники (тобто функції мети).

З накопиченням досвіду проектування та виготовлення ЕМПЕ розроблялися рекомендації для зниження кількості варіантів розрахунків та витрат часу на пошук потрібного варіанту, тобто підвищення ефективності і якості праці проектанта. Інакше кажучи, множина можливого існування ЕМПЕ зменшується до якоїсь області, де пошук потрібного варіанту розрахунку скорочується за рахунок зменшення кількості розрахункових варіантів.

На початку 20-го сторіччя німецький електромеханік Арнольд запропонував при проектуванні електричних машин використовувати сталу, названу на його честь – стала Арнольда.

У середині 20-го сторіччя професор КПІ І.М.Постніков запропонував універсальну електромашинну сталу, що застосовується у проектуванні електричних машин великої потужності.

Ці сталі дозволяють визначити основні розміри електричних машин з урахуванням електромагнітних навантажень та ряду геометричних співвідношень. Вони і зараз можуть бути використані при проектуванні індивідуальних (одиничних) і спеціальних ЕМПЕ. Однак, на сучасному етапі проектування існують обмеження та рекомендації, що зумовлені економічними витратами електротехнічної сталі (задаються строго визначені розміри зовнішніх діаметрів статорів машин змінного струму та якорів (роторів) машин постійного струму, величини діаметрів стрижнів силових трансформаторів), а також експлуатаційні вимоги (наприклад, висота осі обертання). Ці обмеження дозволяють достатньо швидко знайти діаметр якоря за напрацьованими практичними рекомендаціями чи вимогами стандартів.

Для визначення другого основного розміру частіше за все використовується вираз зв'язку розрахункової потужності з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями і частотою (чи частотою обертання).

Зріст професійного рівня проектанта, нові підходи до проектування та використання комп'ютерної техніки у деякій мірі знизило цінність сталих. Однак, і в теперішній час вони дозволяють:

- більш глибоко зрозуміти загальні теоретичні аспекти проектування;
- оцінити вибір величин електромагнітних навантажень та ступінь використання активних матеріалів;
- прослідкувати вплив окремих чинників на основні розміри та експлуатаційні властивості;
- прослідкувати історичний шлях розвитку проектування ЕМПЕ.

3.1. Стала Арнольда

Сенс запровадження сталої Арнольда в тому, що з її допомогою прискорюється пошук основних розмірів ЕМПЕ. Для цього визначається умовний об'єм активної

частини $(D^2 \cdot L)$ з виразу електромагнітної (розрахункової) потужності $S_{\text{эм}}$, який враховує зв'язок з основними розмірами, електромагнітними навантаженнями та частотою.

Задаючись числовими значеннями електромагнітних навантажень та за відомою величиною $S_{\text{эм}}$, визначається числове значення $(D^2 \cdot L)$. Далі використовуючи співвідношення між D та L за даними прототипу чи за рекомендаціями, визначають D і L , тобто основні розміри.

Знайдемо вирази $(D^2 \cdot L)$ для типів ЕМПЕ, що розглядаються в курсі.

3.1.1. Трансформатори

З відомого виразу для трансформаторів

$$S_{\text{эм}} = \frac{m \cdot \pi^2 \cdot K_c}{2\sqrt{2}} \cdot (D_c^2 \cdot L_{об}) (A \cdot B_c) \cdot f_1, \quad (3.1)$$

маємо

$$(D_c^2 \cdot L_{об}) = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2 K_c (A \cdot B_c)} \cdot \frac{S_{\text{эм}}}{m \cdot f_1} = C_{am} \cdot \frac{S_{\text{эм}}}{m \cdot f_1}, \quad (3.2)$$

де

$$C_{am} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2 K_c (A \cdot B_c)}, \quad (3.3)$$

C_{am} – стала Арнольда для трансформаторів, $\text{м}^3 / \text{Дж}$.

Потужність силових трансформаторів може бути від 10 кВ·А до 1000000 кВ·А, а числове значення C_{am} змінюється практично у межах одного порядку, тому C_{am} й отримала назву ‘сталості’.

Для трансформаторів стала Арнольда лежить у діапазоні:

$C_{am(Cu)} = (7,5 - 3) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{Дж}$ – обмотки з міді,

$C_{am(Al)} = (10 - 4,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{Дж}$ – обмотки з алюмінію.

Менші значення відповідають більшим потужностям, оскільки зі зростанням потужності використовують підвищені електромагнітні навантаження.

3.1.2. Машини постійного струму

Для машин постійного струму

$$P_{\text{ЭМ}} = \alpha_{\delta} \cdot \pi^2 \cdot (D_{\delta}^2 \cdot L_{\delta}) \cdot (A \cdot B_{\delta}) \cdot n_n, \quad (3.4)$$

звідки

$$(D^2 \cdot L_\delta) = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot (A \cdot B_\delta)} \cdot \frac{P_{\text{ЭМ}}}{n_n} = C_{a=} \cdot \frac{P_{\text{ЭМ}}}{n_n}, \quad (3.5)$$

де

$$C_{a=} = \frac{1}{\pi^2 \cdot \alpha_\delta \cdot (A \cdot B_\delta)}, \quad (3.6)$$

$C_{a=}$ – стала Арнольда для машин постійного струму, $\text{м}^3 / \text{Дж}$.

3.1.3. Машини змінного струму

Із виразу для машин змінного струму

$$S_{\text{эм}} = \frac{\pi^2}{\sqrt{2}} \cdot K_{\text{об1}}(D^2 \cdot L_\delta)(A \cdot B_\delta) \cdot n_1, \quad (3.7)$$

отримаємо

$$(D^2 \cdot L_\delta) = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot K_{\text{об1}}(A \cdot B_\delta)} \cdot \frac{S_{\text{эм}}}{n_1} = C_{a\approx} \cdot \frac{S_{\text{эм}}}{n_1}, \quad (3.8)$$

де

$$C_{a\approx} = \frac{\sqrt{2}}{\pi^2 K_{\text{об1}}(A \cdot B_\delta)}, \quad (3.9)$$

$C_{a\approx}$ – стала Арнольда для машин змінного струму, $\text{м}^3 / \text{Дж}$.

Треба відмітити, що числове значення сталої Арнольда для машин постійного і змінного струму лежить в діапазоні $C_a = (20 \div 2) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{Дж}$, причому менші значення відповідають більшим потужностям.

3.2. Універсальна стала

Запровадження до проектування цієї сталої дозволяє одразу знайти діаметр (чи полюсну поділку), а потім, користуючись співвідношенням між D і L , визначити й розрахункову довжину. Для знаходження розрахункової довжини використовують вираз електромагнітної (розрахункової) потужності (3.1), (3.4) або (3.7).

Вираз для універсальної сталої можна отримати для всіх типів ЕМПЕ.

3.2.1. Трансформатори

Для необхідних перетворень у (3.1) заміняють лінійне навантаження A через густину струму j , яка використовується на практиці. Додатково вводять геометричні коефіцієнти, числові значення яких характерні для існуючих серійних трансфор-

маторів загального призначення:

$$\alpha = \frac{L_c}{D_c} = 3,8 \div 5,2 \quad , \quad (3.10)$$

$$\lambda = \frac{L_{\text{внк}}}{2D_c} = 0,75 \div 1,02 \quad , \quad (3.11)$$

де L_c – висота стрижня або висота вікна трансформатора; $L_{\text{внк}}$ – ширина вікна трансформатора.

Заповнення вікна трансформатора металом всіх обмоток характеризують коефіцієнтом

$$\varphi = \frac{P_{mo}}{P_{\text{внк}}} \quad , \quad (3.12)$$

де P_{mo} – чиста площа перерізу металу обмоток у вікні; $P_{\text{внк}} = L_c \cdot L_{\text{внк}}$ – площа вікна (у світлі).

Відмітимо, що $\varphi = 0,2 \dots 0,09$, причому менші числові значення відповідають трансформаторам з більш високим класом напруги.

Використовуючи вирази (3.10), (3.11) і (3.12), отримаємо площу перерізу металу всіх обмоток.

$$P_{mo} = \varphi \cdot P_{\text{внк}} = \varphi \cdot L_c \cdot L_{\text{внк}} = \varphi \cdot \alpha \cdot D_c \cdot 2 \cdot \lambda \cdot D_c = 2 \cdot \varphi \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot D_c^2. \quad (3.13)$$

Припускаючи рівність густин струму в обмотках НН і ВН ($j_1 = j_2$), можна вважати, що площа перерізу металу обмоток НН і ВН рівні, тобто $P_{m1} = P_{m2}$. Тоді вираз для лінійного навантаження приймає вигляд з урахуванням (3.13)

$$\begin{aligned} A &= \frac{I_1 \cdot w_1}{L_{ob}} = (j_1 \cdot P_{\text{внк}}) \cdot \frac{w_1}{L_{ob}} = \frac{j}{L_{ob}} \cdot (w_1 \cdot P_{\text{внк}}) = \\ &= \frac{j}{L_{ob}} \cdot \left(P_{m1} \cdot \frac{4}{4} \right) = \frac{j_1}{L_{ob}} \cdot \left(P_{mo} \cdot \frac{1}{4} \right) = \frac{j_1}{L_{ob}} \cdot \frac{1}{2} \varphi \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot D_c^2 \end{aligned} \quad (3.14)$$

Підставивши (3.14) у (3.1), отримаємо

$$S_{\text{эм}} = S_{\text{ном}} = \frac{m \cdot \pi^2 \cdot K_c \cdot \varphi \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot D_c^4 \cdot (B_c \cdot j_1) \cdot f_1}{4\sqrt{2}} \quad , \quad (3.15)$$

звідки

$$D_c = C_{st} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_{\text{эм}}}{m \cdot \alpha \cdot \lambda \cdot f_1}} \quad , \quad (3.16)$$

де

$$C_{st} = \sqrt[4]{\frac{4\sqrt{2}}{\pi^2 \cdot K_c \cdot \varphi \cdot B_c \cdot j_1}} \quad , \quad (3.17)$$

C_{st} – універсальна стала для трансформаторів, $\text{м} / \text{Дж}^{1/4}$.

Чисельні величини постійної для трансформаторів з природним масляним

$$\lambda_n = b_n / t_1, \quad (3.19)$$

де b_n – ширина прямокутного паза (рис. 3.2); $t_1 = \pi D / Z_1$ – зубцева поділка (крок); Z_1 – кількість зубців (пазів) якоря.

$$\xi = b_{z1} / t_1, \quad (3.20)$$

де b_{z1} – ширина зубця якоря (рис. 3.2).

$$\beta = \tau / L_\delta. \quad (3.21)$$

де L_δ – розрахункова довжина пакету магнітопроводу якоря.

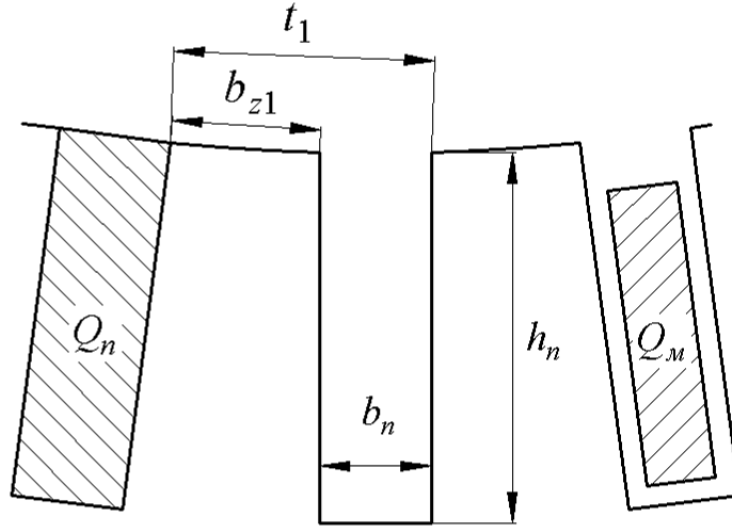


Рис. 3.2.

Коефіцієнт заповнення паза міддю

$$\varphi = Q_m / Q_n, \quad (3.22)$$

де Q_m – сумарний переріз міді провідників, розташованих в одному пази; $Q_n = b_n \cdot h_n$ – площа паза у світлі.

Коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю

$$K_c = L_{Fe} / L_\delta, \quad (3.23)$$

де L_{Fe} – довжина сталі ('чистого' заліза) якоря.

Магнітний потік на зубцевій поділці

$$\Phi_{t1} = B_\delta \cdot t_1 \cdot L_\delta, \quad (3.24)$$

Магнітний потік, що входить в зубець

$$\Phi_{z1} = B_{z1} \cdot b_z \cdot L_{Fe} = B_{z1} \cdot K_c \cdot b_z \cdot L_\delta. \quad (3.25)$$

З умови рівності потоків $\Phi_{t1} = \Phi_{z1}$ і (3.20) випливає

$$B_\delta = B_{z1} \frac{K_c \cdot b_z \cdot L_\delta}{t_1 \cdot L_\delta} = B_{z1} \cdot \xi \cdot K_c. \quad (3.26)$$

З урахуванням (3.18), (3.19) та (3.22) лінійне навантаження

$$A = \frac{u_n i_a}{t_1} = \frac{u_n (q_{\text{эфф}} \cdot j_a)}{t_1} = j_a \frac{Q_M}{t_1} =$$

$$= j_a \frac{(\varphi \cdot Q_n)}{t_1} = j_a \cdot \varphi \cdot \left(\frac{b_n}{t_1} \right) \cdot h_n = j_a \cdot \varphi \cdot \lambda_n \cdot \lambda_1 \cdot \tau, \quad (3.27)$$

де u_n – кількість провідників в пазу, по яким протікає струм паралельної вітки i_a ; $q_{\text{эфф}} = n \cdot q_{\text{эл}}$ – ефективний переріз провідника, по якому протікає струм паралельної вітки i_a та який може формуватися з n провідників в паралель з перерізом цих провідників – $q_{\text{эл}}$.

Підставивши замість діаметра вираз

$$D = (2p\tau) / \pi, \quad (3.28)$$

та замість номінальної частоти обертання

$$n_n = f_a / p, \quad (3.29)$$

а також вирази (3.21), (3.26) і (3.27) в (3.4), отримаємо

$$P_{\text{ЭМ}} = (2\alpha_\delta \cdot \lambda_n \cdot \xi \cdot \varphi \cdot K_c \cdot (j_a \cdot B_{Z1})) \cdot 2p \cdot \frac{\lambda_1}{\beta} \cdot f_a \cdot \tau^4, \quad (3.30)$$

звідки

$$\tau = C_{s=} \cdot \sqrt[4]{\frac{P_{\text{ЭМ}} \cdot \beta}{2p \cdot \lambda_1 \cdot f_a}}, \quad (3.31)$$

де

$$C_{s=} = \sqrt[4]{\frac{1}{2\alpha_\delta \cdot \lambda_n \cdot \xi \cdot \varphi \cdot K_c \cdot (j_a \cdot B_{Z1})}}, \quad (3.32)$$

$C_{s=}$ – універсальна стала для машин постійного струму, $\text{м} / \text{Дж}^{1/4}$.

3.2.3. Машини змінного струму

Універсальна стала для машин змінного струму вводиться підстановкою тих же виразів, що й для машин постійного струму. Вони підставляються в (3.7). Цей вивід пропонується зробити студентам самостійно й обов'язково під час підготовки до екзамену.

Кінцевий вираз для універсальної машинної сталої має вигляд:

$$C_{s\approx} = \sqrt[4]{\frac{1}{\sqrt{2} \cdot K_{\text{об1}} \cdot \lambda_n \cdot \xi \cdot \varphi \cdot K_c \cdot (j \cdot B_{Z1})}}, \text{ м} / \text{Дж}^{1/4}. \quad (3.33)$$

ПРИМІТКА. Для машин постійного і змінного струму діапазон зміни

$$C_{s=} \approx C_{s\approx} = (4,4...3,0) \cdot 10^{-2} \text{ м} / \text{Дж}^{1/4}.$$

3.3. Порівняння сталей

Спільним для обох типів сталей є:

- сприяють знаходженню основних розмірів, зменшуючи область пошуку необхідного варіанту;
- включають числові значення електромагнітних навантажень, чим визначають ступінь використання активних матеріалів;
- враховують види й типи активних матеріалів (мідні чи алюмінієві обмотки, гарячекатана або холоднокатана сталь), а також їх особливості (наприклад, ізоляцію пластин електротехнічної сталі);
- містять низку загальних параметрів, що характеризують геометричні співвідношення та особливості виконання обмоток.

Відрізняються сталі тим, що:

- стала Арнольда може використовуватись на весь діапазон потужностей ЕМПЕ, а універсальна дає добрі результати для машин з прямокутними відкритими пазами;
- універсальна стала має менший діапазон зміни в залежності від електромагнітної (чи корисної) потужності;
- універсальна стала враховує більше конструктивних й технологічних чинників, ніж стала Арнольда.

У процесі проектування спеціальних або одиничних ЕМПЕ можна користуватися обома сталими для визначення основних розмірів.

Опорний конспект за сталими приведено на рис. 3.1 і рис. 3.3.

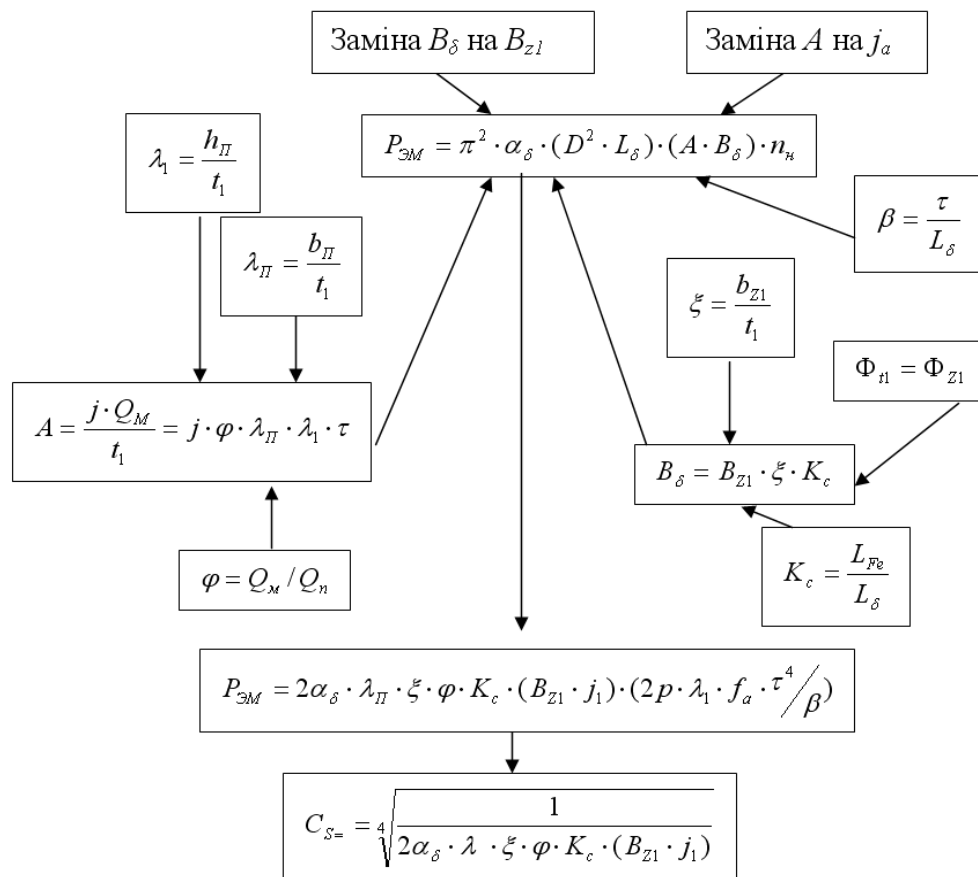


Рис. 3.3.

3.4. Геометрично подібний ряд

Усі ЕМПЕ можна представити у вигляді зростаючого за потужністю ряду. Вплив зростання потужності на особливості і якості ЕМПЕ дозволяє оцінити введення до основ теорії проектування ідеалізованого геометрично подібного ряду, що дозволяє:

- теоретично підказати зміни в техніко-економічних показниках ЕМПЕ зі зростанням потужності;

- практично оцінити техніко-економічні показники ЕМПЕ, у якому відома тільки потужність, за даними існуючого ЕМПЕ.

Визначення. Геометрично подібним рядом (ГПР) називають ряд ЕМПЕ, що зростає за потужністю та має однакові електромагнітні навантаження, номінальну напругу, частоту (або частоту обертання), а також геометрично подібну конструкцію.

Для виведення основних співвідношень ГПР скористаємося виразами для універсальних сталих, що були отримані. Звідки випливає, що

$$D, \tau \sim \sqrt[4]{S_{\text{эм}}} . \quad (3.34)$$

Тобто D і τ , що входять в (3.34) – це лінійні розміри, які у загальному випадку можна позначити як L . Тоді можна записати основоположну залежність ГПР

$$\boxed{L \sim \sqrt[4]{S_{\text{эм}}}} . \quad (3.35)$$

Рівняння (3.35) дозволяє оцінити зміну розмірів ЕМПЕ зі зростанням потужності. Нехай базовий ЕМПЕ має потужність S_{δ} та L_{δ} – будь-який відомий розмір базового ЕМПЕ. При цьому відома потужність S_x ЕМПЕ, розміри якого необхідно оцінити. Відмітимо, що розрахунок носить оцінювальний характер, тому будемо вважати, що корисна потужність, споживана потужність, повна й електромагнітна потужності приблизно рівні, тобто

$$P_2 \approx P_1 \approx S \approx S_{\text{эм}} \approx S_{\delta} . \quad (3.36)$$

Тоді з урахуванням (3.36) можна скласти пропорцію

$$\left. \begin{aligned} L_{\delta} &\sim \sqrt[4]{S_{\delta}} \\ L_x &\sim \sqrt[4]{S_x} \end{aligned} \right\} \quad (3.37)$$

звідки випливає, що

$$L_x \sim L_{\delta} \cdot \sqrt[4]{\frac{S_x}{S_{\delta}}} . \quad (3.38)$$

Нехай S_x у 16 разів більше за S_{δ} , тоді $L_x \sim 2L_{\delta}$, тобто збільшення потужності ЕМПЕ в 16 разів призводить до збільшення розмірів його приблизно у 2 рази!

Користуючись (3.35), маємо

$$V \sim m \sim C_a \sim \sum p \sim L^3 \sim \sqrt[4]{S_{\text{эм}}^3} = S_{\text{эм}}^{\frac{3}{4}} , \quad (3.39)$$

де $V \sim L^3$ – у загальному випадку об'єм; $m = \gamma_{cp} V \sim L^3$ – будь-яка маса ЕМПЕ, кг;

γ_{cp} – середня густина, $кг/м^3$; $C_a = C_{cp} \cdot m \sim L^3$ – вартість повна або активних матеріалів, $грн.$; C_{cp} – середня вартість, $грн./кг$; $\sum p = p_{cp} m \sim L^3$ – повні втрати в ЕМПЕ, $Вт$; p_{cp} – усереднені питомі втрати, $Вт/кг$.

На практиці користуються відносними показниками

$$\frac{V}{S_{эм}} \sim \frac{m}{S_{эм}} \sim \frac{C_a}{S_{эм}} \sim \frac{\sum p}{S_{эм}} \sim \frac{\sqrt[4]{S_{эм}^3}}{S_{эм}} = \frac{1}{\sqrt[4]{S_{эм}}} = S_{эм}^{-\frac{1}{4}}, \quad (3.40)$$

тобто зі зростанням потужності ЕМПЕ техніко-економічні показники покращуються. Наприклад, ККД

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1} \sim 1 - \frac{\sum p}{S_{эм}} \sim 1 - \frac{1}{\sqrt[4]{S_{эм}}} \quad (3.41)$$

збільшується зі зростанням потужності.

В якості прикладу використання співвідношень ГПР розглянемо зміну ковзання асинхронних машин зі зростанням потужності. Відомо, що

$$s = \frac{p_{ел2}}{P_{эм}} \sim \frac{\sum p}{S_{эм}} \sim \frac{\sqrt[4]{S_{эм}^3}}{S_{эм}} = \frac{1}{\sqrt[4]{S_{эм}}}, \quad (3.42)$$

тобто ковзання зменшується зі зростанням потужності, що й можна побачити на практиці: машини малої потужності мають $s_{ном} = (7...5)\%$, а великих потужностей – $s_{ном} = (2...1,5)\%$.

Користуючись отриманими співвідношеннями й складаючи пропорції типу (3.37), можна за відомими даними одного ЕМПЕ визначити приблизно дані іншого при відомій його потужності.

Треба відмітити, що співвідношення ГПР при практичному проектуванні порушуються, а оцінки за їх допомогою є приблизними і якісними. Основними причинами порушень є:

- питомий тепловий потік

$$q = \frac{\sum p}{P_{охл}} \sim \frac{\sqrt[4]{S_{эм}^3}}{\sqrt[4]{S_{эм}^2}} = \sqrt[4]{S_{эм}}, \quad (3.43)$$

який збільшується зі зростанням потужності, що потребує зміни конструкцій ЕМПЕ з метою покращення охолодження, тобто збільшення поверхні охолодження або вдосконалення системи вентиляції і т. п.;

- застосування зі зростанням потужності потрібного типу конструкції обмоток (всипної, жорсткої чи стрижньової);

- вибір мінімально припустимих розмірів різних видів ізоляції провідників, виткової та пазової в залежності від напруги, а також різні форми пазів призводять до порушення геометричної подібності зубцевої зони;

- основні розміри ЕМПЕ вимушені при проектуванні відхилятися від залежностей ГПР через вимоги механічної міцності (наприклад, турбогенератори потужністю 100 МВт і вище), через норми на момент інерції, через рекомендовані запаси механічної стійкості елементів конструкції й кріплення.

Незважаючи на зазначені причини відхилень, співвідношення ГПР використовують при проектуванні, оцінюючи якісний вплив величини розрахункової потужності. В інженерній діяльності співвідношення ГПР дозволяють приблизно розрахувати очікувані ККД, розміри, масу, вартість і т.п. ЕМПЕ що проектується, за даними відомого, причому точність підвищується, якщо потужності обох ЕМПЕ не відрізняються більш ніж на порядок, а їх конструкції й системи охолодження подібні.

У табл. 3.1 приведені параметри трансформаторів, вплив окремих чинників яких сприяє виконанню співвідношень ГПР реально.

Таблиця 3.1

Параметри	Потужність, кВ·А			
	100	1600	25000	400000
Клас напруги, кВ	10	35	110	220
Регулювання напруги	ПБВ	ПБВ	РПН	ПБВ
Діаметр стрижня, см	14	28	56	118
Витрати металу на обмотки, кг/(кВ·А)	2,14	1,24	0,766	0,312
Втрати короткого замикання, Вт/(кВ·А)	19,7	11,25	4,80	2,20
Втрати неробочого ходу, Вт/(кВ·А)	3,10	1,94	1,16	0,700

Розділ № 4. Проектування трансформаторів

4.1. Вихідні дані

Процес проектування трансформаторів починається з отримання або складання технічного завдання (або технічних вимог), де обов'язково містяться наступні вихідні дані:

- номінальна потужність, кВ·А;
- номінальні (лінійні) напруги обмоток ВН, СН і НН, кВ;
- число фаз;
- схема і група з'єднання обмоток;
- величина струму неробочого ходу, %;
- втрати неробочого ходу, кВт;
- втрати короткого замикання, кВт;
- напруга короткого замикання, %;
- вид і ступені регулювання напруги;
- вид охолодження;
- кліматичне виконання;
- категорія розміщення.

Перераховані вихідні дані можуть бути збільшені, при цьому вони повинні задовольняти вимоги існуючих міждержавних і державних стандартів.

Нижче розглядаються основні вихідні дані й вимоги до них.

4.1.1. Номінальна потужність

У двообмоткових трансформаторах задається номінальна потужність всіх фаз обмоток ВН (або НН)

$$S_{ном} = S_{номВН} = S_{номНН}. \quad (4.1)$$

В триобмоткових трансформаторах задається $S_{ном}$ всіх фаз обмоток найбільшої потужності, їх потужність розподіляється між усіма фазами інших обмоток. Наприклад,

$$S_{ном} = S_{номВН} = S_{номСН} + S_{номНН}. \quad (4.2)$$

Числова величина $S_{ном}$ повинна відповідати стандартній шкалі потужностей (ГОСТ 9680 – 77Е), що має коефіцієнт наростання, який береться з ряду переважних чисел.

Ряд переважних чисел – це математично обґрунтовані числа (позначення R), що дозволяють проводити наростання величин потужностей з найбільшим техніко-економічним їх використанням споживачами. Цей ряд використовується й в інших областях, наприклад, при виборі розмірів предметів широкого вжитку і їх упаковки (тари).

Ряд переважних чисел визначається числами:

$$R_5 = \sqrt[5]{10}; R_{10} = \sqrt[10]{10}; R_{20} = \sqrt[20]{10}; R_{40} = \sqrt[40]{10} \text{ і } R_{80} = \sqrt[80]{10}.$$

Для трансформаторів потужністю до 63000 кВ·А включно використовується коефіцієнт наростання потужності

$$K = R_5 = \sqrt[5]{10} \approx 1,6. \quad (4.3)$$

Шкала потужностей складається за допомогою геометричної прогресії

$$q = ab^n = 10(\sqrt[5]{10})^n = 10 \cdot (1,6)^n, \quad (4.4)$$

де приймають $n = 0, 1, 2, \dots$ і т.д.

Підставляючи послідовно в (4.4) величини n , отримуємо шкалу номінальних потужностей:

$S_n = 10 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=0);$	$S_n = 100 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=5);$
$S_n = 16 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=1);$	$S_n = 160 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=6);$
$S_n = 25 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=2);$	$S_n = 250 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=7);$
$S_n = 40 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=3);$	$S_n = 400 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=8);$
$S_n = 63 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=4);$	$S_n = 630 \text{ кВ} \cdot \text{А} \ (n=9).$

З приведених значень S_n неважко відмітити закономірність наростання потужностей до 63000 кВ·А.

4.1.2. Номінальні напруги

Числові значення номінальних напруг повинні відповідати прийнятій шкалі в кіловольтах:

0,22; 0,38; 0,66; 3,0; 6,0; 10,0; 20,0; 35,0; 110; 220; 330; 500; 750; 1150.

Зазначені напруги повинні бути на вході трансформатора (обмотки, що споживають потужність) і на затискачах споживача. На виході трансформатора (обмотки, що генерують або віддають потужність) повинні мати напругу на 5% вище приведених.

Ці вимоги дозволяють відрізнити понижувальний трансформатор (наприклад, $U_{ВН}/U_{НН} = 10,0/3,15$) від підвищувального трансформатора (наприклад, $U_{ВН}/U_{НН} = 10,5/3,0$).

У вихідних даних завжди вказуються лінійні напруги, а в позначеннях трансформатора – напруги ВН й СН (якщо остання є).

4.1.3. Число фаз

Зазвичай трансформатори (і автотрансформатори) проектується та виготовляються з числом фаз $m = 1$ або $m = 3$.

На практиці зустрічається груповий трифазний трансформатор, сформований з трьох однофазних.

4.1.4. Схеми та групи з'єднання

Трифазні силові трансформатори загального призначення можуть мати наступні схеми з'єднання обмоток:

- Z і Z_n – відповідно "зігзаг" і "зігзаг з нулем";
- Y і Y_n – відповідно "зірка" та "зірка з нулем";
- Δ – "трикутник".

В наш час виготовляють трансформатори з групами "0" і "11". В однофазних можливі тільки дві групи: "0" і "6".

Міждержавні стандарти ГОСТ 12022–75, ГОСТ 11920–73Е та інші рекомендують конкретні схеми обмоток і групи з'єднання в залежності від номінальної потужності трансформатора і напруги обмотки ВН.

4.1.5. Струм неробочого ходу

Міждержавним стандартом ГОСТ 11677–75 встановлюються числові значення струму неробочого ходу у відсотках і його відхилення. Це зумовлено тим, що величина струму неробочого ходу залежить від:

- якості (марки) електротехнічної сталі;
- культури і технології виготовлення.

Міждержавним стандартом ГОСТ 11677-75 встановлюється відхилення струму неробочого ходу від заданої величини:

- не більше +30% у виготовленому трансформаторі;
- не більше +15% у розрахунках при проектуванні.

4.1.6. Втрати неробочого ходу

Числові значення втрат неробочого ходу визначає (в залежності від потужності трансформатора) міждержавний стандарт ГОСТ 11677 – 75. Це зумовлено тим, що втрати неробочого ходу залежать і визначають:

- використання електротехнічної сталі магнітопроводу, тобто характеризують величини індукції в стрижні та ярмі;
- масу електротехнічної сталі (чим вище індукція – тим маса менше);
- величину ККД (втрати пропорційні квадрату індукції)
- марку і якість електротехнічної сталі магнітопроводу;
- конструктивні рішення (наприклад, вид кутів магнітопроводу);
- нагрів трансформатора та його систему охолодження;
- культуру і технологію виготовлення;
- коефіцієнт навантаження при максимальному ККД.

Вимоги високого ККД і зниження маси магнітопроводу – це дві суперечливі вимоги. Виходячи з сумарного мінімуму вартостей виробництва і експлуатації, міждержавний стандарт встановив відхилення від заданих втрат неробочого ходу:

- не більше +15% в готовому трансформаторі;
- не більше +7,5% у розрахунках при проектуванні.

4.1.7. Втрати короткого замикання

Втрати в обмотках трансформатора при номінальному навантаженні називають втратами короткого замикання, оскільки їх величину можна визначити із дослідження к.з.

Втрати короткого замикання істотно визначають:

- ступінь використання металу обмоток, що визначається величиною лінійного навантаження, або густиною струму;
- габарити та масу обмоток;
- ККД трансформатора та коефіцієнт навантаження при максимальному ККД

$$K_n = \sqrt{\frac{P_0}{P_k}}; \quad (4.5)$$

- нагрів обмоток і питомий тепловий потік їх в усталених режимах;
- активну складову напруги короткого замикання та швидкість затухання вільної складової струму при аварійному к.з.

В зв'язку з цим міждержавний стандарт ГОСТ 11677-75 рекомендує відхилення втрат к.з. в готовому трансформаторі не більше +10% від заданих, а при проектуванні – не більше +5 %. Відхилення при проектуванні визначається:

$$\Delta P_{кз} = \frac{P_{к.расч} - P_{к.задан}}{P_{к.задан}} \cdot 100\% \leq 5\%. \quad (4.6)$$

4.1.8. Напруга короткого замикання

Під напругою к.з. розуміють величину напруги, яку необхідно подати на первинну обмотку при замкнутій накоротко вторинній, щоб по обмотках протікали свої номінальні струми.

Ця напруга задається у відсотках відповідними стандартами і змінюється в межах від (4,5...10,5)%, причому більші значення відповідають трансформаторам більших потужностей.

Величина напруги к.з. істотно впливає і визначає:

- жорсткість зовнішньої характеристики трансформатора, $U_2 = f(I_2)$ чи $U_2^* = f(K_n)$;
- розподіл навантаження між паралельно працюючими трансформаторами;
- усталений струм аварійного короткого замикання, тобто при $U_{мережі} = U_{ном}$ ($I_{уст.к.з.}^* = U_n^* / U_k^* = 1 / U_k^*$) і нагрів обмоток;
- ударний струм аварійного к.з. та електродинамічні зусилля, що діють на обмотки.

Рекомендації міждержавного стандарту ГОСТ 11677-75 по відхиленню напруги к.з. від заданого значення найбільш жорсткі: в готовому трансформаторі $\pm 10\%$, а при розрахунках – $\pm 5\%$. Відхилення визначається при розрахунку:

$$\Delta U_K = \left| \frac{U_{K.расч} - U_{K.задан}}{U_{K.задан}} \cdot 100\% \right| \leq |5\%|. \quad (4.7)$$

4.1.9. Вид і ступені регулювання напруги

Розрізняють два види регулювання напруги в трансформаторах:

- переключення без збудження (ПБЗ);
- регулювання під напругою (РПН).

В обох випадках регулювання величини вихідної напруги здійснюється зміною кількості витків обмотки ВН, що підключаються під напругу.

При ПБЗ трансформатор відключають повністю (з двох сторін) від мережі, і перемикач витків встановлюють в потрібне положення ступені регулювання витків (а значить і напруги) - $\pm 2 \times 2,5\%$, тобто відпайки в обмотці ВН мають бути зроблені від 95%; 97,5%; 100%; 102,5% і 105% витків. Таким чином, при проектуванні необхідно передбачити 5 відпайок, тобто від 4-х регульовальних ступенів, кожна з яких містить по 2,5% номінальних витків, від ступені 95% витків.

Схеми регулювання напруг (витків) ПБЗ приведені для трансформаторів:

- потужністю 250 кВ·А та нижче – на рис. 4.1;
- потужністю більш ніж 250 кВ·А та з циліндричними обмотками – на рис. 4.2;
- потужністю 250 кВ·А і вище та з неперервними спіральними котушковими обмотками при з'єднанні: «зіркою» - на рис. 4.3, а для «трикутник» - на рис. 4.4.

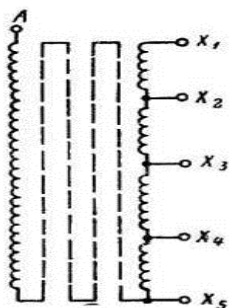


Рис. 4.1.

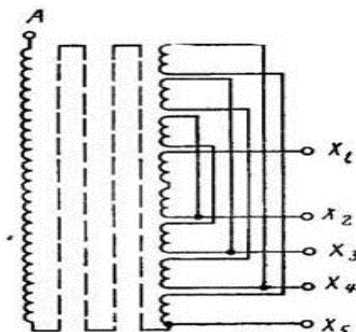


Рис. 4.2.

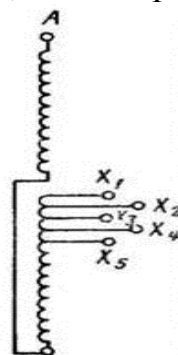


Рис. 4.3.

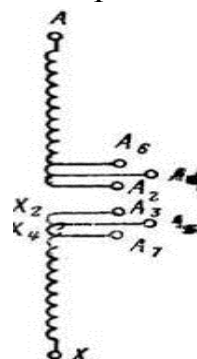


Рис. 4.4.

Спосіб РПН здійснюється при роботі трансформатора. Особливістю цього перемикачання є наявність двох контактів, що по чергові переміщуються в потрібному напрямі, та наявність у їх колі струмообмежувальних елементів (частіше реакторів). Це пояснюється тим, що при переході на нову відпайку, витки ступені закорочуються, а значить, утворюється к.з. контур цієї частини обмотки, у ньому протікають струми, які слід обмежувати. До того ж перемикачання намагаються здійснити за декілька десятків секунд.

При РПН можуть виконуватись 6 і 9 ступенів з межами регулювання до плюс-мінус 10%. Зазвичай, РПН використовують від потужностей 1000 кВ·А і вище, в той час як з ПБЗ – до 10000 кВ·А.

4.1.10. Системи охолодження

Найбільш поширені системи охолодження силових трансформаторів загально-го призначення:

- повітряні (до потужностей 1600 кВ·А);
- масляні (від 10 кВ·А і вище).

Трансформатори з повітряним охолодженням називають сухими, використовуються вони у приладах та будівлях з підвищеними вимогами до пожежобезпечності. Такі трансформатори виконують і позначають:

- **С** – сухий, з природною циркуляцією повітря, незахищений;
- **СЗ** – сухий, з природною циркуляцією повітря, захищений (має кожуха із жалюзіями);
- **СГ** – сухий, з природною циркуляцією повітря зсередини і ззовні, герметично закритий;
- **СД** – сухий з примусовим обдувом повітря.

Більш широке використання для силових трансформаторів загального призначення отримало масляне охолодження з наступними системами:

- **М** – природна циркуляція масла всередині бака й оточуючого повітря;
- **МД** – природна циркуляція масла у баці й обдув повітрям поверхні бака та радіаторів;
- **ДЦ** – примусова циркуляція масла у баці й обдув повітрям зовнішньої поверхні;
- **МВ** – природна циркуляція масла у баці й охолодження радіаторів (охолоджувачів) водою;
- **Ц** – примусова циркуляція масла у баці та охолодження радіаторів водою.

4.1.11. Кліматичне виконання та категорія розміщення

Спроектований трансформатор має враховувати макрокліматичні умови, у яких буде експлуатуватися. Ці умови враховуються кліматичним виконанням та позначаються літерою, наприклад (найбільш поширені):

- **У** – помірний;
- **ХЛ** – холодний;
- **Т** – тропічний.

Під категорією розміщення розуміють характеристику місця, де встановлюються для роботи трансформатор. Вона позначається цифрою, наприклад:

- **1** – встановлення на відкритому повітрі;
- **2** – встановлення під навісом;
- **3** – встановлення у неопалюваному приміщенні.

4.2. Визначення основних розмірів трансформатора

Зробити це можна трьома способами. Знайдені основні розміри в процесі проектування можуть уточнюватися і змінюватися з метою забезпечення вимог стандартів й експлуатаційних показників.

4.2.1. Стала Арнольда

Використовуючи сталу Арнольда, що була отримана з відомого виразу електромагнітної потужності, знаходять числове значення умовного об'єму активної частини

$$D_C^2 \cdot L_{обм} = C_A \cdot \frac{S_{ном}}{m \cdot f_1}, \quad (4.8)$$

де C_A – стала Арнольда, яка для трансформаторів з обмотками з міді дорівнює $(7,5...3,0) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{Дж}$, а для обмоток з алюмінію – $(10...4,5) \cdot 10^{-6} \text{ м}^3 / \text{Дж}$.

Далі, задавшись співвідношенням

$$\alpha_1' = \frac{L_{обм}}{D_C}, \quad (4.9)$$

яке в серійних трансформаторах дорівнює $\approx (3,5...5,0)$, визначають діаметр стрижня

$$D_C = \sqrt[3]{\frac{D_C^2 \cdot L_{обм}}{\alpha_1'}}, \quad (4.10)$$

а користуючись знову (4.9), знаходять $L_{обм}$.

4.2.2. Універсальна стала

За допомогою універсальної сталої знаходять одразу діаметр стрижня

$$D_C = C_{CT} \sqrt[4]{\frac{S}{\alpha \cdot \lambda \cdot f}}, \quad (4.11)$$

де C_{CT} – універсальна стала для трансформаторів, яка для обмоток з міді дорівнює $(3,6...3,2) \cdot 10^{-2} \text{ м} / \text{Дж}^{1/4}$, а для обмоток з алюмінію – $(4,3...3,8) \cdot 10^{-2} \text{ м} / \text{Дж}^{1/4}$;

$\alpha = \frac{L_c}{D} \approx (3,8...5,2)$ – відношення висоти стрижня до діаметра стрижня;

$\lambda = \frac{L_{окн}}{2D_c} \cong (0,75...1,02)$ – відношення ширини вікна трансформатора до діаметра стрижня.

За рекомендованим співвідношенням $L_{обм}$ до D_C (4.9) визначають висоту обмотки $L_{обм}$.

4.2.3. Рекомендація [1]

Для визначення діаметра стрижня автор використовує вираз

$$\frac{S_{EM}}{m} = \frac{S_{ном}}{m} = S' = U_1 \cdot I_1 = (w_1 \cdot u_\epsilon) \cdot I_1, \quad (4.12)$$

де S' – потужність на фазу (точніше на стрижень); $u_\epsilon = \pi \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot B_c \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot K_c$ – напруга (або ЕРС) витка.

З виразу для реактивної складової напруги короткого замикання (вивід зроблено на лекції по загальному курсу "Електричні машини" та [1])

$$u_p = \frac{7,9 \cdot S \cdot w_1 \cdot \pi \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p \cdot I_1}{u_\epsilon \cdot L_{обм}}, \quad (4.13)$$

знаходять струм I_1 .

Підставивши значення u_ϵ та струму I_1 в (4.12), визначають діаметр стрижня

$$D_c = 0,507 \cdot \sqrt[4]{\frac{S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot K_p}{f_1 \cdot u_p \cdot (B_c \cdot K_c)^2}}, \quad (4.14)$$

де S' – потужність на стрижень, кВ·А; $\beta = \pi \cdot d_{12} / L_{обм}$ – геометричний коефіцієнт; d_{12} – діаметр каналу розсіювання, м; $a_p = a_{12} + \frac{a_1 + a_2}{3}$ – приведена ширина каналу розсіювання, м; a_{12} – ширина каналу розсіювання (відстані між обмотками ВН і НН), м; a_1 і a_2 – відповідно радіальні розміри первинної і вторинної обмоток, м; $K_p \approx 0,94 \dots 0,96$ – коефіцієнт Роговського, що приводить складну картину магнітних силових ліній полів розсіювання у вікні трансформатора до ідеальної: усі магнітні силові лінії виходять з одного ярма і входять в інше, тобто мають напрямки паралельно осі стрижня; u_p – реактивна складова напруги короткого замикання, %; B_c – індукція в стрижні, Тл; K_c – коефіцієнт, що враховує заповнення сталлю площі кола стрижня з діаметром D_c .

Далі за співвідношенням $L_{обм} / D_c$ визначають висоту обмотки.

Слід відмітити, третій спосіб дозволяє точніше обрати потрібний діаметр, оскільки враховує величину реактивної складової напруги к.з., яка в основному визначає величину u_k .

Остаточно прийнятий для розрахунків D_c має відповідати числовому значенню стандартної шкали [1].

Опорний конспект по темі приведено на рис. 4.5

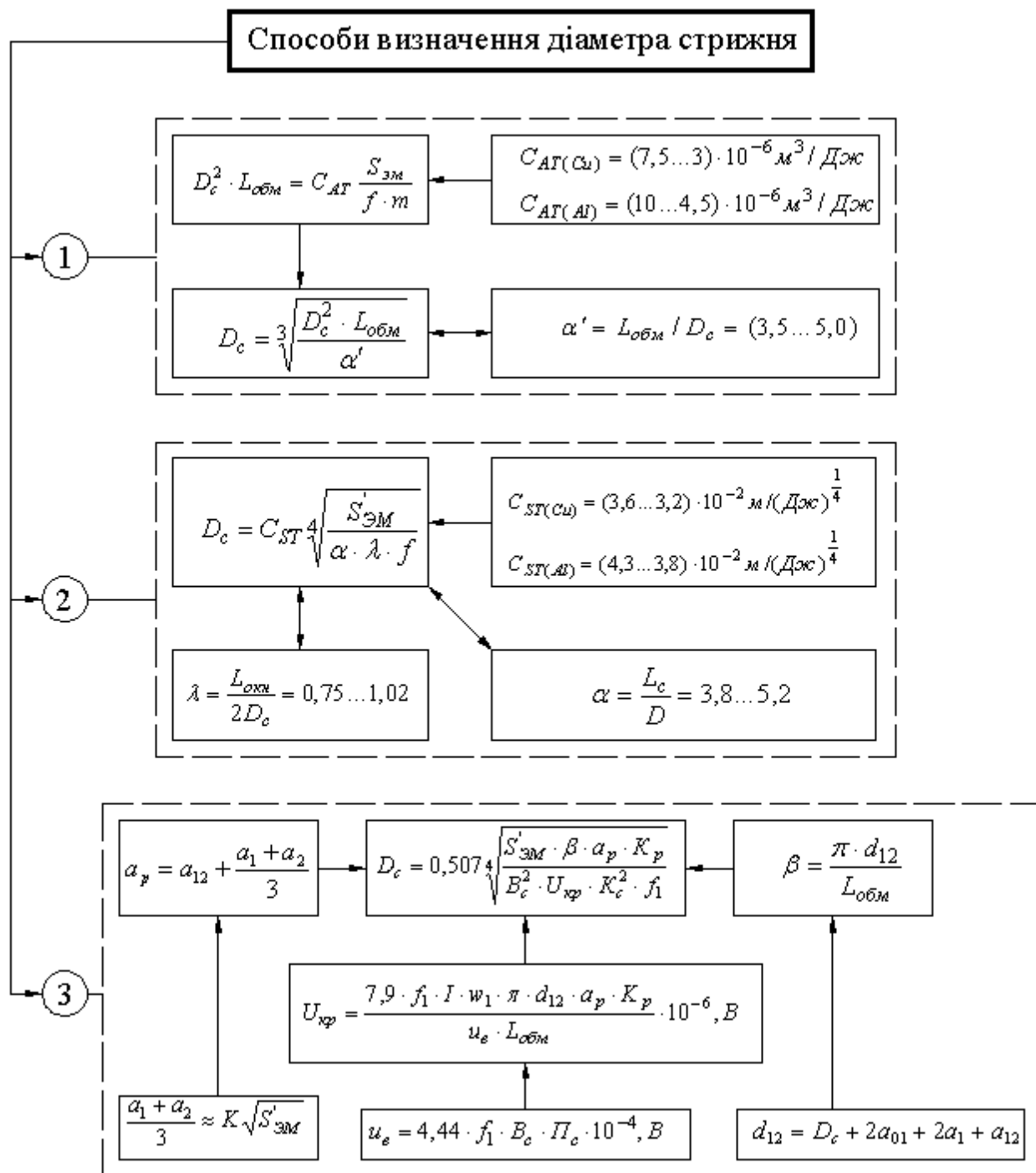


Рис. 4.5.

Розділ № 5. Конструкція сучасних трансформаторів

Вибравши основні розміри трансформатора (D_c і $L_{обм}$), необхідно визначитися з його конструкцією. У сучасних силових трансформаторах загального призначення розрізняють три конструктивні системи: магнітну, обмоток і допоміжну.

5.1. Конструкції магнітних систем

Магнітна система включає магнітопровід та елементи кріплення і виконує дві основні функції:

- концентрує (каналізує) магнітний потік з метою його збільшення в активній зоні перетворення енергії (стрижні), де розташовують обмотки;
- служить для розташування обмоток, що охоплюють стрижні та беруть участь в перетворенні енергії, для механічного кріплення обмоток і ряду допоміжних елементів конструкції трансформаторів.

Будь-який магнітопровід складається із стрижня (стрижнів) і ярма (ярем). По просторовому розташуванню стрижнів розрізняють магнітопроводи:

- просторові, рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.3;
- плоскі, рис. 5.4, рис. 5.5, рис. 5.6.

З метою зменшення втрат від вихрових струмів магнітопровід виконують з тонкої (завтовшки 0,27; 0,3; 0,35 мм) електротехнічної сталі (як правило, холоднокатаної).

По виготовленню розрізняють магнітопроводи: виті (рис. 5.3, рис. 5.6в); з пластин (рис. 5.1, рис. 5.2, рис. 5.4).

Магнітопроводи, що мають проміжок між стрижнями і ярмами (рис. 5.2) або між ярмами (рис. 5.1), називають стиковими.

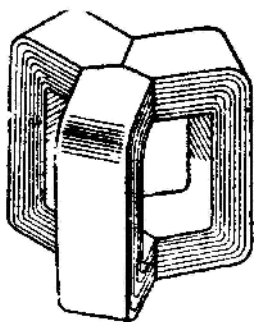


Рис. 5.1.

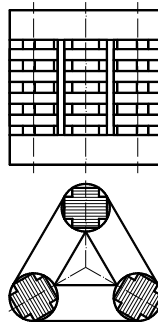


Рис. 5.2.

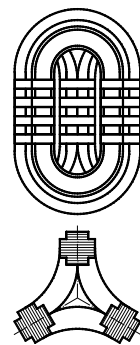


Рис. 5.3.

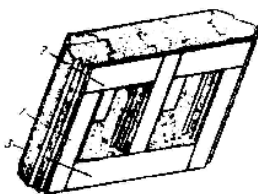


Рис. 5.4.

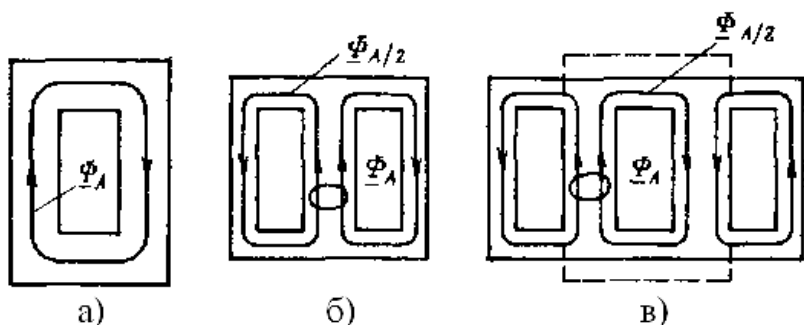


Рис. 5.5.

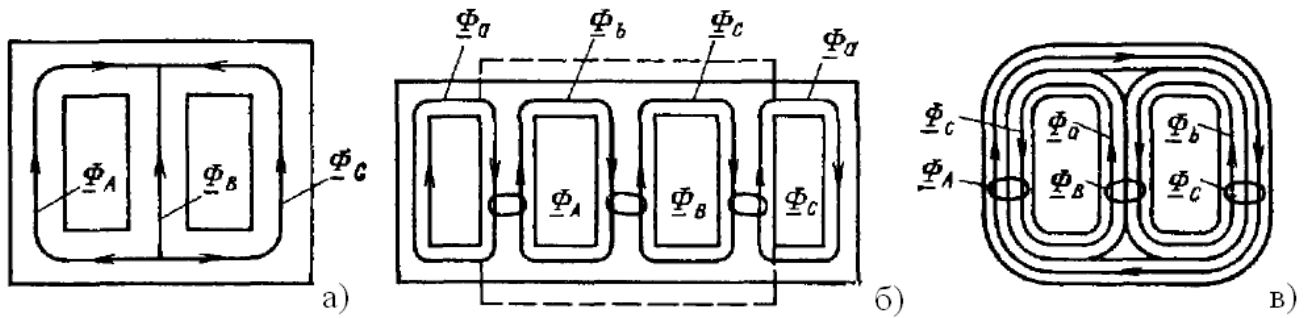


Рис. 5.6.

Найбільшого поширення набули трансформатори з плоскою стрижньовою конструкцією. Вони виконуються у всьому діапазоні потужностей, тоді як просторові виготовляються до потужностей ≈ 630 кВ·А.

Однофазні трансформатори з плоскою магнітною системою мають конструкцію магнітопроводу згідно рис. 5.5а. Для зниження висоти ярма однофазні трансформатори із зростанням потужності виготовляють з броньовою магнітною системою (рис. 5.5б) і навіть броньові з розщепленими обмотками, тобто збільшенням кількості стрижнів (рис. рис. 5.5в).

На рис. 5.6а і рис. 5.6в приведені найбільш поширені конструкції трифазних плоских тристрижневих трансформаторів, а на рис. 5.6б - броньового типу.

Стрижень магнітопроводу плоского трансформатора має в поперечному перерізі ступінчасту фігуру (рис. 5.7), що вписується в коло з діаметром D_c (діаметр стрижня - один з двох основних розмірів). Така форма перерізу стрижня має ряд переваг:

- забезпечує мінімальну витрату маси провідників обмотки в порівнянні з іншими формами перерізу стрижня, оскільки не потрібне збільшення довжини витка на плавні закруглення;
- рівномірно по довжині кола витка розподіляються радіальні електромагнітні зусилля;
- не порушується ізоляція провідників через відсутність різких перегинів;
- підвищується якість і продуктивність праці при виготовленні обмоток, оскільки натягнення провідників постійне.

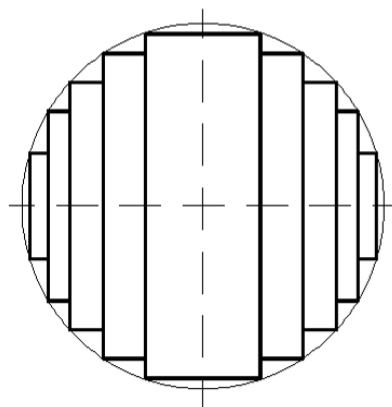


Рис. 5.7.

Разом з тим, ступінчаста конструкція стрижня вимагає виготовлення відмінних за розмірами листів електротехнічної сталі.

Кожен ступінь формується у вигляді пакету. Розміри пакетів кожного ступеня

залежать від діаметру стрижня D_c і кількості ступенів. Існують математично обґрунтовані рекомендації по вибору розмірів пластин пакетів, завдяки яким забезпечується найбільший коефіцієнт заповнення площі круга площею ступінчастої фігури, $K_{кр} = \Pi_{ст.ф} / \Pi_{кр}$ (рис. 5.8). Кількість ступенів збільшується із зростанням B_c (тобто потужності трансформатора), але обмежується, враховуючи вартість виготовлення.

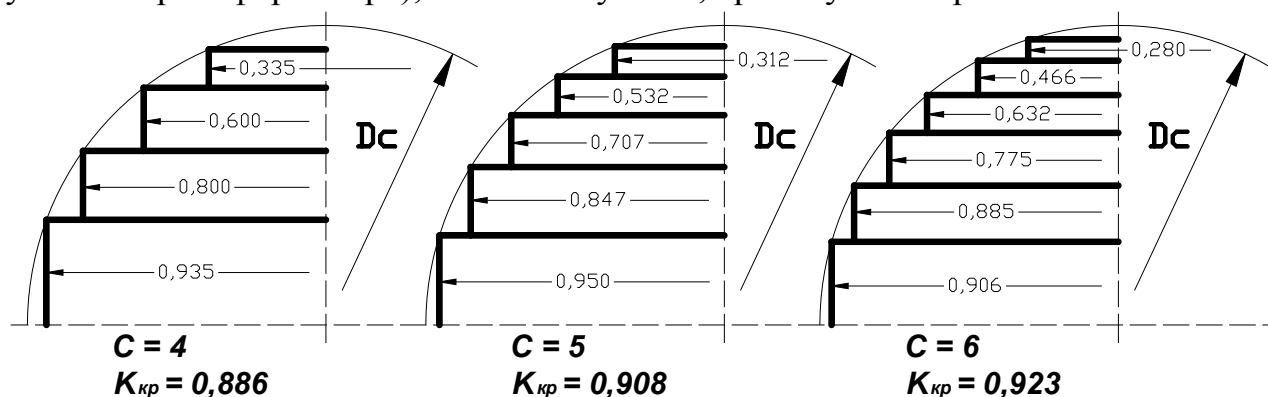


Рис. 5.8.

Ярма магнітопроводів виконують допоміжну роль, замикаючи шлях основного магнітного потоку стрижнів. Переріз ярем на (2...5)% більше перерізу стрижнів за рахунок об'єднання розмірів ряду пакетів (рис. 5.9).

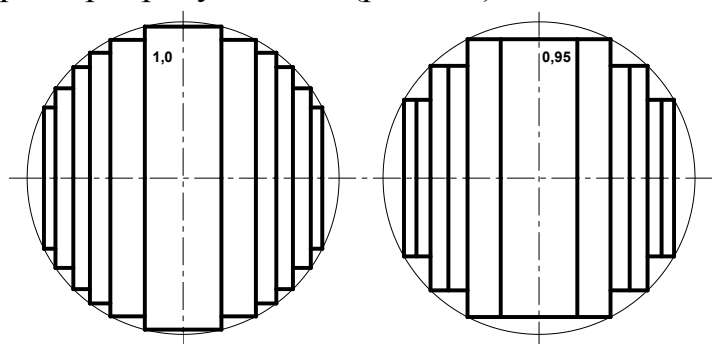


Рис. 5.9.

Пакети ступенів формуються шляхом пошарового укладання (шихтування) листів електротехнічної сталі. Послідовність (план) шихтування (укладання листів) повинна бути така, щоб подальший шар перекрив місця стику листів попереднього шару. Шар може складатися з однієї або двох пластин.

На рис. 5.10а показаний план шихтування для магнітопроводу з прямокутними стиками, на рис. 5.10б – з косими стиками і на рис. 5.10в – з комбінованими стиками.

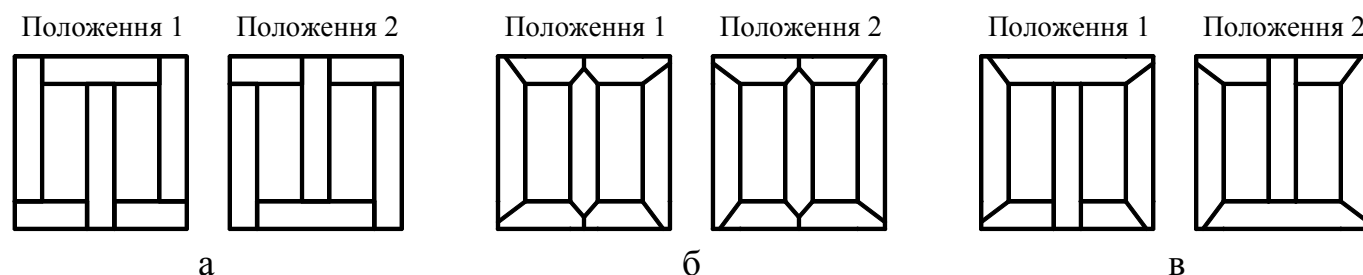


Рис. 5.10.

Застосування косих стиків дозволяє зменшити втрати в кутах магнітопроводу з холоднокатаних сталей, оскільки скорочує довжину магнітних силових ліній, на-

прям яких не співпадає з напрямом прокату сталі (рис. 5.11).



Рис. 5.11.

Формування магнітопроводів для стикових конструкцій показані на рис. 5.12.

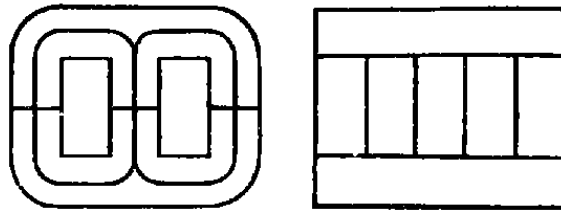


Рис. 5.12.

Процес виготовлення (шихтування) магнітопроводу з гарячекатаної сталі показаний на рис. 5.13а план шихтування - на рис. 5.10а. Аналогічно шихтується магнітопровід з холоднокатаної сталі, але без наявності шпильок, що проходять через пакети стрижнів і ярем.

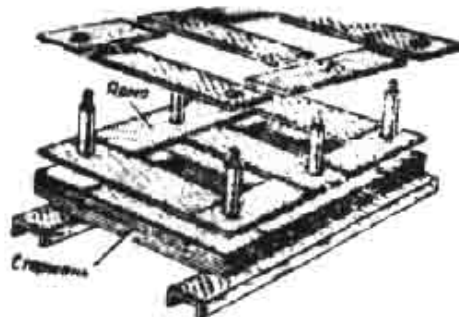


Рис. 5.13.

У сучасних трансформаторах застосовують для магнітопроводів холоднокатану сталь, а для усунення її «розпушування» і додання механічної жорсткості конструкції стрижня і ярем скріплюють.

У трансформаторах до 100 кВ·А листи сталі стрижнів спресовують за допомогою розклиновки: на стрижень одягають жорсткий бакелітовий циліндр (зазвичай, з обмотками), і в простір між ступінчастим стрижнем і циліндром забивають дерев'яні клини (з буку).

У трансформаторах потужністю понад 100 кВ·А і до 100000 кВ·А стрижні кріплять за допомогою бандажів із склострічки, які накладаються під час знаходження магнітопроводу під пресом. Відстань між бандажами (15...20)см.

При потужностях понад 100000 кВ·А застосовують кріплення бандажами у вигляді металевих поясів, рис. 5.14, де 1 - підкладка з електротехнічного картону, 2 - металевий пояс з металевою застібкою 4, яка на стрижні 5 не утворює к.з. контуру із стрічкою поясу внаслідок наявності ізоляції 3.

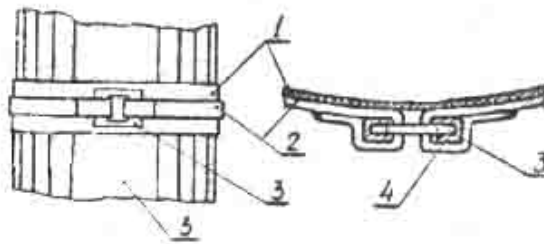


Рис. 5.14.

У всіх конструкціях магнітопроводів ярма пресуються за допомогою ярмових балок, що накладаються з обох боків на нижні і верхні ярма. Ярмові балки стягуються виносними шпильками, а починаючи з потужності 1000 кВ·А додатково застосовують хомути (із склострічки або металеві) для додання механічної жорсткості (рис. 5.15). При потужностях 6300 кВ·А і вище застосовують стягування ярмових балок за допомогою виносних шпильок посередині ярма замість хомутів (рис. 5.16). У трансформаторах 80000 кВ·А і вище краї ярмових балок стягують за допомогою металевих пластин замість шпильок (рис. 5.17).

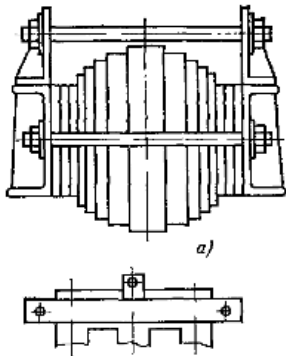


Рис. 5.15.

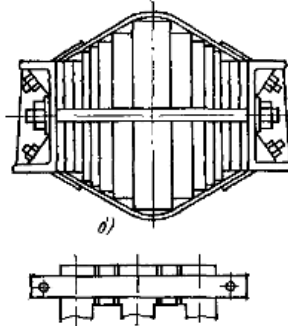


Рис. 5.16.

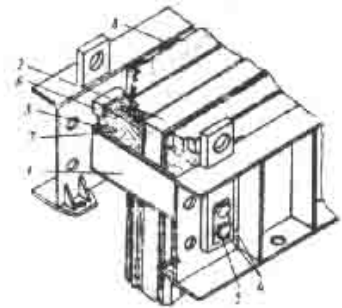


Рис. 5.17.

У експлуатації зустрічаються ще трансформатори з магнітопроводами з гарячекатаних сталей. Кріплення стрижнів і ярма з ярмовими балками здійснюється наскрізними шпильками (рис. 5.18), які ізолюються від сталі магнітопроводу (рис. 5.19).

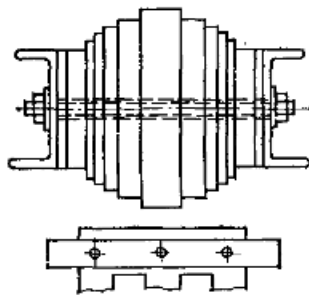


Рис. 5.18.

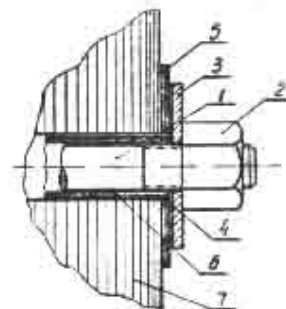


Рис. 5.19.

При транспортуванні магнітопроводу внаслідок недостатнього механічного зв'язку між листами верхніх ярма і стрижнями можливе порушення цілісності конструкції магнітопроводу під дією сил тяжіння стрижнів і нижніх ярма. Для посилення механічного зв'язку між верхніми і нижніми ярмами в трансформаторах 1000 кВ·А і вище застосовують: шпильки, що стягують верхні і нижні ярма і розташовані по середині вікна з обох боків магнітопроводу, або пресуючі пластини, що розташову-

ються як крайні пакети стрижнів та кріпляться до верхніх і нижніх ярмових балок.

Зібраний магнітопровід проходить випробування на відповідність вимогам і відсутність в ньому к.з. контурів. Повністю зібраний магнітопровід називають - кіст-
тяк.

Після випробування верхнє яро розшихтовують і на стрижні насаджують ра-
ніше виготовлені обмотки. Верхнє яро зашихтовують, відновлюють необхідні крі-
плення, потім здійснюють кріплення відведень обмоток, перемикача витків обмотки
ВН та інших необхідних конструктивних елементів.

5.2. Конструкції систем обмоток. Конструктивні типи обмоток

Система обмоток включає конструкцію обмоток і ізоляцію, що забезпечує
електричну і частково механічну міцність обмоток.

5.2.1. Загальні відомості

У двообмоткових трансформаторах за призначенням розрізняють дві обмотки
- високої (ВН) і низької напруги (НН), а в триобмоткових додається третя обмотка -
середньої напруги (СН).

По розташуванню на стрижні обмотки ділять на концентричні та чередувальні.
Концентричні обмотки виготовляють як суцільні циліндри, що охоплюють стрижень
(рис. 5.20). Як правило, обмотка НН розташовується ближче до стрижня (всередині),
а ВН - зовні.

Чередувальним обмоткам характерне виконання кожної з обмоток у вигляді
частин, що розміщуються уздовж осі стрижня та чергуються з частинами обмоток
інших напруг (рис. 5.21).

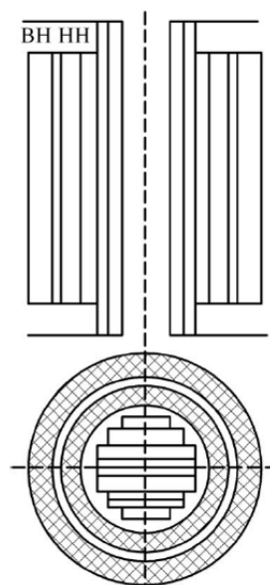


Рис. 5.20.

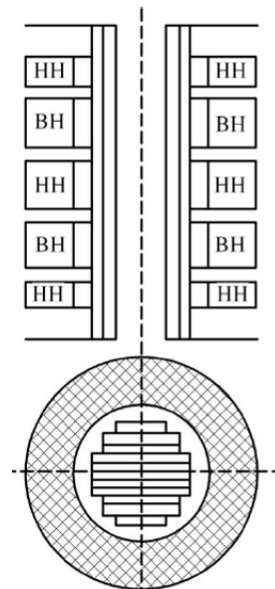


Рис. 5.21.

Сучасні силові трансформатори загального призначення виконують з концен-
тричними обмотками.

По напрямку намотування обмотки розрізняють: ліві і праві (рис. 5.22). Поєднання цих напрямів дозволяє заощадити витрату провідників при з'єднанні шарів однієї і тієї ж обмотки (рис. 5.23).

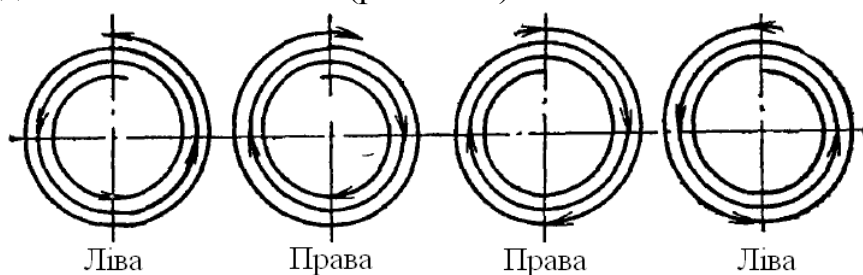


Рис. 5.22.

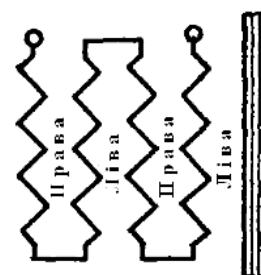


Рис. 5.23.

Витки обмоток виконують з проводів круглого або прямокутного перерізу. Необхідний переріз витка формують з певної кількості паралельних проводів, струмопровідним металом яких служить мідь або алюміній. Згідно вимогам стандарту ГОСТ 11677-75 обмотки трансформатора загального призначення потужністю до 16000 кВ·А включно - алюмінієві. Мідні провідники застосовують в трансформаторах загального призначення потужністю більше 16000 кВ·А та спеціального призначення (наприклад, копальневі, зварювальні і т.п.). Найбільш поширені марки проводів для трансформатора типу ТМ - ПБ і АПБ, мідні або алюмінієві з паперовою ізоляцією.

Відносно осі стрижня розрізняють розташування прямокутних провідників "плиском" (рис. 5.24а) і "на ребро" (рис. 5.24б). При цьому провідники повинні щільно прилягати один до одного, одна із сторін провідника паралельно осі стрижня, а друга – перпендикулярно їй (рис. 5.24а,б). Недопустиме намотування, як зображено на рис. 5.24в).

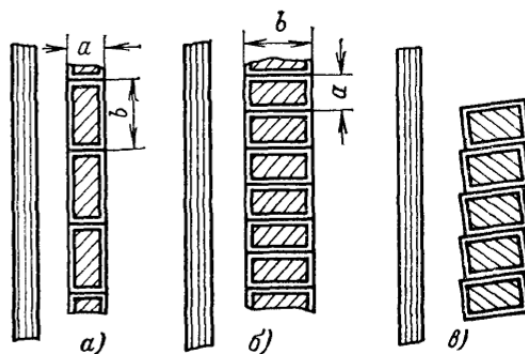


Рис. 5.24.

Залежно від формування і розташування паралельних провідників витка і самих витків розрізняють конструктивні типи обмоток:

- циліндрові з круглого або прямокутного провідників, одно- і багат шарові;
- гвинтові одно -, дво - і чотиреходові з прямокутного проводу;
- безперервні спіральні котушкові з прямокутного проводу.

У циліндрових обмотках паралельні провідники витка і витки розташовуються паралельно осі стрижня, утворюючи шари в межах заданої висоти обмотки. На рис. 5.25 показані фрагменти циліндрових обмоток з круглого проводу, а на рис. 5.26 з прямокутного проводу.

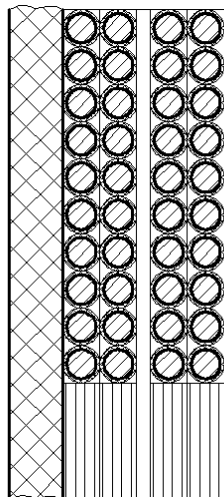


Рис. 5.25.

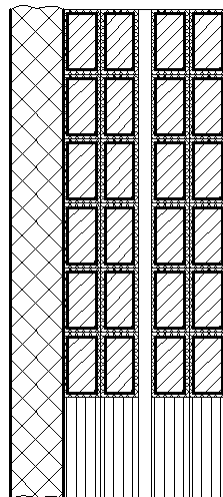


Рис. 5.26.

У гвинтових обмотках виток має великий переріз, що формується з 4-х і вище паралельних провідників; розташовують їх перпендикулярно осі стрижня. Таке розташування називають "хід", а обмотку - одноходова гвинтова (рис. 5.27). Витки або ходи можуть бути виконані з каналами між ними (рис. 5.27а) або спарені (рис. 5.27б). Між спареними витками (ходами) формують канал.

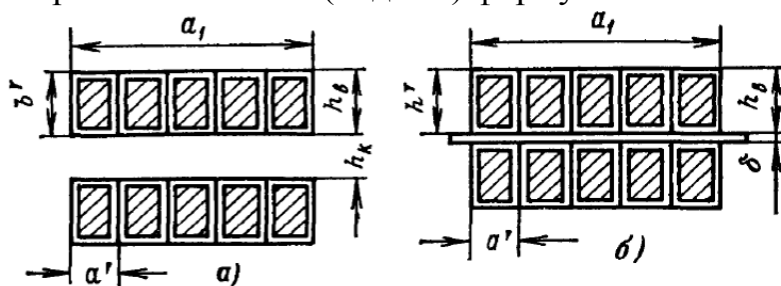


Рис. 5.27.

Якщо при розрахунках висота одноходової обмотки виходить менше прийнятої висоти (яка є основним розміром), то провідники витка ділять на дві частини. Таку обмотку називають двоходовою, виконану або з каналом між ходами (рис. 5.28а), або ходи спарюють (рис. 5.28б).

Аналогічно двоходовій виконують чотиреходові гвинтові обмотки.

У безперервних спіральних котушкових обмотках паралельні провідники витка і витки розташовують перпендикулярно осі стрижня, утворюючи котушку.

Котушки розділяють каналом (рис. 5.29) або спарюють.

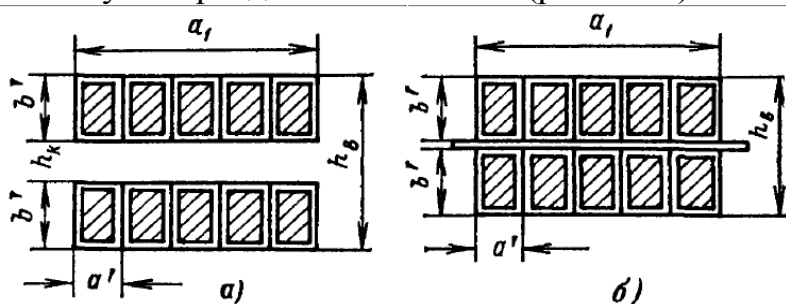


Рис. 5.28.

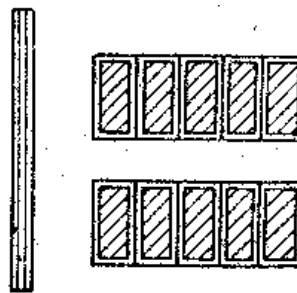


Рис. 5.29.

З метою поліпшення охолодження обмоток їх виконують з вертикальними (осьовими) каналами (рис. 5.30), або з горизонтально-вертикальними (радіально-осьовими) каналами (рис. 5.31), по яких переміщується охолоджуючий агент. Засто-

совують також поєднання осьових каналів з тупиковими радіальними каналами (рис. 5.32).

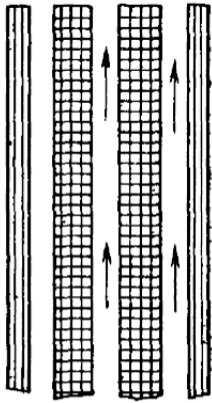


Рис. 5.30.

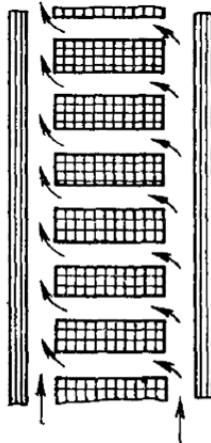


Рис. 5.31.

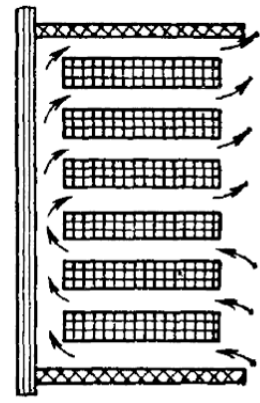


Рис. 5.32.

Осьові канали формуються за допомогою рейок, переріз яких показаний на рис. 5.33.

Радіальні канали утворюють за допомогою вертикальних рейок, що мають переріз (рис. 5.34) і прокладок (рис. 5.35).



Рис. 5.33.



Рис. 5.34.



На рейках кріплять прокладки, які розташовують між витками обмоток, формуючи радіальний канал для охолодження, рис. 5.35.

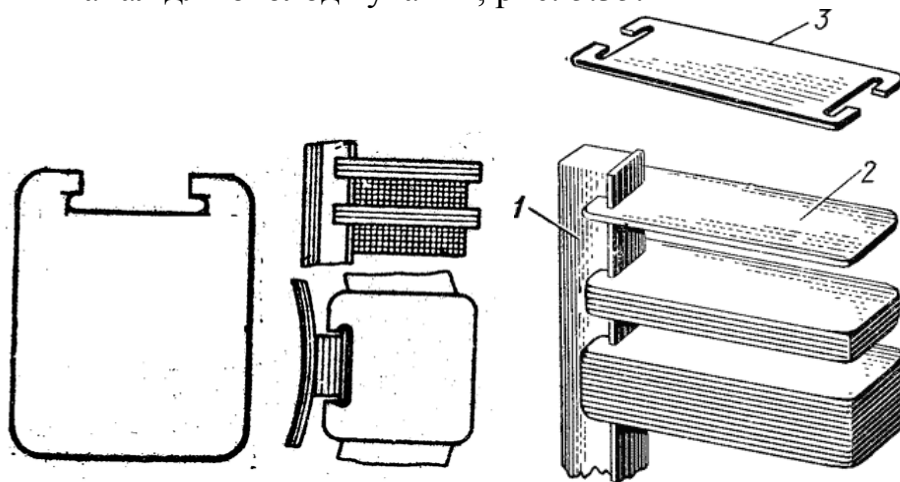


Рис. 5.35.

Кількість рейок, які кріплять до паперово-бакелітових циліндрів і прокладок визначають з міркування механічної міцності обмоток, які повинні витримувати електродинамічні зусилля в процесі експлуатації (особливо при раптових к.з.).

У циліндрових обмотках для виконання крайнього шару з потрібною висотою, якщо його висота менша, застосовують підмотку шпагатом або розгін витків за допомогою смуг з електрокартону, рис. 5.36.

Вирівнювання торцевих поверхонь обмоток, тобто додання їм горизонтальних площин, здійснюють за допомогою вирівнюючих кілець (з електрокартону), рис. 5.37.

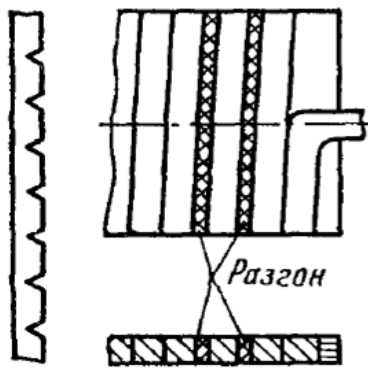


Рис. 5.36.

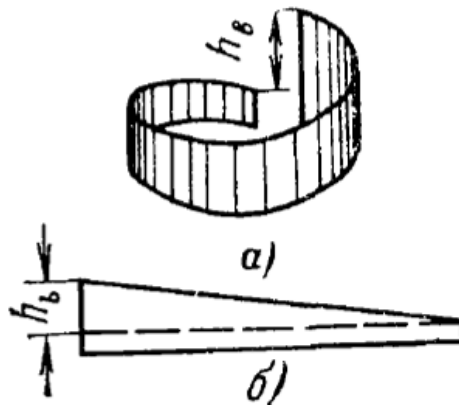


Рис. 5.37.

На горизонтальній поверхні торців обмоток накладають шайбу з виступами (рис. 5.38). Трансформаторне масло, що охолоджує обмотки, проходить між виступами з шайби 1 у внутрішні канали нижньої частини обмоток, а у верхній частині між прокладками — виходить. Шайба і виступи виготовляються з шарів електрокартону.

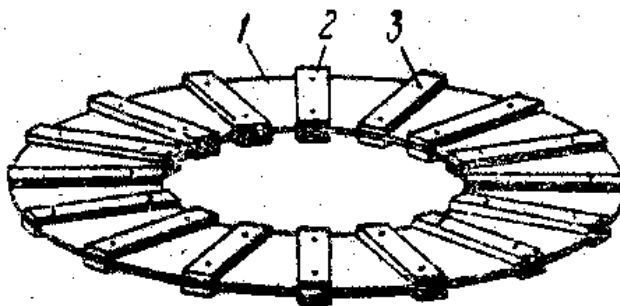


Рис. 5.38.

5.2.2. Конструкція циліндрової обмотки з круглого проводу

Циліндрові обмотки з круглого проводу застосовують для обмоток НН і ВН в трансформаторах потужністю до 630кВ·А, з напругою до 35кВ, струмом на фазу до 135А, перерізом витка - $(40...50) \text{ мм}^2$ з числом паралельних провідників не більше 8.

Обмотку розташовують частіше на жорсткому паперово-бакелітовому циліндрі, рис. 5.39. Паралельні провідники витка і витки укладають уздовж стрижня (рис. 5.25), пошарово. Шари витків між собою ізолюють за допомогою міжшарової ізоляції з кабельного паперу завтовшки 0,12 мм. Кількість шарів кабельного паперу визначають по подвійній напрузі шару — $U_{м.сл.} = 2 \cdot u_v \cdot w_{сл.}$. Міжшарова ізоляція декілька виступає з торців обмотки для запобігання можливим поверхневим розрядам і формуванню горизонтальних торцевих поверхонь обмоток.

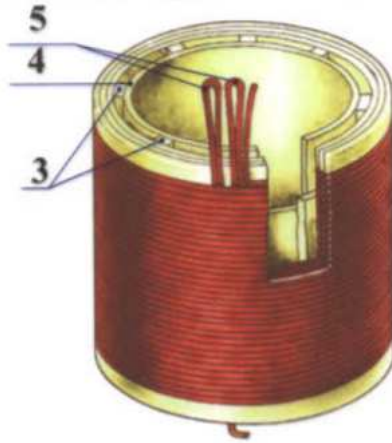


Рис. 5.39.

Для поліпшення охолодження і забезпечення питомого теплового потоку (не більш $1200...1400 \text{ Вт/м}^2$) в багатошарових обмотках виконують осьові канали, зазвичай один (для потужностей до $10000 \text{ кВ}\cdot\text{А}$), який ділить у співвідношенні шари приблизно $2/5$ до $3/5$. Осьові канали утворюють за допомогою рейок (рис. 5.32).

При регулюванні напруги ПБЗ обмотка ВН виконується з відпаюваннями $\pm 2...2,5\%$ номінальних витків.

Якщо обмотка ВН має номінальну напругу 20 і 35 кВ, то під внутрішню поверхню її розташовують екран, виконаний з алюмінієвого листа (що не створює к.з. контур навколо стрижня!) і гальванічно сполученого з початком фази обмотки ВН.

Необхідно пам'ятати, що при виконанні обмотки її висота на один виток більша внаслідок необхідності «заходу». В зв'язку з цим застосування цієї обмотки з великою кількістю паралельних провідників та невеликої кількості витків у шарі не бажане.

5.2.3. Конструкція циліндрових обмоток з прямокутного проводу.

Ці обмотки (як і з круглого проводу) застосовують для обмоток ВН і НН. Їх застосування обумовлене з одного боку обмеженням розмірів діаметрів круглих проводів і зростанням числа паралельних провідників, а з іншого - коефіцієнт заповнення вікна трансформатора міддю (алюмінієм) підвищується при прямокутних провідниках.

Циліндрові обмотки одно -, дво - і тришарові з прямокутного проводу застосовують в трансформаторах потужністю до $630 \text{ кВ}\cdot\text{А}$ як обмотки НН, з напругою до 6 кВ, фазним струмом до 800 А, перерізом витка до 300 мм^2 і паралельними провідниками не вище 4-х.

Конструкція двошарової обмотки з каналом приведена на рис. 5.40. Провідники витків (2 в паралель) розташовують на жорсткому паперово-бакелітовому циліндрі. Канал утворюється за допомогою рейок, а горизонтальну площину торців обмотки забезпечують вирівнюючим кільцем. Висота заходу рівна висоті витка (висоті 2-х провідників на рис. 5.40). Один шар (верхній) має праве намотування, а другий (нижній) - ліве.

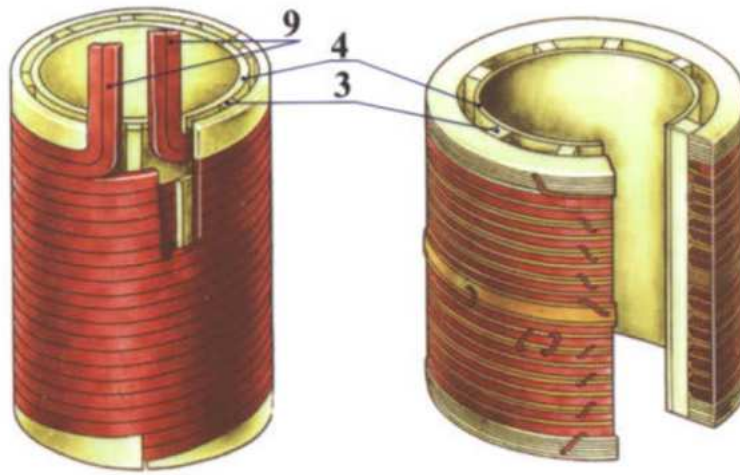


Рис. 5.40.

Аналогічну конструкцію мають багат шарові циліндричні обмотки (рис. 5.26), які застосовують як обмотки ВН і НН в трансформатор потужністю до 16000 кВ·А з алюмінієвими проводами та до 80000 кВ·А з мідними проводами, з напругою до 35 кВ, фазними струмами до 1200 А, перерізом до $\approx 500 \text{ мм}^2$ і числом паралельних провідників не більше 8. Велика кількість провідників витка в паралель обмежує застосування обмотки внаслідок малої кількості витків в шарі та зростання відстані на захід.

Міжшарову ізоляцію виконують з кабельного паперу завтовшки 0,12 мм, а кількість її шарів вибирають по подвійній напрузі шару.

Під внутрішньою поверхнею обмотки ВН при номінальних напругах 20 і 35 кВ розташовують екран для захисту обмотки від комутаційних і атмосферних перенапружень.

Розділення обмотки на канали визначають, виходячи з питомого теплового потоку обмотки.

У всіх циліндрових обмотках ширина осевого каналу залежить від його довжини. У трансформаторах до 10000 кВ·А його величина - (4...6) мм.

5.2.4. Конструкція гвинтових обмоток

Гвинтові обмотки застосовуються тільки як обмотки НН в трансформаторах потужністю від 100–160 кВ·А і вище на напругу до 35 кВ, з фазними струмами від (150...300) А і вище, переріз витка 70 мм^2 і вище, кількістю паралельних провідників у ході від 4-х і вище.

Розрізняють одно-, дво- і чотиреходові гвинтові обмотки. Кількість ходів визначають по числу, на яке ділять провідники витка. Ходи розташовують уздовж стрижня, а паралельні провідники перпендикулярно осі стрижня. Як приклади на рис. 5.41а показана схематично одноходова гвинтова обмотка, а на рис. 5.41б - двоходова.

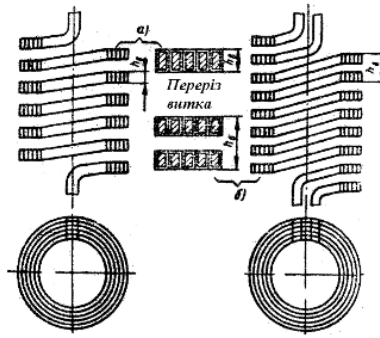


Рис. 5.41.

Конструктивно гвинтові обмотки (рис. 5.42) виконують на жорстких паперово-бакелітових циліндрах, до яких кріплять рейки (рис. 5.33а і б). На рейках розміщують між ходами прокладки з електрокартону, товщина яких визначає ширину радіального каналу. Відсутність прокладок дозволяє спарювати витки або ходи, розділяючи їх шайбами з електрокартону.

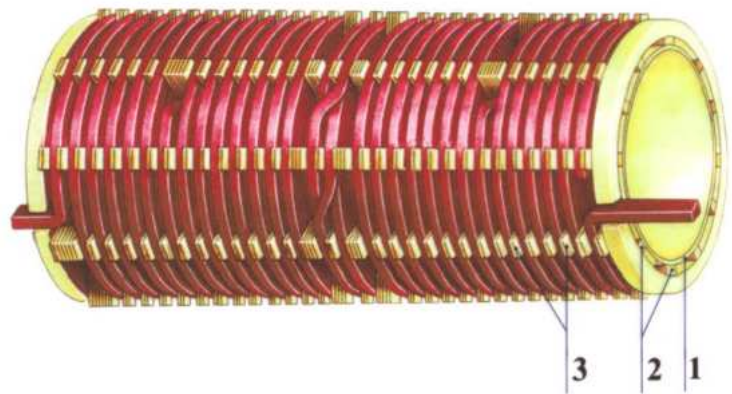


Рис. 5.42.

Мінімальна кількість провідників в ході 4, в кожному ході повинна бути однаковою кількістю провідників.

Оскільки довжина провідників в ході або витку та положення їх в магнітному полі розсіювання різні, то активні і реактивні (обумовлені потоком розсіювання обмоток) опори відрізняються. Віддаленіший від стрижня провідник має більший активний і реактивний (а значить і повний) опори, а для провідника, що лежить ближче до стрижня - менші. В результаті має місце нерівномірний розподіл струму і його густини між паралельними провідниками: провідники ближче до стрижня мають більші струми та їх густину, втрати і нагрів.

Для усунення цього небажаного ефекту застосовують транспозицію. Сенс транспозиції полягає в перекладанні (переміщенні) паралельних провідників так, щоб їх довжини та усереднене їх розташування в полі розсіювання були однакові.

У одноходових обмотках застосовують дві групові і одну загальну транспозиції як для парного числа провідників в ході (рис. 5.43а), так і для непарного (рис. 5.43б). Транспозиція здійснюється через 1/4 частину витків обмотки.

При груповій транспозиції здійснюють зміну місцезнаходження групи провідників витка, не змінюючи їх положення в самій групі щодо стрижня (рис. 5.43 і рис. 5.44а).

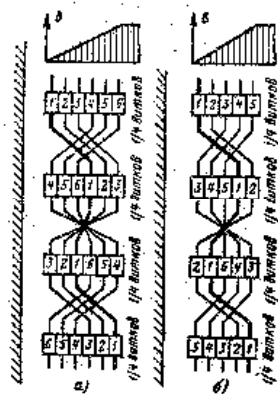


Рис. 5.43.

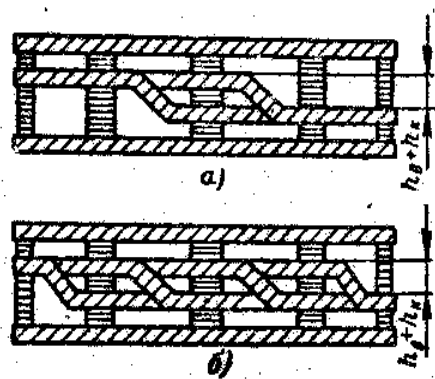


Рис. 5.44.

Загальна транспозиція (одна) здійснюється із зміною місць розташування, як груп провідників, так і провідників в самій групі (рис. 5.43 і рис. 5.44б).

Кожна транспозиція вимагає відстані по висоті обмотки, рівній висоті витка (ходу). Тому з урахуванням заходу, висота одноходової обмотки збільшується на $4=1+3$ витка.

У двоходових обмотках здійснюють рівномірну транспозицію - переміщення провідників з одного ходу в інший, рис. 5.45. Ці переміщення роблять через $1/n$ (або $1/2n$), а крайні ходи через $1/2n$ (або $1/4n$) частин витків обмотки, де n - кількість паралельних провідників у витку. У місцях переходу провідника з одного ходу в інший радіальний розмір обмотки збільшується на один радіальний розмір провідника (рис. 5.46), що повинно бути враховано при виборі ізоляційної відстані між обмотками ВН і НН.

У чотиреходових обмотках транспозицію виконують як в двоходових, кожні два ходи окремо.

Висоту двоходових і чотиреходових обмоток визначають з урахуванням висоти одного витка на захід.

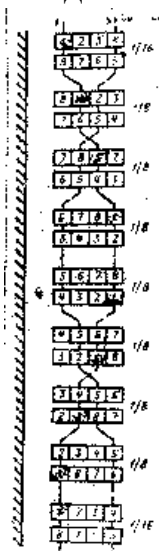


Рис. 5.45.

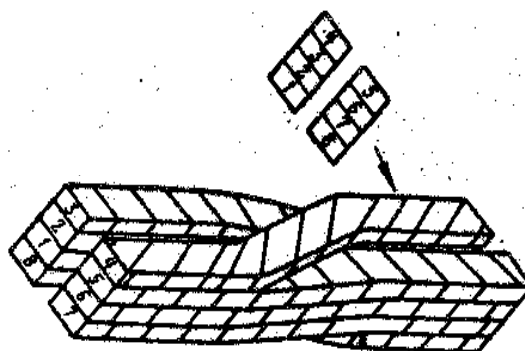


Рис. 5.46.

5.2.5. Конструкція безперервної спіральної катушкової обмотки

Ця обмотка називається безперервною через відсутність з'єднань і паянь при

виготовленні, навіть при формуванні котушок для регулювання кількості витків обмотки ВН. У порівнянні з попередніми типами обмоток безперервна спіральна котушкова обмотка (БСКО) технологічно складніша, оскільки вимагає перекладання половини котушок.

Застосовують БСКО як для ВН, так і для НН в трансформаторах потужністю від 100 кВ·А і вище, з напругою від 3 кВ до 220 кВ, перерізом витка від 6 мм² і вище, кількість паралельних провідників у витку до 3...5.

Виток БСКО формують з паралельних провідників, що розташовуються в радіальному напрямі. У тому ж напрямі мотають з витків котушку, рис. 5.47. Необхідну кількість витків обмотки розташовують в котушках, які мають, в загальному випадку, не однакову кількість витків. Розрізняють три типи котушок, що мають рівну кількість витків в кожному типі: регулювальні (для зміни кількості витків обмотки ВН з метою регулювання напруги, число їх кратне 4 при ПБЗ); основні (для укладання більшої частини витків обмотки, число їх парне); з посиленою ізоляцією (у обмотках ВН з номінальною напругою 20 і 35 кВ розташовують їх по дві котушки на початку і кінці обмотки).

Конструкція БСКО приведена на рис. 5.48, елементи конструкції і порядок виготовлення такі ж як і для гвинтових обмоток. Відмінність полягає тільки в процесі намотування і розташуванні витків.



Рис. 5.47.

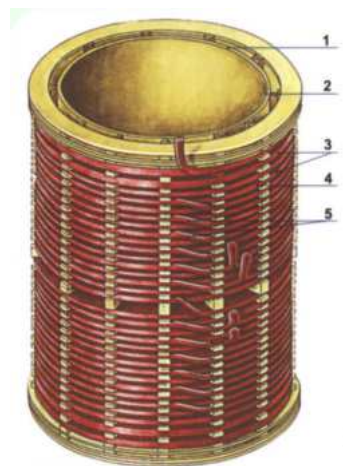


Рис. 5.48.

5.3. Ізоляція обмоток

Ізоляцію обмоток розрізняють на головну і повздовжню. Забезпечують достатній рівень електричної міцності ізоляції за допомогою рекомендацій, заснованих на випробувальних напругах.

5.3.1. Головна ізоляція

Під головною ізоляцією розуміють ізоляцію між струмоведучими частинами різних обмоток, між обмотками і заземленими елементами конструкції трансформатора (магнітопровід, бак і т.п.), рис. 5.49.

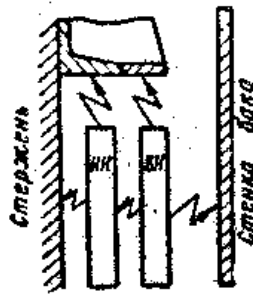


Рис. 5.49.

Головну ізоляцію обмоток забезпечують відповідними відстанями між обмотками і заземленими частинами. Конструктивно ці відстані формують за допомогою паперово-бакелітових циліндрів, рейок, бар'єрної ізоляції (рис. 5.50), кутових шайб (рис. 5.51), прокладок і клинів з ізоляційних матеріалів.

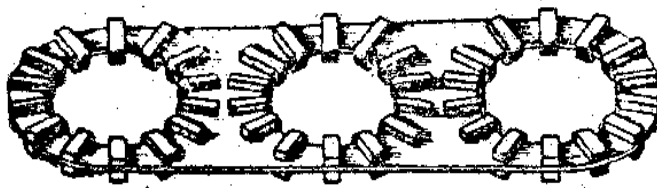


Рис. 5.50.



Рис. 5.51.

Для посилення ізоляції застосовують листи електротехнічного картону (наприклад, міжфазні перегородки). На рис. 5.52 показано відстані головної ізоляції і розташування елементів ізоляції для масляних трансформаторів з напругою до 35 кВ включно.

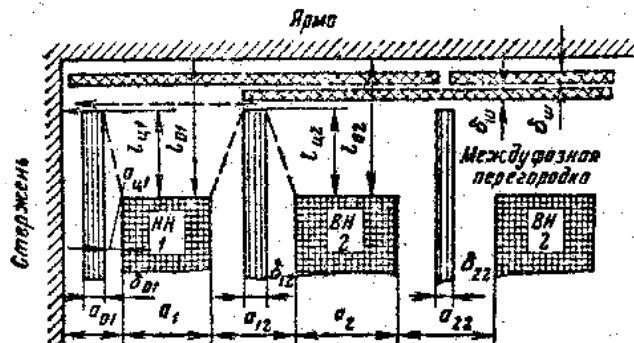


Рис. 5.52.

5.3.2. Повздовжня ізоляція

Повздовжня ізоляція - це ізоляція між струмоведучими частинами однієї і тієї ж обмотки. До неї відносять: міжшарову ізоляцію циліндрової обмотки з круглого (рис. 5.25) і прямокутного проводу (рис. 5.26); прокладки, що формують радіальні канали в гвинтових і котушкових обмотках (рис. 5.35); ізоляційні шайби, що розділяють спарені ходи в гвинтових (рис. 5.27б) та котушки (рис. 5.28б) у безперервних спіральних котушкових обмотках; ізоляцію самих провідників, відведень і відпаювань обмоток (рис. 5.53).

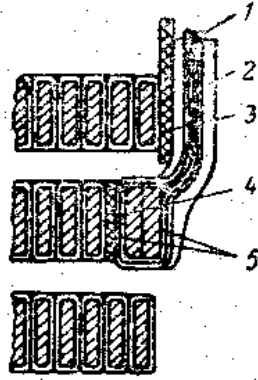


Рис. 5.53.

5.3.3. Захист обмоток від перенапруг

У експлуатації можливе виникнення перенапруг на вході обмоток з номінальною напругою 20 кВ і вище. Ці хвилі перенапруг виникають за рахунок комутації в мережах (комутуючі перенапруги) або попадання блискавки в проводи мережі (атмосферні перенапруги). Внаслідок великої крутизни фронту хвилі (еквівалентно високій частоті) основне падіння цієї напруги доводиться на початок або кінець обмотки фази. Такий розподіл цих напруг може призвести до пошкодження виткової ізоляції, а значить і всієї обмотки.

Для усунення можливого пошкодження внаслідок перенапруги в котушкових обмотках (БСКО) на початку і на кінці обмотки ВН при номінальній напрузі 20 і 30 кВ виконують по дві котушки з посиленою ізоляцією.

Другий спосіб захисту полягає в рівномірному розподілі перенапруги по висоті обмотки. З цією метою в циліндрових обмотках з класом напруги 35 кВ під обмоткою ВН розташовують екран з ізольованого алюмінієвого листу з сумарною товщиною 3 мм (рис. 5.54а). У зарубіжних трансформаторах з класом напруги 110 кВ застосовують 2 екрани (рис. 5.54б). Цю ж роль виконують у вітчизняних трансформаторах (з класом напруги більше 35 кВ) ємнісні кільця і екрануючі витки (рис. 5.54в). Вони не утворюють к.з. контур навколо стрижня!

На рис. 5.55 показана ізоляція і захист від перенапруг трансформатора з класом напруги 110 кВ.

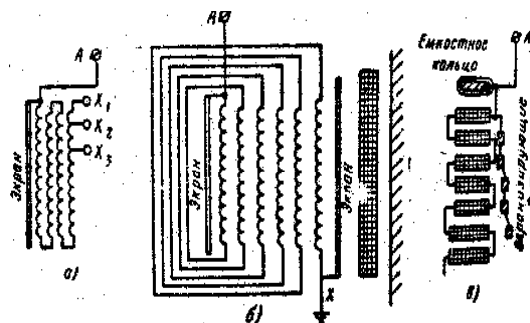


Рис. 5.54.

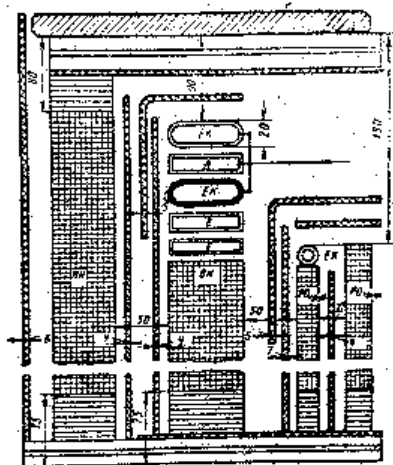


Рис. 5.55.

5.4. Конструкції елементів допоміжної системи

Допоміжна система конструкції включає ряд пристроїв, які служать:

- для підвищення надійної роботи шляхом збільшення запасу електричної, термічної і механічної міцностей;
- для створення сприятливих умов при експлуатації і монтажі;
- для інформації, контролю і захисту від пошкоджень при аномальних режимах.

На рис. 5.56 приведена конструкція трансформатора потужністю 1000 кВ·А, яка містить найпоширеніші елементи конструкції допоміжної системи.

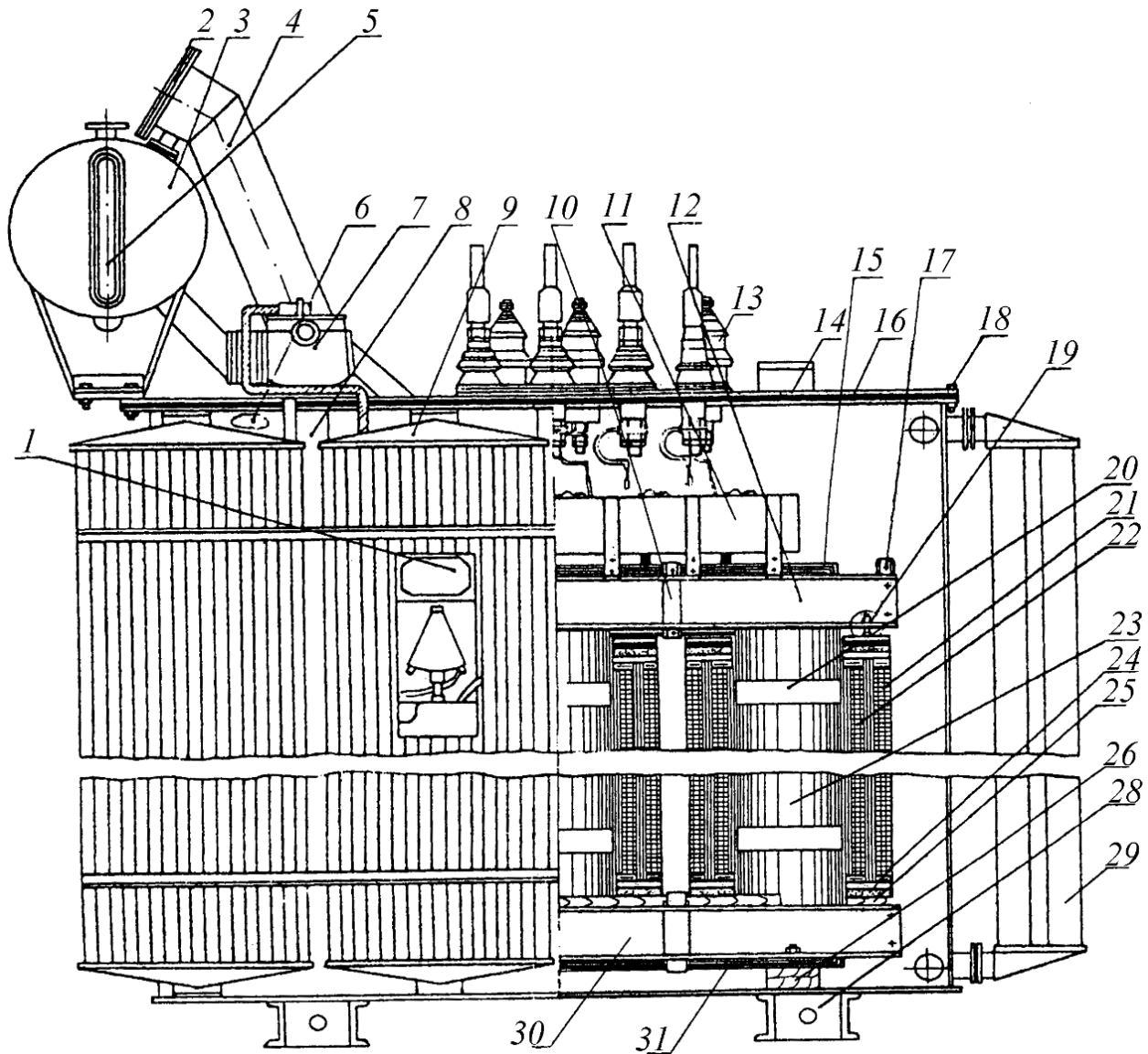


Рис. 5.56.

5.4.1. Елементи конструкції, що підвищують електричну міцність

В основному електрична міцність обмоток забезпечується ізоляційними матеріалами і проміжками. Вивід відведень (кінців) обмоток назовні здійснюють за допомогою ввідів 13.

Обмотки ВН 21 і НН 22 (як і вся активна частина) знаходяться в баку 8, який за допомогою бензомаслостійкої прокладки 16 і кріпильних болтів 18 герметично закривається кришкою 14. Бак повністю заповнений трансформаторним маслом 6.

Розширник 3 розташовують на кришці бака і призначають для:

- забезпечення повного заповнення бака маслом, об'єм якого зменшується при зниженні температури;

- зменшення «дзеркала» (поверхні) зіткнення трансформаторного масла з повітрям, оберігаючи масло від окислення і зволоження, зберігаючи його електричну міцність;

- «теплового дихання» - із збільшенням температури масла в баку його об'єм збільшується, і масло поступає в розширювач, який через повітряний фільтр сполучається з навколишнім середовищем.

Повітряний фільтр заповнений силікагелем і має масляний затвор, який перешкоджає безпосередньому контакту масла в розширнику з навколишнім повітрям і очищає повітря від пилу. Повітря поступає далі у фільтр, силікагелеве наповнення якого затримує вологу повітря, що поступає безпосередньо в розширник.

Усунення можливої наявності вологи в маслі бака здійснює термосифонний фільтр, який кріплять до стінок бака.

Конструкції і принцип дії повітряного фільтру і термосифонного фільтру пропонується вивчити студентам самостійно при виконанні курсового проекту.

5.4.2. Елементи конструкції, що підвищують термічну міцність

Охолодження обмоток і магнітопроводу здійснюється за допомогою трансформаторного масла, яким повністю заповнюють бак 8. До стінок бака кріпляться радіатори 29. Тепло (втрати) від поверхонь обмоток і магнітопроводу конвективним способом передається стінкам бака і радіаторів. З поверхонь бака і радіаторів тепло-віддача в навколишнє середовище здійснюється випромінюванням і конвекцією.

5.4.3. Елементи конструкції, що підвищують механічну міцність

До таких елементів конструкції, перш за все, слідє віднести: бандажі із скло-стрічки 20, які утримують стрижні в спресованому стані; ярмові балки 12 і 30 з хомутами 10, що скріплюють листи ярем; болти 19, які за допомогою пресуючих кілець стискають обмотки НН і ВН.

Для додання кістяку механічної міцності верхні ярмові балки з'єднують за допомогою шпильок або сполучають за допомогою пресуючих пластин.

Від переміщення активної частини в баку при транспортуванні використовують упорні в стінку бака болти 17, крім того, дерев'яні бруски 26 на дні бака.

5.4.4. Елементи конструкції, що сприяють регулюванню напруги і переміщенню трансформатора

Над верхнім ярмом кріпиться перемикач витків 11. При цьому здійснюється регулювання напруги без збудження (ПБЗ). Конструкція перемикача залежить від схеми з'єднання обмотки і номінальних струмів обмотки ВН. Рукоятку перемикачання витків розташовують або на кришці бака, або на його бічній стінці.

Для переміщення трансформатора по колії до місця установки до дна бака приварюють швелера, а до них поворотні каретки 28.

5.4.5. Елементи конструкції, що виконують інформаційну, контролюючу і захисну ролі

У ролі інформаційних пристроїв в трансформаторах застосовують маслопоказник 5, який показує рівень масла в розширювачі та сигналізуючий манометричний термометр, розташований нижче за табличку 1 з паспортними даними трансформатора.

У нижній частині стінки бака виконують пробку (звичайний болт з різьбленням) для контролю електричної міцності масла. При зниженні рівня електричної міцності масла трансформатор відключають. Заглушку на кришці бака і вентиль в нижній частині стінки бака сполучають з регенераційною установкою, проходячи через яку масло очищується і, повертаючись в бак, має достатню електричну міцність.

У разі порушення внутрішньої ізоляції (головної або подовжньої) можлива поява електричної дуги, яка, розігрівуючи масло, перетворює його в газоподібний стан. При цьому різко зростає тиск в баку, що може привести до його руйнування.

Для швидкого відключення трансформатора від мережі застосовують газове реле 7, а для зниження тиску масла в баку використовують викидну трубу 4, яка в нормальному режимі герметично закрита мембраною 2.

На рис. 5.57 приведена конструкція газового реле, яке сполучене патрубками з розширювачем і баком.

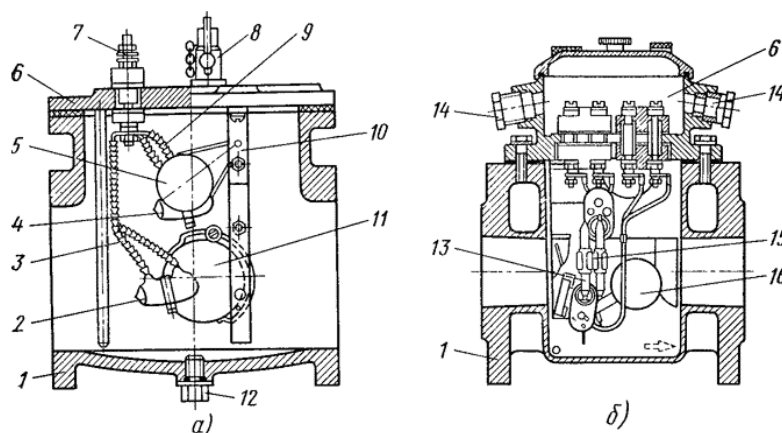


Рис. 5.57.

Реле повністю заповнюють маслом, воно має верхній і нижній скляні балончики, які заповнені повітрям і частково ртуттю і мають два контакти. При слабкому газовиділенні масло витісняється газом з верхньої частини реле, верхній балончик

опускається, і ртуттю замикаються контакти електричного кола, що сигналізують про газовиділення.

У разі бурхливого розкладання масла і утворення усередині бака газових бульбашок росте тиск. Це приводить до витіснення з бака в розширювач масла, що заздалегідь проходить через газове реле. При швидкостях руху масла 1,5...2 м/с нижній балончик повертається, ртуть в ньому замикає контакти електричного кола, що відключає трансформатор від мережі.

Одночасно видавлюється мембрана 2 викидної труби 4 (рис. 5.56), масло викидається назовні, знижуючи тиск масла в баку. Викид масла припиняється при охолодженні джерела нагріву.

Газове реле застосовують в трансформаторах потужністю від 1000 кВ·А і вище.

Особливо слід зазначити, що газове реле - це єдиний спосіб захисту трансформатора від "пожежі в залізі" (нагрів електротехнічної сталі здійснюється струмами в к.з. контурах магнітної системи).

У сучасних трансформаторах застосовують струмовий захист (по величині допустимого максимального струму), захист від несиметричних навантажень (диференціальний захист) і запобіжники у разі пробоя головної ізоляції на заземлені частини.

Детальніше розглянути конструкції газового реле (рис. 5.57), викидної труби, розширювача і їх розташування (рис. 5.58) пропонується самостійно при виконанні курсового проекту.

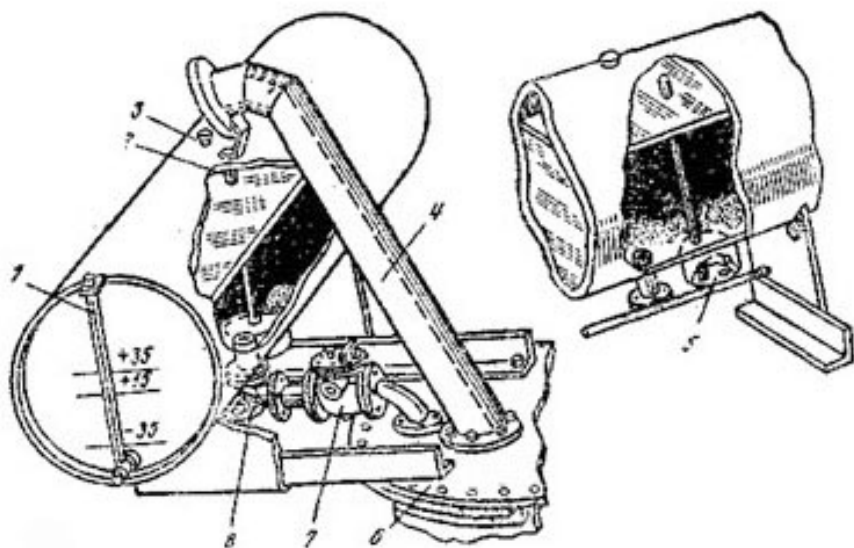


Рис. 5.58.

5.5. Розрахунок обмоток трансформатора

Розрахунок обмоток слідус після визначення основних розмірів (D_c – діаметру стрижня і $L_{обм}$ – висоти обмотки), ізоляційних проміжків (a_{01} – між стрижнем і обмоткою НН, a_{12} – канал розсіяння, або відстань між обмотками НН і ВН, a_{22} – між сусідніми обмотками ВН), а також відомої напруги на виток:

$$U_B = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f_1 \cdot B_c \cdot \frac{\pi \cdot D_c^2}{4} \cdot K_c, \quad (5.1)$$

яке має однакову величину для всіх обмоток трансформатора.

Метою розрахунку обмоток є визначення їх геометричних розмірів, втрат і питомих теплових потоків. Якісно спроектована обмотка повинна мати мінімально можливі розміри і питомий тепловий потік не вище $1200 \dots 1400 \text{ Вт/м}^2$. При цьому повинна бути забезпечена надійність в роботі.

5.5.1. Циліндрові обмотки

Методика розрахунку циліндрових обмоток дана на прикладах розрахунків обмоток НН з прямокутного проводу і ВН з круглого проводу, оскільки ряд пунктів розрахунку аналогічний.

Обмотка НН	Обмотка ВН
1. Визначення кількості витків обмотки	
$W_1 = \frac{U_{1\Phi}}{U_B},$ яке округляється до цілого числа з урахуванням можливої зміни індукції в стрижні.	$W_2 = \frac{U_{2\Phi}}{U_{B.Y}} = W_1 \cdot \frac{U_{2\Phi}}{U_{1\Phi}},$ які округляються до найближчого цілого числа
2. Уточнена величина напруги витка	2. Кількість витків в одній регулюючій ступені при ПБЗ
$U_{B.Y} = \frac{U_{1\Phi}}{W_1}.$	$w_p = 0,025 w_2 = 0,025 U_{2\Phi} / U_{B.Y}.$
3. Уточнена величина індукції в стрижні	3. Повна кількість витків в обмотці
$B_C = \frac{4 \cdot U_{B.Y}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \pi \cdot D_C^2 \cdot K_C}$	$\Sigma w_2 = w_2 + 2 \cdot w_p$
4. Орієнтовний переріз витка	
$P_{B1(2)} = \frac{I_{\Phi 1(2)}}{j_{1(2)}},$ де густину струму вибирають за рекомендаціями.	
5. Вибір марки та розміру проводу	
У трансформаторах загального призначення для обмоток використовують алюмінієві проводи, їх позначають:	
$АПБ \times n \times \frac{a \times b}{a' \times b'},$	$АПБ \times n \times \frac{d}{d'},$

Обмотка НН	Обмотка ВН
де a і ϵ – відповідно стандартні радіальний і осьовий розміри голого провідника; a' і ϵ' – розміри з ізоляцією із кабельного паперу; n – кількість провідників в паралель. Двостороння товщина ізоляції $2\delta=0,42(0,52), 0,55(0,62)$ мм. Кількість паралельних провідників витка слід брати від 1 до 4-8 Додатково необхідно відзначити: - переріз провідника слід брати з таблиці стандартних розмірів провідників; - рекомендують щоб $\epsilon/a \geq 2$; - кількість провідників витка в паралель рекомендують вибирати 40...60 мм² одного паралельного провідника; $n \cong \frac{\Pi_{B1}}{(40...60)};$ - необхідно визначитися з намотуванням обмотки "плиском" або "на ребро"; - при виборі максимального розміру проводу користуватися рекомендаціями, враховуючи нагрівання і додаткові втрати.	де d і d' – відповідно стандартизовані розміри діаметру голого і ізольованого проводу; n – кількість провідників в паралель. Двостороння товщина паперової ізоляції $2\delta=0,3(0,4), 0,72(0,82)$ мм. Зазвичай приймають 0,4 мм. Кількість паралельних провідників витка слід брати від 1 до 2 Діаметр і переріз провідника знаходять із таблиць сортаменту.
6. Уточнений переріз витка $\Pi_{B1(2)} = \Pi_{np1(2)} n_{1(2)},$ де Π_{np} – переріз одного провідника, а n – їх кількість в паралель.	
7. Уточнена густина струму $j_{1(2)} = \frac{I_{\Phi 1(2)}}{\Pi_{B1(2)}}.$	
8. Кількість витків в шарі $w_{CL1} = \frac{L_{об}}{n_1 \cdot \epsilon'} - 1$ <i>Приймається ціле число, найближче до меншого.</i> $w_{CL2} = \frac{L_{об}}{n_2 \cdot d'} - 1$ <i>Приймається ціле число, найближче до меншого.</i>	
9. Кількість шарів $n_{CL1} = \frac{w_1}{w_{CL1}}$ <i>Округляється до цілого більшого числа.</i> $n_{CL2} = \frac{\Sigma w_2}{w_{CL2}}$ <i>Округляється до цілого більшого числа.</i> У обмотках ВН слід вибрати схему регулювання витків і доцільно розподілити кількість витків по шарах	

Обмотка НН	Обмотка ВН
10. Вибір міжшарової ізоляції Визначається подвійна напруга шару $2U_{M.CЛ.1(2)} = 2U_{B.Y} \cdot w_{CЛ1(2)}.$ Виходячи з цієї напруги, по рекомендації [1] обирають кількість шарів ізоляційного кабельного паперу $n_{cl.uz}$ завтовшки 0,12 мм, тоді товщина міжшарової ізоляції $\delta_{m.cl1(2)} = n_{cl.uz1(2)} \cdot 0,12 \text{ мм}$	
11. Радіальний розмір обмотки $a_1 = n_{cl1} \cdot a'_1 + \delta_{m.cl}(n_{cl1} - 1) + a_{k1} \cdot n_{k1} \quad \left \quad a_2 = n_{cl2} \cdot d' + \delta_{m.cl}(n_{cl2} - 1) + a_{k2} \cdot n_{k2} \right.$ В обох виразах $a_{k1(2)}$ – ширина осевого каналу, $n_{k1(2)}$ – кількість каналів. На практиці $n_{k1(2)}=0$ або 1. Шари розподіляються одним каналом в співвідношенні 2/5:3/5. Котушку з меншою кількістю шарів розташовують ближче до стрижня. Ширина осевого каналу залежить від довжини [1], для потужностей до 10000 кВ·А $a_k=4...6$ мм.	
12. Уточнена висота обмотки $L_1 = (w_{CЛ1} + 1) \delta' \cdot n_1 \quad \left \quad L_2 = (w_{CЛ2} + 1) d'_2 \cdot n_2 \right.$	
13. Внутрішній діаметр обмотки $D'_1 = D_c + 2a_{01}$ де D_c - діаметр стрижня; a_{01} – ізоляційний проміжок між стрижнем і обмоткою НН.	$D'_2 = D''_1 + 2a_{12}$ Якщо обмотка НН гвинтова дво- або більш ходова, то замість a_{12} необхідно прийняти $a'_{12} = a_{12} + a'_1$, де a'_1 радіальний розмір одного проводу обмотки НН. Таким чином, враховується рівномірна транспозиція в обмотці НН. Якщо обмотка ВН має номінальну (лінійну) напругу 20 кВ і вище, то необхідно врахувати розміри екрана δ_e. Необхідно прийняти замість a'_1 $a'_{12} = a_{12} + \delta_e$ За наявності обох чинників прийняти $a'_{12} = a_{12} + a'_1 + \delta_e.$
14. Зовнішній діаметр обмотки $D''_1 = D'_1 + 2a_1 \quad \left \quad D''_2 = D'_2 + 2a_2 \right.$	
15. Маса обмоток $G_{1(2)} = c \cdot \pi \cdot D_{1(2)cp} \cdot \Pi_{61(2)} \cdot w_{1(2)} \cdot \gamma,$ де c – кількість стрижнів; $D_{1(2)cp} = \frac{D'_{1(2)} + D''_{1(2)}}{2}$ – середній діаметр обмотки; $\pi \cdot \gamma = k_\gamma$ – коефіцієнт, який дорівнює 28 для мідних провідників та 8,45 - для алюмінієвих.	

Обмотка НН	Обмотка ВН
16. Втрати в обмотках $P_{1(2)} = k \cdot j_{1(2)}^2 \cdot G_{1(2)},$ де $k=2,4$ для мідних проводів і $12,75$ - для алюмінієвих.	
17. Поверхня охолодження $P_{охл1(2)} = c \cdot k \cdot \pi \cdot (D'_{1(2)} + D''_{1(2)}) \cdot l_{1(2)} \cdot n',$ де $k \approx 0,95$ – коефіцієнт закриття охолоджуючих поверхонь; $n'=1$ – при відсутності осьових каналів в обмотці; $n'=2$ – при наявності одного каналу.	
18. Питомий тепловий потік $q_{1(2)} = \frac{P_{1(2)}}{P_{охл1(2)}} \leq 1200 \dots 1400 \text{ Вт} / \text{м}^2.$ Зазначимо, що величина $q_{1(2)}$ – визначає якість спроектованої обмотки.	
На закінчення слід зазначити переваги циліндрових обмоток: - мають вище коефіцієнт заповнення вікна металом обмоток в порівнянні з іншими типами обмоток; - прості і технологічні у виготовленні. Разом з тим, циліндрові обмотки володіють меншою механічною міцністю і мають більш складні умови охолодження.	

5.5.2. Проектування гвинтових обмоток

Гвинтові обмотки застосовуються тільки на стороні НН трансформаторів потужністю від 100 кВ·А і вище, зі струмом на стрижень від 150 А і вище, на напругу до 35 кВ, з перерізом витка від 15 мм² і вище, з числом паралельних провідників у витку від 4-х і вище, провідник прямокутного перерізу.

Нижче приведена послідовність розрахунку.

1. Кількість витків.

$$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{U_B}$$

де $U_B = 4,44 \cdot f_1 \cdot B_c \cdot K_c \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4}$ - заздалегідь розрахована напруга (ЕРС) витка.

Чисельне значення w_1 округляється до найближчого цілого числа. Округлена величина w_1 використовується в подальших розрахунках.

2 Уточнена напруга витка

$$U_B = \frac{U_{\phi 1}}{w_1},$$

яка використовується в подальших розрахунках.

3 Уточнена величина індукції в стрижні

$$B_c = \frac{4U_B}{4,44 \cdot f \cdot \pi \cdot D^2 \cdot K_c},$$

яка знаходиться в межах 1,55...1,65 Тл.

4 Вибір кількості ходів обмотки і попередньої висоти провідника ϵ

При проектуванні гвинтових обмоток необхідно, щоб висота обмоток була близька до розрахованої раніше висоти ($L_{обм}$ – основний розмір). В тих випадках, коли всі паралельні провідники витка розташовуються в радіальному напрямі (один хід) і мають радіальний канал, між витками (ходами), висота голого провідника повинна дорівнювати

$$\epsilon = \frac{l_{об}}{w_1 + 4} - h_k - 2\delta_{уз} \leq 18 \text{ мм},$$

тоді можливо виконання одноходової обмотки.

При цьому приймають $h_k = 4...6$ мм – розмір (висота) радіального охолоджуючого каналу, а число $(w_1 + 4)$ враховує одну висоту витка на захід і три висоти витка на виконання трьох транспозицій (дві групові і одна загальна); $2\delta_{уз} = 0,5$ мм – двостороння ізоляція провідника.

Цифра 18 – це найбільший розмір голого провідника з алюмінію чи міді, який наведений в таблиці стандартних розмірів провідників.

У разі невиконання попередньої умови, тобто розрахункова висота обмотки з прийнятою висотою провідника менше висоти $L_{обм}$ (основний розмір), то провідники витка ділять по висоті на дві частини (два ходи). Якщо між напіввитками і витками (ходами) передбачені радіальні охолоджуючі канали, то висота голого провідника ходу (напіввитка)

$$\epsilon \cong \left(\frac{l}{w_1 + 1} - 2h_k \right) \cdot 0,5 - 2\delta_{уз} \leq 18 \text{ мм},$$

тобто $2\epsilon \leq 36 \text{ мм}$.

У разі спарених ходів витка

$$\epsilon \cong 0,5 \cdot \left(\frac{l}{w_1 + 1} - h_k - \delta_{np} \right) - 2\delta_{уз} \leq 18 \text{ мм},$$

де $\delta_{np} = 1 - 1,5 \text{ мм}$ – ізоляційна прокладка між ходами; у виразах додана одиниця до кількості витків з урахуванням заходу.

Можливе застосування чотириходової гвинтової обмотки, в якій можна спарювати по два ходи, чотири ходи і т.д. Якщо застосовувати чотириходову обмотку з каналами між витками і ходами, то висота голого провідника ходу

$$\epsilon = 0,25 \cdot \left(\frac{l}{w_1 + 1} - 4h_k \right) - 2\delta_{уз} \leq 18 \text{ мм}.$$

Прийнята для подальших розрахунків кількість ходів витка повинна задовольняти одній з вимог щодо висоти голого провідника, приведених вище. При цьому уточнена висота обмотки з вибраними розміром провідника і розташуванням каналів повинна бути близький до $L_{обм}$ (основному розміру).

Нижче наводяться, як приклад, послідовності розрахунків для одноходової обмотки з каналами між ходами (витками) (рис. 5.59) і двоходової обмотки з каналами між витками і спареними ходами (рис. 5.60).

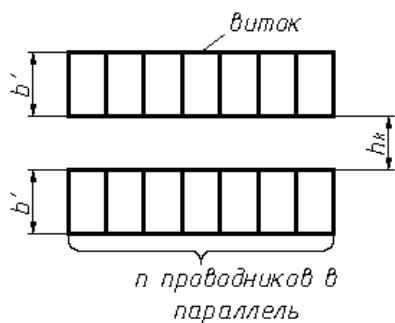


Рис. 5.59.

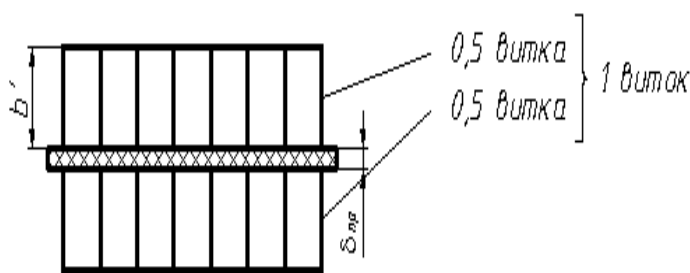


Рис. 5.60.

5 Попередній переріз витка

$$\Pi_{B1} = \frac{I_{\phi 1}}{j_1} \text{ мм}^2$$

де j_1 – густина струму, що приймається по рекомендаціях [1].

6 Кількість паралельних провідників у витку.

$$n \cong \frac{\Pi_{B1}}{(50..70)}.$$

Округляється до найближчого цілого числа, але повинно бути $n \geq 4$	Округляється до цілого парного числа, але повинно бути $n \geq 8$
---	---

7 Вибір розміру і марки проводу

Для трансформаторів загального призначення потужністю до 16000 кВ•А застосовують провідники з алюмінію, наприклад, марки АПБ.

При виборі розмірів голого провідника слід орієнтуватися на висоту в з п. 4, підбираючи його висоту, близьку до розрахованої вище з таблиць сортаменту, а радіальний розмір повинен бути $a/v \leq 0,5$. Приймавши конкретні розміри a і v переріз провідника Π_{np1} , записують прийняту марку провідника та його розміри. Наприклад:

$$\text{АПБ} \times n \times \frac{a \times v}{a' \times v'},$$

де $a' = a + 2\delta_{uz}$, $v' = v + 2\delta_{uz}$ - розміри провідника з ізоляцією.

8 Уточнення перерізу витка

$$\Pi_{e1} = \Pi_{np1} \cdot n.$$

Якщо уточнений перетин витка відрізняється від розрахованого заздалегідь більше 5%, то слід змінити число паралельних провідників у витку, виконуючи проте умову п. 7.

9 Уточнена густина струму

$$j_1 = \frac{I_{\phi 1}}{\Pi_{e1}}$$

10 Уточнення висоти обмотки

$L_1 = v'(w_1 + 4) + K_{yc} \cdot h_k(w_1 + 3),$	$L_1 = 2v'(w_1 + 1) + K_{yc}[h_k w_1 + \delta_{np}(w_1 + 1)],$
--	--

де $K_{yc} = 0,94...0,96$ – коефіцієнт, що враховує усадку обмотки після сушки і опресовування; $\delta_{np} = (1...2)$ мм – ізоляційна прокладка між ходами.

11 Радіальний розмір

$a_1 = a' \cdot n,$	$a_1 = a' \cdot n/2,$
---------------------	-----------------------

де n – число паралельних провідників витка.

12 Внутрішній діаметр обмотки

$$D_1' = D_c + 2a_{01},$$

де D_c – діаметр стрижня (основний розмір); a_{01} – ізоляційний проміжок між стрижнем і внутрішньої поверхнею обмотки НН (визначається по випробувальній напрузі обмотки НН і потужності трансформатор [9.5. 11]).

13 Зовнішній діаметр обмотки

$$D_1'' = D_1' + 2a_1,$$

14 Маса обмоток НН

$$G_1 = c \cdot \gamma \cdot P_{\phi 1} \cdot \frac{\pi \cdot (D_1' + D_1'')}{2} \cdot w_1, \text{ кг}$$

де c – кількість стрижнів; γ – питома густина металу обмотки ($\gamma_{cu} = 8900 \text{ кг/м}^3$, $\gamma_{al} = 2700 \text{ кг/м}^3$).

При розрахунках використовують формули:

- для мідних дротів – $G_1 = 28 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp.1} \cdot w_1 \cdot P_{\phi 1}$;

- для алюмінієвих дротів – $G_1 = 8,47 \cdot 10^3 \cdot c \cdot D_{cp.1} \cdot w_1 \cdot P_{\phi 1}$;

де $D_{cp.1} = \frac{D_1' + D_1''}{2}$ – середній діаметр ходу.

Всі розміри в системі СІ.

15 Втрати в обмотках

$$P_{обм.1} = K \cdot j_1^2 \cdot G_1 \text{ Вт},$$

де $K = 2,4$ – для мідних дротів обмотки, $K = 12,75$ – для алюмінієвих.

16 Поверхня охолодження обмоток

$$P_{охл.1} = c \cdot K_{закр} \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot a_1 \cdot n_{охл} \cdot w_1,$$

де $K_{закр} = 0,75 \dots 0,8$ – коефіцієнт, що враховує закриття охолоджуючих (радіальних) поверхонь ходів прокладками, які формують радіальні канали; $n_{охл}$ – число охолоджуючих поверхонь витка, для типів конструкцій обмотки, що розглядаються

$n_{охл} = 2$	$n_{охл} = 2$
---------------	---------------

17 Питомий тепловий потік

$$q_1 = \frac{K_{доб} \cdot P_{обм.1}}{P_{охл.1}} \leq (1200 \dots 1400) \text{ Вт/м}^2,$$

де $K_{доб} = 1,02 \dots 1,03$ – коефіцієнт, що заздалегідь задається та враховує додаткові втрати в обмотці.

ПРИМІТКА:

1) Найбільший розмір голого провідника рекомендується вибирати з урахуванням величини густини струму і питомого теплового потоку [1].

2) Ширину (висоту) радіального (горизонтального) каналу вибирати з урахуванням довжини [1].

3) Значення $q_1 < 950 \dots 1000 \text{ Вт/м}^2$ свідчить про надмірно розвинуту поверхню охолодження обмотки, нераціональне використання активних матеріалів, низьку якість спроектованої обмотки з природним масляним охолодженням.

18 По закінченню розрахунку обмотки слід дати схему транспозиції провідників, яка повинна забезпечити однакові опори паралельних провідників. Перевірка правильності виконаної транспозиції: сума місць провідників щодо стрижня для всіх провідників повинна бути рівною [1].

5.5.3. Проектування неперервних спіральних котушкових обмоток

Цей тип обмоток застосовується на сторонах НН і ВН, для потужностей від 100 кВ·А і вище, при напругах від 3 до 220 кВ, струмом на стрижень від 10 А і вище, при перерізах витка від $6,39 \text{ мм}^2$ і вище, з числом паралельних провідників у витку не більше 8.

Обмотка названа неперервною, оскільки не має паянь відведень від регульованих витків ступенів, виконується провідниками без розривів. В зв'язку з цим технологія виготовлення її складна: потрібне перекладання витків половини усіх котушок.

При проектуванні обмотки необхідно дотримуватися наступних вимог:

- загальна кількість котушок повинна бути парною;
- котушка з w_k витками розташовується в радіальному напрямі щодо стрижня;
- число видів котушок з різною кількістю витків в них – не більше чотирьох;
- число витків в котушці може бути цілим або дробовим, але в дробовому випадку кількість рейок по колу обмотки повинна бути рівний знаменнику дробу або кратним йому;
- робоча напруга однієї котушки не повинна перевищувати тих, що рекомендуються;
- для обмоток ВН з номінальною напругою 20 кВ і вище на краях обмоток повинні розміщуватися по дві котушки з посиленою ізоляцією витків для запобігання розряду між витками при дії імпульсних перенапружень;
- для отримання компактної і більш стійкої до електродинамічних зусиль обмотки, рекомендують вибирати провідники з більшими перерізами і висотою, розташовуючи їх «нарізом» («плеском»).

Нижче приводиться послідовність розрахунків обмоток для сторін НН і ВН.

Обмотка НН	Обмотка ВН
1. Число витків	
$w_1 = \frac{U_{\phi 1}}{U_{\phi}}$	$w_2 = \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi y}}$
де U_{ϕ} – заздалегідь розрахована напруга витка.	де $U_{\phi y}$ – уточнена при розрахунку обмотки НН напруга витка.
Чисельне значення w_1 і w_2 округляються до найближчого цілого числа; ці величини витків використовуються в подальших розрахунках.	

Обмотка НН	Обмотка ВН
2 Уточнена величина напруги витка $U_{\phi y} = \frac{U_{\phi 1}}{w_1}$	2 Кількість витків в регульовальній ступені при ПБВ $w_p = 0,025 \cdot w_2 = 0,025 \cdot \frac{U_{\phi 2}}{U_{\phi y}}$ Отримане значення округляють до найближчого цілого числа.
3 Уточнена індукція в стрижні $B_c = \frac{4U_{\phi y}}{4,44 \cdot f_1 \cdot \pi \cdot D_c^2 \cdot K_c}$	3 Повне число витків в обмотці ВН $\sum w_2 = w_2 + w_p$
4. Орієнтовний переріз витка $P_{\phi 1} = \frac{I_{\phi 1(2)}}{j_{1(2)}},$ де $j_{1(2)}$ – густина струму, величина якої залежить від матеріалу провідника, системи охолодження і потужності трансформатора.	
5. Кількість паралельних провідників у витку (в паралель) $n_{1(2)} = \frac{P_{\phi 1(2)}}{(40 \dots 70)},$ де $(40 \dots 70) \text{ мм}^2$ – орієнтовний переріз провідника. Отримані значення $n_{1(2)}$ округляти до цілого меншого числа.	

6 Вибір марки і розмірів провідників

Використовуючи таблицю сортаменту провідників, підбирають розміри голого провідника. Найбільший розмір ϵ голого провідника не повинен бути більша за рекомендованого [1], радіальний розмір a голого провідника вибирають з умови $\epsilon/a \geq 2$. Для вибраного розміру голого провідника визначають по таблиці його переріз $P_{np1(2)}$. Необхідно пам'ятати, що $P_{np1(2)} < (a \times \epsilon)$, а добуток $n_{1(2)} \cdot P_{np1(2)}$ повинен бути якомога ближче до раніше розрахованого орієнтовного перерізу витка $P_{\phi 1(2)}$.

Розміри ізолюваного провідника $a' = a + 2\delta_{uz}$ і $\epsilon' = \epsilon + 2\delta_{uz}$, де $2\delta_{uz} = 0,5 \text{ мм}$ - двостороння товщина ізоляції; провідники з посиленою ізоляцією для крайніх котушок $2\delta_{uz} = (1,5 \dots 2,0) \text{ мм}$.

В загальному випадку марка провідників залежить від металу провідника, від класу нагрівостійкості і матеріалів ізоляції. Наприклад, для силових масляних трансформаторів загального призначення приймають провідники марки АПБ (алюмінієвий провідник з паперовою ізоляцією).

Остаточний вибраний провідник і кількість їх у витку записують у вигляді

$$\text{Марка провідника} \times n \times \frac{a \times b}{a' \times b'}$$

Переріз одного провідника - P_{np}

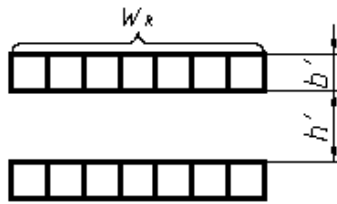
7 Уточнений переріз витка

$$P_{\phi 1(2)} = P_{np1(2)} \cdot n_{1(2)}$$

8 Уточнена величина густини струму

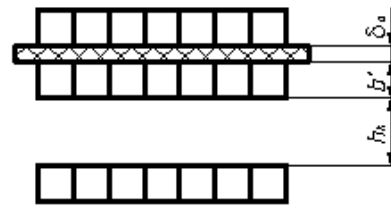
$$j_{1(2)} = \frac{I_{\Phi 1(2)}}{\Pi_{\epsilon 1(2)}}$$

9 Конструктивне розташування котушок



котушка-канал

Рис. 5.61.



спарена котушки-канал

Рис. 5.62.

10 Кількість котушок

$$n_{\kappa 1} = \frac{L_1 + h_{\kappa}}{b_1' + h_{\kappa}}$$

$$n_{\kappa 2} = \frac{L_2 + h_{\kappa}}{b_2' + 0,5(h_{\kappa} + \delta_{ш})}$$

де $h_{\kappa} = (4 \dots 6)$ мм – висота радіального каналу; $\delta_{ш} = 1$ мм – ізоляційна шайба (прокладка).

Отримане число котушок округляють до цілого парного числа; здійснюють перевірку напруги котушки:

$$U_{\kappa 1(2)} = w_{\kappa 1(2)} \cdot u_{\epsilon} \leq u_{\kappa.дон},$$

де $u_{\kappa.дон}$ – допустима напруга котушки [1]; $w_{\kappa 1(2)} = w_{1(2)} / n_{\kappa 1(2)}$.

11 Уточнена висота обмотки

Згідно рис. 5.61
$L_1 = \epsilon_1' \cdot n_{\kappa 1} + K_{yc} [h_{\kappa} (n_{\kappa 1} - 2) + h_{\kappa p 1}]$
Згідно рис. 5.62
$L_2 = \epsilon_2' \cdot (n_{\kappa 2} - 4) + 4\epsilon_{2yc}' + K_{yc} [h_{\kappa} (n_{\kappa 2} / 2 - 2) + h_{\kappa p}]$

де $K_{yc} = (0,94 \dots 0,96)$ - коефіцієнт, що враховує усадку ізоляції після сушки і опресовування обмотки; $h_{\kappa p 1(2)}$ - висота каналу в місці розриву обмотки і розміщення регулювальних витків; вибирається з умови електричної міцності [1].

12 Розподіл витків по котушках

В загальному випадку витки розподіляються по котушках: регулювальним, які забезпечують необхідні ступені регулювання напруги (витків); основним; з посиленою ізоляцією.

Розподіл здійснюють методом підбору, починаючи з регулювальних. Основна вимога – радіальні розміри регулювальних котушок і котушок з посиленою ізоляцією повинні бути рівні або менше радіальних розмірів основних котушок. Наприклад, після розподілу мають:

N регулювальних котушок по n_p витків – $N \cdot n_p$ витків;

M основних котушок по m_o витків – $M \cdot m_o$ витків;

U котушок з посиленою ізоляцією регулювальних котушок по u_y витків – $U \cdot u_y$ витків.

Всього: котушок – $N + M + U = n_k$; витків $N \cdot n_p + M \cdot m_o + U \cdot u_y = \sum w_2$

На рис. 5.63 показано розміщення котушок для наведеного прикладу.

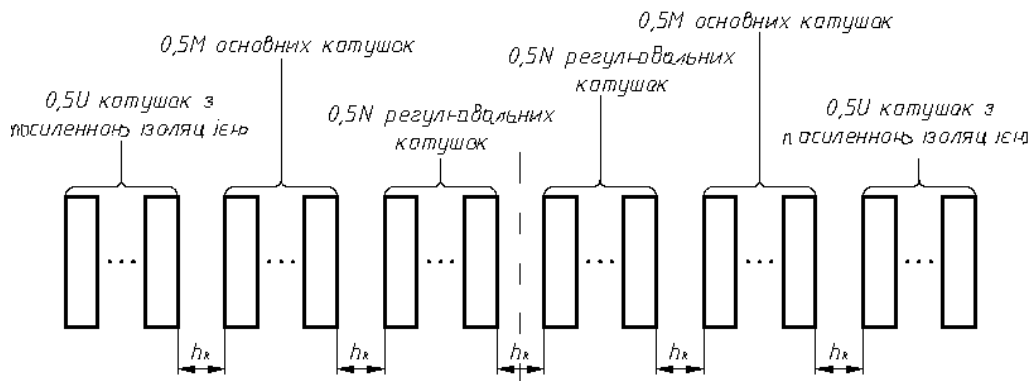


Рис. 5.63.

13 Радіальний розмір кожного типу котушок

$$a_{k1(2)i} = a'_{1(2)} \cdot n_{1(2)} \cdot w_{k1(2)i},$$

де $w_{k1(2)i}$ – кількість витків в котушках кожного типу.

14 Внутрішній діаметр обмотки

$$D'_1 = D_c + 2a_{01}.$$

$$D'_2 = D'_1 + 2a_{12}.$$

15 Зовнішній діаметр кожного типу котушок

$$D''_{1i} = D'_1 + 2a_{k1i}.$$

$$D''_{2i} = D'_2 + 2a_{k2i}$$

16 Маса котушок i -того типу

$$G_{1(2)i} = c \cdot \gamma \cdot \Pi_{s1(2)} \frac{\pi \cdot (D'_{1(2)} + D''_{1(2)})}{2} \cdot w_{k1(2)} \cdot n_{k1(2)},$$

де $n_{k1(2)}$ – кількість котушок одного i -того ж типу.

17 Повна маса обмоток

$$G_{обм.1(2)} = \sum_1^K G_{1(2)i}$$

18 Втрати в обмотках

$$P_{обм1(2)} = K \cdot j_{1(2)}^2 \cdot G_{обм1(2)},$$

де $K=2,4$ – для мідних провідників; $K=12,75$ – для алюмінієвих провідників.

19 Поверхня охолодження котушок кожного типу

$$\Pi_{охл1(2)i} = c \cdot K_{закр} \cdot \pi \cdot D_{ср1(2)i} \cdot a_{1(2)i} \cdot n_{охл1(2)} \cdot w_{k1(2)i},$$

де $K_{закр}=(0,75...0,8)$ – коефіцієнт закриття охолоджуючих поверхонь;

$D_{ср1(2)i} = 0,5(D'_{1(2)i} + D''_{1(2)i})$ – середній діаметр котушки типу i ; $n_{охл1(2)}$ – враховує число поверхонь охолодження котушки;

для рис. 5.61 – $n = 2$.

для рис. 5.62 – $n = 1$.

20 Повна поверхня охолодження обмоток

$$P_{охл.1(2)} = \sum_1^K P_{охл.1(2)i}$$

21 Питомий тепловий потік

$$q_{1(2)} = \frac{K_D \cdot P_{обм.1(2)}}{P_{охл.1(2)}} \leq (1200 \dots 1400) \frac{Bm}{m^2},$$

де $K_D = 1,02 \dots 1,03$ – коефіцієнт, що враховує додаткові втрати в обмотках.

Розділ № 6. Втрати і напруга короткого замикання

Втрати к.з. P_k і напруга к.з. U_k є важливими техніко-економічними показниками, які визначають як якість спроектованого трансформатора, так і його експлуатаційні властивості. Із цих причин стандартами на відповідні типи трансформаторів задаються певні числові значення P_k (у ватах або кіловатах) і U_k (у відсотках від номінальної напруги). Згідно вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 11677-85, встановлюються допустимі відхилення від заданих величин:

- для втрат к.з. – не більш плюс 10% у виготовленому трансформаторі, але не більш плюс 5% при проектуванні;

- для напруги к.з. – в межах плюс-мінус 10% у виготовленому трансформаторі, але в межах плюс-мінус 5% при проектуванні.

Тут доречно нагадати, що втрати к.з. – це втрати в обмотках трансформатора при протіканні по них номінальних струмів, тобто при номінальному навантаженні. Експериментально P_k визначають з досліду к.з. при подачі напруги U_k .

Задачею даної лекції є отримання аналітичних виразів, що дозволяють визначити розрахункові величини P_k і U_k в процесі проектування трансформатора.

6.1. Розрахунок втрат короткого замикання

Висловлена стандартом вимога до величин P_k обумовлена тим, що вони:

- визначають ступінь використання матеріалу провідників обмоток;
- впливають на величину ККД трансформатора;
- обумовлюють нагрівання обмоток;
- впливають на швидкість згасання перехідних процесів.

Втрати P_k складаються з основних і додаткових. Основні втрати обумовлені протіканням струмів безпосередньо по провідниках обмоток і відведень.

Додаткові втрати викликані:

- вихровими струмами в провідниках обмоток і відведень, зумовлені полями розсіяння від струмів навантаження цих провідників;
- вихровими струмами в конструктивних частинах трансформатора від полів розсіяння.

6.1.1. Основні втрати в обмотках

Розглянемо одну обмотку на одному із стрижнів, вважаючи відомими: номінальний струм I , А; густину струму j , А/мм²; переріз витка Π_g , мм²; повну довжину провідника обмотки L , м; питомий опір провідника ρ (мкОм·м) при 75°C.

Використовуючи відомий вираз, отримаємо основні втрати провідниках взятої обмотки.

$$P_{осн} = I^2 \cdot R, \quad (6.1)$$

замінюючи

$$I = j \cdot \Pi_{\epsilon}, \quad (6.2)$$

та

$$R = \rho \cdot L / \Pi_{\epsilon}, \quad (6.3)$$

отримаємо

$$P_{осн} = j^2 \cdot (\Pi_{\epsilon} \cdot L) \cdot \rho. \quad (6.4)$$

Помноживши і поділивши (6.4) на питому густину метала обмотки γ , $\text{кг}/\text{м}^3$, приймаючи

$$(\Pi_{\epsilon} \cdot L \cdot \gamma_0) = G_0 \quad (6.5)$$

та

$$\rho / \gamma_0 = K, \quad (6.6)$$

отримаємо

$$P_{осн} = K \cdot j^2 \cdot G_0 \cdot 10^{-12} \text{ Вт}, \quad (6.7)$$

де $K = 2,4$ – для мідного провідника ($\rho_{cu75} = 0,02135 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\gamma_{cu} = 8900 \text{ кг}/\text{м}^3$);
 $K = 12,75$ – для алюмінієвого провідника ($\rho_{al75} = 0,0344 \text{ мкОм} \cdot \text{м}$, $\gamma_{al} = 2700 \text{ кг}/\text{м}^3$);
 j – густина струму, $\text{А}/\text{м}^2$; G_0 – маса обмотки, кг .

З (6.7) витікає, що втрати в обмотках, які складають основну частину P_K залежать від:

- квадрата густини струму j ;
- маси обмотки G_0 ;
- матеріалу провідників обмотки, K .

При вибраному матеріалі провідників обмоток вирішальний вплив на P_K має густину струму. Це видно з (6.7), але можна показати, враховуючи $G_0 \sim 1/j$

$$P_{осн} \sim j^2 \cdot G_0 \sim j^2 \cdot 1/j \sim j. \quad (6.8)$$

Приведений вираз (6.8) не є строгою рівністю, оскільки зміна j приводить до зміни, за інших рівних умов, не тільки перерізу, але і довжини витка. Разом з тим, (6.8) показує зв'язок $P_{осн}$ з j , що слід використовувати при проектуванні.

Визначають масу всіх обмоток однієї і тієї ж напруги як

$$\sum G_0 = c \cdot \pi \cdot D_{cp} \cdot w \cdot \Pi_{\epsilon} \cdot \gamma_0 = K_{\gamma} \cdot c \cdot D_{cp} \cdot w \cdot \Pi_{\epsilon} \quad \text{кг} \quad (6.9)$$

де c – число активних (несучих обмотку) стрижнів трансформатора; D_{cp} – середній діаметр обмотки, маса якої визначається, м ; w – кількість витків обмотки; Π_{ϵ} – перетин витка, м^2 ; γ_0 – густина матеріалу провідників обмотки, $\text{кг}/\text{м}^3$; $K_{\gamma} = \pi \cdot \gamma_0 = 28 \cdot 10^3$ – для мідних провідників обмотки і $K_{\gamma} = 8,47 \cdot 10^3$ – для алюмінієвих.

Слід відмітити, що при розрахунку основних втрат в обмотці ВН з наявністю

регулювальних витків необхідно використовувати кількість витків, відповідних 100% (тобто номінальній напрузі). Саме ця величина втрат враховується в P_K , заданими стандартом.

Сумарні основні втрати в обмотках двохобмоточного трансформатора

$$P_{осн.обм} = P_{осн.1} + P_{осн.2} = K \cdot j_1^2 \cdot \sum G_{01} + K \cdot j_2^2 \cdot \sum G_{02}, \quad (6.10)$$

а з врахуванням (6.9)

$$P_{осн.обм} = K \cdot K_\gamma \cdot 10^3 \cdot c \cdot (D_{cp1} \cdot w_1 \cdot \Pi_{e1} \cdot j_1^2 + D_{cp2} \cdot w_2 \cdot \Pi_{e2} \cdot j_2^2). \quad (6.11)$$

Використовуючи відомі вирази для, $w = U_n / U_e$, $\Pi_e = I_n / j$ та $S' = U_n \cdot I_n$, підставляючи їх в (6.11), отримаємо

$$P_{осн.обм} = K \cdot K_\gamma \cdot 10^3 \cdot c \cdot \frac{S'}{U_e} \cdot (D_{cp1} \cdot j_1 + D_{cp2} \cdot j_2). \quad (6.12)$$

Вираз (6.12) показує, що із зростанням U_e втрати в обмотках знижуються, якщо залишається постійною густина струму у них. Це і зрозуміло, із зростанням U_e знижуються w обмотки, а значить і G_0 , що при $j = const$ приводить до зниження втрат в обмотках згідно виразу (6.7).

На початку проектування обмоток трансформатора можна, скориставшись заданою величиною P_K , орієнтовно визначити густину струмів в обмотках, чим істотно прискорити процес проектування трансформатора із заданою величиною P_K . Для цієї мети використовують вираз (6.12). Приймаючи

$$j_1 \cong j_2 \cong j_{cp}, \quad P_K \cdot K_\delta = P_{осн.обм} \quad \text{та} \quad (D_{cp1} + D_{cp2}) = 2 \cdot d_{12},$$

що достатньо близько до дійсності, і підставляючи в (6.12) одержуємо

$$j_{cp} = \frac{10^{-3}}{2K \cdot K_\gamma} \cdot K_D \cdot \frac{P_K \cdot U_e}{S_n \cdot d_{12}} \quad A/m^2, \quad (6.13)$$

де $K_j = 10^{-3} / (2K \cdot K_\gamma)$ – коефіцієнт, що враховує відмінність втрат P_K від $P_{осн.обм}$; $S_n = c \cdot S'$ – повна (номінальна) потужність трансформатора, Bm .

Вираз (6.13) можна представити у вигляді

$$j_{cp} = K_j \cdot K_D \cdot \frac{P_K \cdot U_e}{S_n \cdot d_{12}}, \quad (6.14)$$

де $K_j = 10^{-3} / (2K \cdot K_\gamma)$ – коефіцієнт, який рівний для мідних провідників $K_{jCu} = 0,746 \cdot 10^4$, а для алюмінієвих провідників – $K_{jAl} = 0,463 \cdot 10^4$.

Обчислені по (6.13) або (6.14) середні значення густини струму приймають при проектуванні обмоток як попередні. Уточнені значення густини струму обмоток можуть трохи відхилятися від прийнятих через дискретність розмірів і перерізів провідників для обмоток. В цих випадках рекомендують зберегти рівність $(j_1 + j_2) / 2 = j_{cp}$, що дозволить забезпечити необхідний рівень P_K і звужити діапазон пошуку варіанту проектного трансформатора із заданими параметрами – ліміте-

рами (обмежувачами).

До основних втрат відносять також втрати у відведеннях обмоток. Для трифазного стрижньового трансформатора приймають загальну довжину відведень:

- $L_{отв} \approx 7,5L$ – для з'єднання в зірку, м,
- $L_{отв} \approx 14L$ – для з'єднання в трикутник, м,

де L висота обмотки, м.

Масу металу відведень визначають по формулі

$$G_{отв} = L_{отв} \cdot \Pi_{отв} \cdot \gamma_{отв} \quad \text{кг}, \quad (6.15)$$

де $\Pi_{отв}$ – переріз відведення (зазвичай рахують $\Pi_{отв} = \Pi_{\phi}$), м^2 ; $\gamma_{отв}$ – питома густина металу відведень (зазвичай метал такий, як і провідників обмотки).

Втрати у відведеннях двохобмоточного трансформатора, аналогічно (6.7), рівні

$$P_{отв} = K \cdot (j_{отв1}^2 \cdot G_{отв1} + j_{отв2}^2 \cdot G_{отв2}) \quad \text{Вт}, \quad (6.16)$$

де K – коефіцієнт, залежний від матеріалу провідників відведень.

Повні основні втрати представляють суму

$$\sum P_{осн} = P_{осн.обм} + P_{отв}. \quad (6.17)$$

6.1.2. Додаткові втрати

В додаткові втрати включають:

- втрати в провідниках обмоток від вихрових струмів, викликані власними полями розсіяння від свого струму;
- втрати в провідниках від вихрових струмів, викликані полями розсіяння від сусідніх провідників;
- втрати від вихрових струмів в сталевих конструктивних елементах трансформатора від полів розсіяння, обумовленні струмом навантаження.

Додаткові втрати від вихрових струмів в провідниках обмоток залежать від розподілу поля розсіяння. В двохобмоточних трансформаторах поля розсіяння (його індукція) більше на краю обмотки, зверненим до каналу розсіяння a_{12} , рис. 6.1 і рис. 6.2. В зв'язку з цим великі додаткові втрати мають місце в провідниках, що лежать в зоні великих індукцій потоку розсіяння (ближче до a_{12}), а якнайменші – в провідниках самих видалених від сусідньої обмотки.

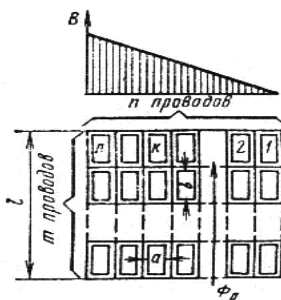


Рис. 6.1. Обмотка ВН з прямокутних провідників

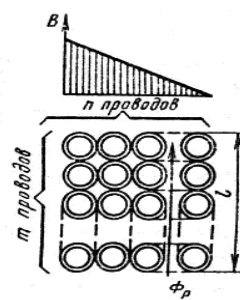


Рис. 6.2. Обмотка ВН з круглих провідників

Крім того, додаткові втрати в провідниках залежать від частоти, розміру перерізу провідників (a і b , або d), їх питомого електричного опору ρ , кількості провідників по висоті m і по ширині n (рис. 6.1 і рис. 6.2), тобто від положення щодо поля розсіяння.

Збільшення втрат в обмотках за рахунок додаткових втрат від полів розсіяння прийнято враховувати усередненим коефіцієнтом для всієї обмотки.

Для обмоток з прямокутних провідників середній коефіцієнт додаткових втрат

$$K_D = 1 + 1,73\beta^2(f/\rho)^2 \cdot a^4(n^2 - 0,2), \quad (6.18)$$

а для круглих провідників

$$K_D = 1 + 0,8\beta_1^2(f/\rho)^2 \cdot d^4(n^2 - 0,2), \quad (6.19)$$

де f – частота струму, Гц; ρ – питомий електричний опір метала обмотки мкОм·м;

$\beta = \frac{b \cdot m}{l} \cdot K_p$ – для прямокутного провідників, а для круглого – $\beta_1 = \frac{d \cdot m}{l} \cdot K_p$;

m, n – числа з рис. 6.1 і рис. 6.2; a, b, d, l – розміри з рис. 6.1 і рис. 6.2;

$K_p \approx 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma})$ – коефіцієнт приведення поля розсіяння ($K_p \approx 0,93 - 0,98$ – коефіцієнт Роговського); $\sigma = (a_{12} + a_1 + a_2)/(\pi l)$ – коефіцієнт.

Для частоти 50 Гц можна скористатися формулами:

- для мідних прямокутних провідників

$$K_{DCu} = 1 + 0,095 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (6.20)$$

- для мідних круглих

$$K_{DCu} = 1 + 0,044 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2; \quad (6.21)$$

- для алюмінієвих прямокутних провідників

$$K_{DAI} = 1 + 0,037 \cdot 10^8 \cdot \beta^2 \cdot a^4 \cdot n^2; \quad (6.22)$$

- для круглих алюмінієвих провідників

$$K_{DAI} = 1 + 0,017 \cdot 10^8 \cdot \beta_1^2 \cdot d^4 \cdot n^2. \quad (6.23)$$

Додаткові втрати у відведеннях силових трансформаторів загального призначення зазвичай не враховують, оскільки вони складають близько 5% від основних втрат у відведеннях. Останні складають 5-8% загальних втрат к.з. Крім того, довжина відведень, що заздалегідь приймається, дозволяє достатньо точно визначити повні втрати у відведеннях.

Поля розсіяння обмоток і відведень, обумовлені протіканням струмів по них, викликають додаткові втрати в конструктивних частинах трансформаторів: в стінках бака, пресуючих балках ярем, пресуючих кільцях обмоток і т.п.

Найістотніший їх прояв в трансформаторах потужністю від 80000 кВ·А і вище. В таких трансформаторах ці втрати створюють проблеми, пов'язані з надмірним або небажаним нагрівом конструктивних елементів. Для зменшення цих втрат застосовують немагнітні матеріали для пресуючих кілець обмоток і інших елементів конструкції, де це можливо. Крім того, створюють магнітні шунти, мета яких зконцентрувати потоки розсіяння так, щоб зменшити їх проникнення в конструктивні частини

(наприклад, в стінки бака) і втрати в них. При цьому втрати в самих шунтах (за рахунок виконання їх шихтованими з електротехнічної сталі) порівняно невеликі. Такі шунти приймають для екранування стінок бака.

В трансформаторах від 100 до 63000 кВ·А додаткові втрати в елементах конструкцій визначають як втрати в баку.

$$P_{\delta} = 10 \cdot K \cdot S_n \quad \text{Вт}, \quad (6.24)$$

де S_n – повна потужність трансформатора, кВ·А; K – коефіцієнт, який визначається за таблицею 7.1 [1].

6.1.3. Повні втрати короткого замикання

Повні втрати к.з. P_k визначаються сумою основних і додаткових втрат. Для трансформаторів потужністю 63000 кВ·А і менш

$$P_{k.\text{расч}} = K_{Д1} \cdot P_{осн1} + K_{Д2} \cdot P_{осн2} + P_{отв1} + P_{отв2} + P_{\delta} \quad \text{Вт}. \quad (6.25)$$

Отримана розрахункова величина $P_{k.\text{расч}}$ не повинна перевищувати задану або нормовану величину $P_{k.\text{задан}}$ не більше ніж на плюс 5%:

$$\frac{P_{k.\text{расч}} - P_{k.\text{задан}}}{P_{k.\text{задан}}} \cdot 100\% \leq 5\%. \quad (6.26)$$

6.2. Розрахунок напруги короткого замикання

Напруга к.з. U_k визначається з досліду к.з., при якому напруга подається на первинну обмотку при закортчєній вторинній. За величину U_k приймають те значення, при якому по обом обмоткам протікають свої номінальні струми. В силових трансформаторах величина U_k лежить в межах (4,5...10,5)% від номінальної, причому більше значення відповідає трансформаторам потужністю від 63000 кВ·А і вище.

Згідно вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 11677-75 в спроектованому трансформаторі розрахункова величина U_k не повинна відрізнятися від величин заданої $U_{k.\text{задан}}$ не більше ніж на плюс-мінус 5%. Це найжорсткіша вимога до нормованих параметрів трансформатора, яка обумовлена впливом величини U_k :

- на нахил (жорсткість) зовнішньої характеристики трансформатора, оскільки впливає на величину зміни напруги на виході від холостого ходу до номінального навантаження;

- на розподіл потужностей навантаження при паралельній роботі трансформаторів (навантаження розподіляються обернено пропорційно величинам U_k);

- на величину сталого струму аварійного к.з. що важливо для визначення часу відключення аварійного к.з. струмовим захистом;

$$I_{к.з.ст.ав.} = I_H \cdot \frac{U_H[B]}{U_K[B]} = I_H \cdot \frac{100\%}{U_K\%}, \quad (6.27)$$

- на електродинамічні зусилля, які діють на обмотки і розраховуються в процесі проектування по величині ударного струму раптового к.з.; це вимагає розрахункової перевірки обмоток на механічну міцність;

- на швидкість згасання перехідних процесів, яка залежить від співвідношення активної і реактивної складової U_K , а значить і на величину ударного (максимального) коефіцієнта раптового к.з.

Для більш детального розгляду можливості впливу на величину U_K в процесі проектування розглянемо схему заміщення трансформатора при к.з. на рис. 6.3, яку можна спростити до рис. 6.4.

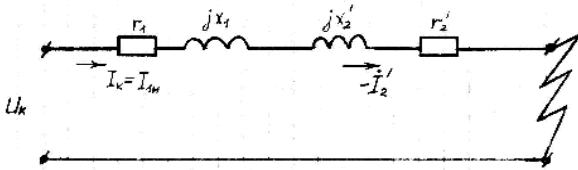


Рис. 6.3.

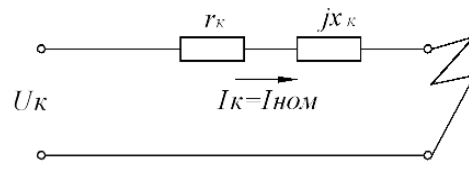


Рис. 6.4.

Згідно рис. 6.4 випливає запис

$$\dot{U}_K = (r_K + jx_K) \dot{I}_{1H} = U_{Ka} + jU_{Kp}, \quad (6.28)$$

тобто модуль напруги U_K є геометрична сума активної і реактивної складових:

$$U_K = \sqrt{U_{Ka}^2 + U_{Kp}^2}. \quad (6.29)$$

Відразу слід зазначити, що реально $U_{Ka} < U_{Kp}$, тому U_{Ka} у меншій мірі впливає на величину U_K , ніж U_{Kp} .

З рис. 6.4 слідує, що у відносних одиницях

$$\dot{U}_{Ka} = \frac{U_{Ka}}{U_{1H}} = \frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1H}} = \frac{r_K}{\frac{U_{1H}}{I_{1H}}} = \frac{r_K}{Z_\delta} = \dot{r}_K, \quad (6.30)$$

Провівши аналогічні (6.30) перетворення, отримаємо

$$\begin{cases} \dot{U}_K = \dot{z}_K \\ \dot{U}_{Kp} = \dot{x}_K, \\ \dot{U}_{Ka} = \dot{r}_K \end{cases} \quad (6.31)$$

До речі, остання рівність ($\dot{U}_{Ka} = \dot{r}_K$) дозволила записати вираз (6.32).

Скориставшись перетвореннями (6.30),

$$\dot{U}_{Ka} = \frac{I_{1H} \cdot r_K}{U_{1H}} \cdot \frac{m \cdot I_{1H}}{m \cdot I_{1H}} = \frac{m \cdot I_{1H}^2 \cdot r_K}{m \cdot U_{1H} \cdot I_{1H}} = \frac{P_K}{S_H}, \quad (6.32)$$

або

$$U_{ка} \% = \frac{P_k(Bm)}{10^3 \cdot S_n(\kappa B \cdot A)} \cdot 100\% = \frac{P_k(Bm)}{10 S_n(\kappa B \cdot A)} \% . \quad (6.33)$$

Таким чином, з (6.31), (6.32) і (6.33) витікає, що на величину $U_{ка}$ (в абсолютних або відносних одиницях) можна впливати зміною активних опорів обмоток (зміною перерізу витка), або втратами к.з. P_k (змінюючи густину струму в перерізі витка). При цьому слід пам'ятати і про обмеження величини P_k .

Реактивна складова напруги короткого замикання $U_{кр}$ реально рівна ЕРС, яка створюється потоками розсіяння обмоток. Картина розподілу магнітних силових ліній полів розсіяння двох обмоток показана на рис. 6.5. Там же вказано розподіл густини потоку (тобто індукції B) в радіальному напрямі щодо осі стрижня (подовжнє поле розсіяння). Дуже важливо відзначити, що найбільша індукція має місце в каналі між обмотками НН і ВН (відстань a_{12}). Вона рівна висоті трапеції. Тоді і зрозуміло, чому відстань a_{12} називають «каналом розсіяння».

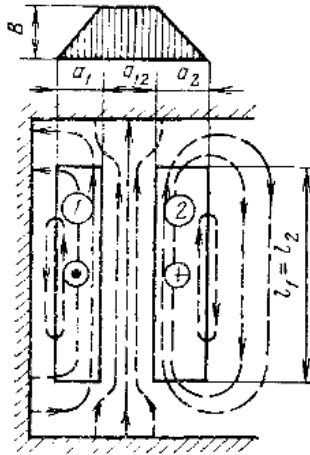


Рис. 6.5.

Саме цими полями розсіяння (або просто полем розсіяння) обмоток створюється ЕРС, яка на математичній моделі (схема заміщення для режиму к.з.) представляється у вигляді:

$$U_{кр} = \dot{I}_{1н} \cdot x_k, \quad (6.34)$$

де $x_k = x_1 + x_2'$ – коефіцієнт, що враховує вплив конструкції (геометрію обмоток, кількості витків, частоту, розташування обмоток відносно одна одної та ряд інших факторів) на величину ЕРС від потоків розсіяння при відомому струмі.

Цей коефіцієнт отримав назву індуктивний опір від потоків розсіяння, тобто величини складових його (x_1 та x_2') пропорційні величинам потоків розсіяння своїх обмоток.

До речі, аналогічне пояснення має x_m – індуктивний опір, обумовлений основним (або взаємодіючим) потоком.

Тепер очевидно, що для розрахунку величини $U_{кр}$ необхідно отримати аналітичний вираз для x_k . Він отриманий при вивченні загального курсу "Електричні машини" і має вигляд

$$x_k = \frac{7,9 \cdot f \cdot w^2 \cdot \pi \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p}{L} \cdot 10^{-6} \text{ Ом}, \quad (6.35)$$

де w – кількість витків тієї обмотки, з боку якої визначається U_{kp} ; $d_{12} = D_c + 2a_{01} + 2a_1 + a_{12}$ – середній діаметр по каналу розсіяння, м; L – середня висота обмоток, м; $a_p \approx a_{12} + (a_1 + a_2)/3$ – приведений канал розсіяння, який є основою прямокутника, що по площі дорівнює площі трапецеїдального розподілу індукції полів розсіяння та має ту ж висоту B (рис. 6.5);

K_p – коефіцієнт приведення (Роговського) реальної складної картини розподілу магнітних силових ліній полів розсіяння обмоток (рис. 6.5) до ідеального випадку, коли всі силові магнітні лінії полів розсіяння у вікні паралелі осі стрижня і замикаються через ярма і стрижні; визначається коефіцієнт виразом

$$K_p \approx 1 - \sigma(1 - e^{-1/\sigma}), \quad (6.36)$$

або

$$K_p = 1 - \sigma, \quad (6.37)$$

де $\sigma = (a_{12} + a_1 + a_2)/(\pi L)$ – коефіцієнт.

З урахуванням (6.35) реактивна складова напруги к.з у відсотках має вираз

$$U_{kp} = \frac{I_{1n} \cdot x_k}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{7,9 \cdot f_1 \cdot w_1^2 \cdot \pi \cdot d_{12} \cdot a_p \cdot K_p}{U_{1n} \cdot L} \cdot I_{1n} \cdot 10^{-4}\%. \quad (6.38)$$

Замінивши в (6.38) $(\pi \cdot d_{12})/L = \beta$ і $w_1 = U_{1n}/u_g$, отримаємо

$$U_{kp} = \frac{7,9 \cdot f \cdot S' \cdot \beta \cdot a_p \cdot K_p}{u_g^2} \cdot 10^{-1}, \quad (6.39)$$

де $S' = U_{1n} \cdot I_n$ – потужність стрижня, на якому знаходяться обмотки, кВ·А; u_g – напруга на виток, В.

При розрахунках U_{kp} для трансформаторів потужністю від 10000 кВ·А і вище слід приймати

$$a_p = (d_{12} \cdot a_{12} + D_{cp1} \cdot a_1/3 + D_{cp2} \cdot a_2/3)/d_{12}, \quad (6.40)$$

де враховується нерівність радіальних розмірів обмоток a_1 та a_2 .

На величину U_{kp} впливає і нерівномірний розподіл по висоті витків, по яких протікає струм, тобто по висоті обмоток відносно один одного нерівномірно розподіляється їх МРС. Ряд таких випадків приведений на рис. 6.6.

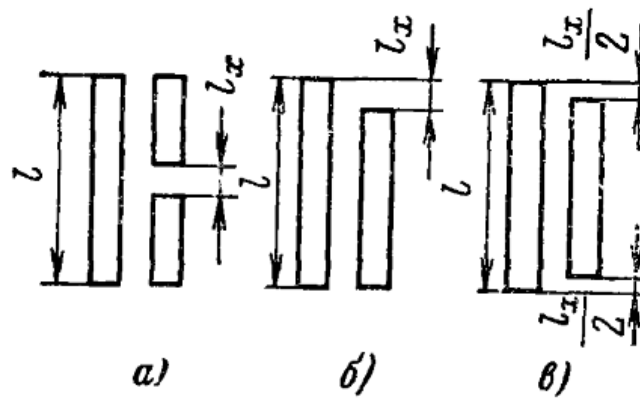


Рис. 6.6.

На рис. 6.6а приведений найтиповіший випадок регулювання витків при ПБВ, коли ступені регулювальних витків розташовують по середині обмотки ВН і частково відключаються.

Як і у випадку для рис. 6.6а, так і для випадків на рис. 6.6б і рис. 6.6в виникають додаткові поперечні поля розсіяння, що створюють додаткову ЕРС розсіяння, тобто збільшують додатково складову напруги к.з. — $U_{кр}$.

Виникнення поперечного поля розсіяння можна продемонструвати для випадку рис. 6.6а. Для цього проведемо розклад реальної обмотки з відключеною частиною витків посередині висоти на дві фіктивні. Роблять це так, як на рис. 6.7. Зліва реальна картина, з реальної, не скомпенсованої МРС обмотки ВН — мінус $I \cdot w \frac{x}{100}$, де x — висота розриву (відключених витків) у відсотках від загальної висоти обмотки ВН.

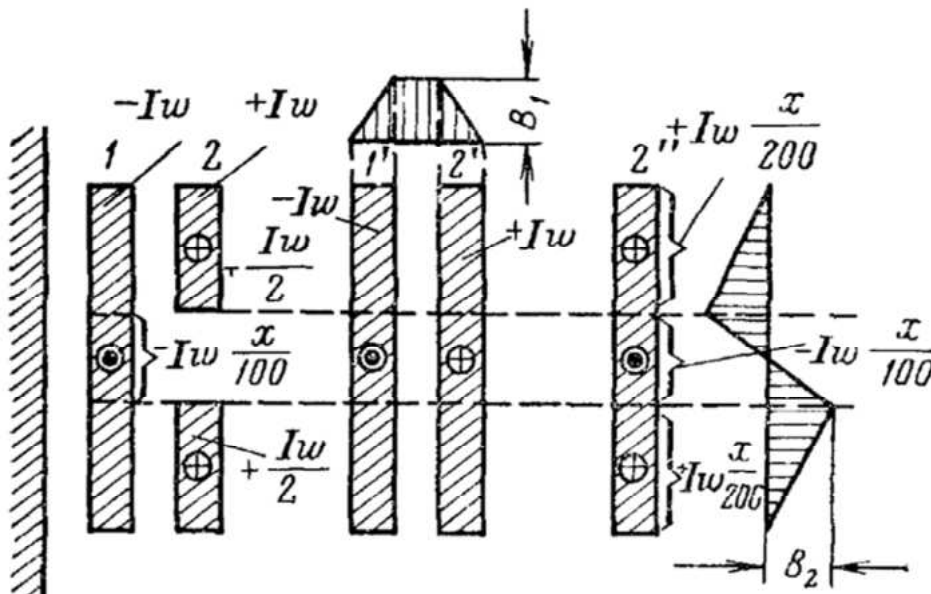


Рис. 6.7.

Цю реальну картину заміняють двома фіктивними обмотками ВН: перша посередині — з додатковою частиною обмотки, утворюючою МРС — плюс $I \cdot w \frac{x}{100}$ і має рівну висоту з обмоткою НН (тут маємо трапецеїдальний розподіл поля розсіяння, повздовжнє з найбільшою індукцією B_1), і друга справа — додаткова, яка призна-

чається для компенсації введеної в першу фіктивну обмотку МРС плюс $I \cdot w \frac{x}{100}$. Зна-
 значимо, що сумарна МРС другої фіктивної обмотки мінус $I \cdot w \frac{x}{100}$.

Для випадку з першою фіктивною обмоткою (рис. 6.7 посередині) розрахунок $U_{кр}$ проводиться, як це роблять вище за виразом (6.39).

Введення вторинної фіктивної обмотки створює первинне поле розсіяння з складним розподілом по висоті і з найбільшою індукцією B_2 . Створення цим полем додаткової ЕРС розсіяння, а значить і збільшенням реактивної складової напруги к.з., зазвичай враховують коефіцієнтом

$$K_q \approx 1 + L \cdot x^2 / (m \cdot a_p \cdot K_p), \quad (6.41)$$

де $x = L_x / L$ – співвідношення висот, вказаних на рис. 6.6; m – коефіцієнт, прийма-
 ється $m = 3$ для рис. 6.6а і рис. 6.6в, і $m = 0,75$ - для рис. 6.6б. a_p і K_p – величини,
 які пояснювались вище.

Остаточно $U_{кр}$ визначають як

$$U_{кр} = K_q \cdot U'_{кр}, \quad (6.42)$$

де $U'_{кр}$ – реактивна складова напруги к.з., розрахована для рівновисоких обмоток по
 (6.39).

У результаті повну розрахункову величину напруги к.з. визначають по (6.29),
 при цьому згідно вимогам міждержавного стандарту ГОСТ 11677 – 85 розрахункова
 величина $U_{к.расч.}$ і задана (регламентована) величина $U_{к.задан}$ не повинні при розра-
 хунках відрізнятися по абсолютній величині більш ніж на

$$\left| \frac{U_{к.расч.} - U_{к.задан}}{U_{к.задан}} \cdot 100\% \right| \leq 5\%. \quad (6.43)$$

Розділ № 7. Механічний розрахунок обмоток

7.1. Мета і задачі розрахунку

Метою даного розрахунку є оцінка механічної міцності обмоток шляхом визначення електродинамічних зусиль, діючих на провідники та ізоляційні матеріали обмоток.

Виникнення електродинамічних зусиль викликано взаємодією струму в провіднику обмотки з полем розсіяння, яке, до речі, створюється струмом як даного провідника, так і струмом сусідніх провідників. Враховуючи складний розподіл поля розсіяння в просторі, і, як наслідок, нерівномірні зусилля, діючі на провідники, на практиці механічні зусилля в обмотках від електродинамічних сил розглядають при постійному, усередненому полі розсіяння, яке зчеплене зі всіма провідниками конкретної обмотки.

Такий підхід дозволяє визначити сумарне зусилля, діюче на обмотку, і оцінити механічну міцність обмоток через механічні напруги, що виникають в провідниках та ізоляційних прокладках.

Очевидно, що виникаючі зусилля визначаються величиною струму провідників обмоток. Найбільша величина струмів в обмотках має місце при раптовому (аварійному) к.з. Крім того, важливо знати напрям механічних зусиль, діючих на обмотки.

У зв'язку з цим необхідно розглянути фізичні процеси виникнення зусиль і їх напрямів при раптовому к.з., а також провести розрахункову оцінку зусиль на стадії проектування. Одночасно, з урахуванням параметрів проектного трансформатора, проводиться оцінка теплового стану трансформатора по часу спрацьовування захисту, що відключає к.з. при підвищених струмах трансформатора (струмовий захист).

7.2. Фізична картина раптового к.з.

Під раптовим (аварійним) к.з. розуміють режим, при якому на стороні вихідної обмотки відбувається к.з. (зазвичай розглядають найважчий випадок – к.з. безпосередньо на затискачах вихідної обмотки) при живленні номінальною напругою вхідної обмотки.

З теорії перехідних процесів в електричних колах витікає, що струм раптового к.з. має сталу (вимушену) і вільну складові. Це твердження для миттєвих (що змінюються у часі) значень струмів має вигляд

$$i(t) = i_{ycm}(t) + i_{cv}(t), \quad (7.1)$$

де $i(t)$ – сумарний (реальний) струм раптового к.з.; $i_{ycm}(t)$ – стала складова струму; $i_{cv}(t)$ – вільна складова струму.

Цілком зрозуміло, що найбільші електродинамічні зусилля виникають тоді, коли $i(t)$ матиме найбільше (максимальне або ударне) значення. Це твердження вимагає розглянути кожну з складових окремо.

Діюче значення сталої складової струму при раптовому к.з. у відносних одиницях (в.о.) для трансформаторів потужністю менше 1000 кВ·А (або 1 МВ·А) визначається без урахування впливу опорів живлячої мережі дорівнює

$$I_{уст.к}^* = \frac{U_n^*}{U_k^*} = \frac{1}{U_k^*} = \frac{100}{U_k \%}, \quad (7.2)$$

де U_k – напруга к.з.

Для трансформаторів від 1000 кВ·А і вище згідно міждержавного стандарту ГОСТ 11675–85 діюче значення сталого струму к.з. у в.о. визначається з урахуванням опору живлячої мережі для основного відгалуження обмотки

$$I_{уст.к}^* = \frac{100}{U_k \left(1 + \frac{100 S_{ном}}{U_k \cdot S_k} \right)}, \quad (7.3)$$

де $S_{ном}$ – номінальна потужність трансформатора, МВ·А; U_k – напруга к.з. трансформатора %; S_k – потужність к.з. електричної мережі, живлячої трансформатор, МВ·А (з таблиці 7.2 [1]).

Миттєве значення сталого струму к. з.

$$i_{уст.к}(t) = \sqrt{2} \cdot I_{ном} \cdot I_{уст.к}^* \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi) = I_{м.уст.к.}^* \cdot \sin(\omega \cdot t + \phi), \quad (7.4)$$

де $I_{ном}$ – номінальне діюче значення струму відповідної обмотки, А; $I_{м.уст.к.}^*$ – кратність сталого струму к.з., в.о.; ϕ – початкова фаза струму к.з. при $t = \pm 0$.

Враховуючи, що трансформатор можна розглядати як котушку індуктивності з феромагнітним осердям, то перший закон комутації, стосовно такого випадку, трактується так:

потокозчеплення обмоток у момент комутації ($t = \pm 0$) повинно залишатися постійним.

Саме цим фактом зумовлена поява вільної складової струму раптового к.з. – $i_{св.к}(t)$, яка в перший момент к.з. підтримує постійним потокозчеплення (при $t = \pm 0$). Причому, початкова величина вільної складової струму к.з. визначається величиною потокозчеплення у момент $t = \pm 0$. Величина потокозчеплення обмоток залежить від величини миттєвої напруги живлячої мережі у момент $t = \pm 0$. На рис. 7.1 кривою 1 показана зміна живлячої напруги $u(t)$ в часі.

Достатньо точно можна вважати, що $u(t) = -e(t)$, тобто живляча напруга мережі рівноважується ЕРС обмотки (крива 2).

Згідно закону електромагнітної індукції в трактуванні Максвела миттєве значення $e(t)$ визначається як

$$e = -\frac{d\psi}{dt}, \quad (7.5)$$

звідки слідує зміна потокозчеплення $\psi(t)$ (крива 3)

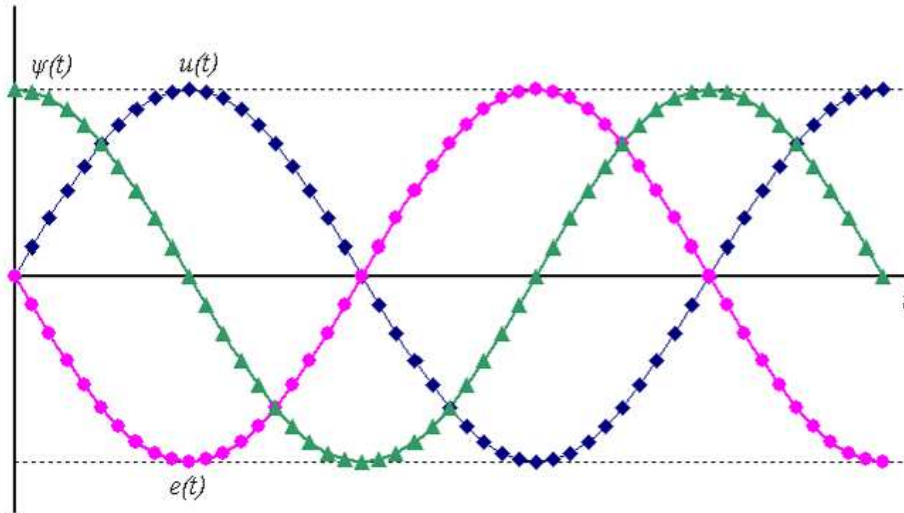


Рис. 7.1.

З рис. 7.1 видно, що $\psi_{маа}$ має місце при $u(t) = 0$. Саме при такій величині напруги живлячої мережі початкове значення вільної складової буде найбільшим.

При $u(t) = U_{маа}$ потокозчеплення $\psi = 0$, тобто в цьому випадку вільна складова дорівнює нулю, $i_{св}(t) = 0$, тобто буде тільки стала (вимушена) складова, та $i(t) = i_{уст.к}(t)$.

Оскільки при експлуатації трансформатора можливі випадки раптового к.з. при $u(t) = 0$ під час $t = \pm 0$, то і при визначенні механічних зусиль необхідно враховувати максимально можливу величину вільної складової.

Як відомо із загальної теорії електричних машин, вільна складова змінюється по аперіодичному закону

$$i_{св}(t) = I_{м.св} \cdot e^{-\frac{r_k}{L_k} \cdot t} \quad (7.6)$$

На рис. 7.2 приведені криві зміни сталої (крива 1), вільного (крива 2) і повного (крива 3) струмів раптового к.з. при роботі трансформатора на неробочому ході та $u(t) = 0$ в момент к.з.

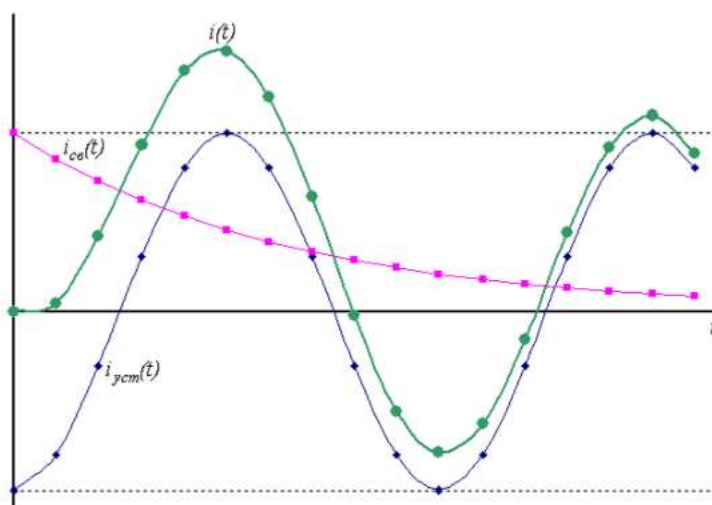


Рис. 7.2.

Причому, максимальні струми сталої і вільної складових у момент $t = \pm 0$ рівні і мають протилежні знаки, щоб виконувався перший закон комутації у відомому

трактуванні: за наявності індуктивності в колі струми миттєво змінитися не можуть.

Сумарний (або реальний) струм раптового к.з. досягає максимального значення при $t = \pi$ (або 0,01с) і з урахуванням згасання вільної складової дорівнює

$$i_{max,k} = I_{m.уст.к.} + I_{max} \cdot e^{-\pi \frac{r_k}{x_k}} = I_{m.уст.к.з.} (1 + e^{-\pi \frac{U_{ka}}{U_{kp}}}) = I_{m.уст.к.з.} \cdot K_{max}, \quad (7.7)$$

де $I_{m.уст.к.}$ – амплітуда сталого струму; $r_k/x_k = u_{ka}/u_{kp}$ – декремент згасання вільної

складової; $K_{max} = (1 + e^{-\pi \frac{U_{ka}}{U_{kp}}})$ – коефіцієнт, що враховує збільшення амплітуди сталого струму раптового к.з. через час π за рахунок вільної складової.

В [1] $i_{max,k}$ позначають $i_{k,max}$ і визначають

$$i_{k,max} = \sqrt{2} \cdot K_{max} \cdot I_{к.у.}, \quad (7.8)$$

де $I_{к.у.}$ – діюче значення сталого струму раптового к.з. (7.2) або (7.3).

Механічна міцність обмоток визначається і напрямом зусиль. Реально розподіл поля розсіяння має складну картину. Істотно, що розподіл і напрям зусиль, діючих на провідники, також мають складну картину.

Для визначення напрямку сил, діючих на провідники обмоток, розглянемо найпростіший випадок: напрям сил, що виникають між двома провідниками, по яких протікають струми.

На рис. 7.3 зображено два провідника з однаковими напрямками струмів в них. Використовуючи правило свердлика (буравчика), знайдемо напрям магнітних силових ліній провідника 1. В цьому полі знаходиться провідник 2 зі струмом. Взаємодія струму провідника 2 з полем від провідника 1 створить зусилля, діюче на провідник 2. Напрямок зусилля визначається за правилом лівої руки. Застосувавши ці правила, отримаємо, що провідник 2 притягується до провідника 1 із зусиллям F_{np2} .

Виконавши ті ж операції відносно струму провідника 1 і напрямком поля від провідника 2, знайдемо F_{np1} , що дозволяє зробити висновок: провідники з однаковим напрямом струму в них – притягуються, тобто зусилля прагнуть зближувати провідники (рис. 7.3).

На рис. 7.4 показано два провідники з різними (зустрічними) напрямками струмів. Використавши правило свердлика(буравчика) для провідника 1 і правило лівої руки для провідника 2, аналогічно попередньому випадку, знайдемо зусилля F_{np2} . Виконавши подібні дії для визначення поля провідника 2 і струму провідника 1, знайдемо силу F_{np1} . Ці зусилля направлені так, що відштовхують провідники один від одного.

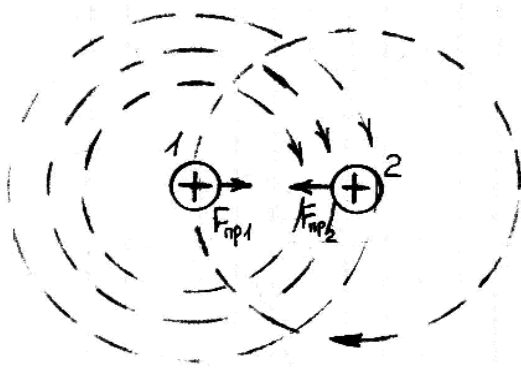


Рис. 7.3.

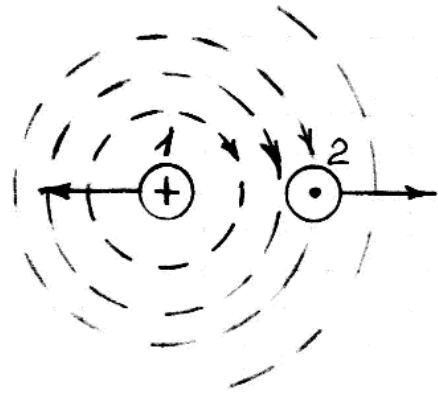


Рис. 7.4.

Такий підхід можна розповсюдити і для трансформатора. Наприклад, представивши обмотки трансформатора одновитковими (або зосередивши всі витки в єдиний) і враховуючи, що в обмотках двохобмоточного трансформатора протікають струми практично протилежного напрямку, отримаємо напрям сил на рис. 7.5. Ці зусилля називають радіальними (по відношенню до осі стрижня). Оскільки ці зусилля обмоток взаємообумовлені, то

$$F_{p1} = F_{p2} = F_p, \quad (7.9)$$

тому, визначаючи F_p , по суті знаходять F_{p1} та F_{p2} .

На рис. 7.6а показана дія радіальних сил, причому, вважають, що ці сили рівномірно розподілені по висоті обмоток.

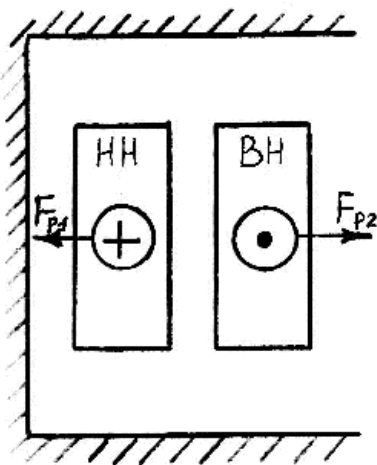


Рис. 7.5.

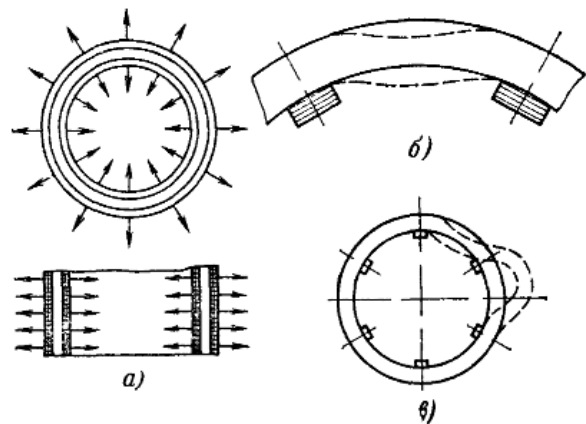


Рис. 7.6.

Якщо діючі радіальні сили створюють механічні напруги в провідниках обмоток вище за межу текучості матеріалу провідників, то відбувається втрата стійкості обмоток, тобто порушується їх механічна міцність. Для обмотки НН відбувається прогинання провідників між рейками (в прольоті) – рис. 7.6б. Для обмотки ВН – вигинання (рис. 7.6в).

Порушення форми витків (витка) приводить до зменшення ізоляційних проміжків (a_{01} або a_{22}). В результаті можливий пробій головної ізоляції, що обумовлює аварійний стан, який приводить до повної втрати працездатності трансформатора.

Якщо розглянути кожну обмотку окремо, то струми в її провідниках співпадають за напрямом. Представимо обмотку у вигляді двох витків, зосередивши половину витків симетрично щодо середини обмотки, як показано на рис. 7.7. Викорис-

товуючи такий же підхід, як і для рис. 7.3, отримаємо зусилля F'_{oc} , які називають осьовими.

Тобто, окрім взаємообумовлених радіальних зусиль в кожній обмотці існують зусилля F'_{oc} , обумовлені тільки власними струмами.

Особливо слід розглянути випадок, коли обмотки нерівновисокі або мають розриви. На рис. 7.8 приведений найпростіший випадок нерівновисокості обмоток. Представивши їх у вигляді еквівалентного витка по середині кожної з обмоток, знайдемо зусилля $F = F'_{p1} = F'_{p2}$. Розклавши ці зусилля на радіальну складову F_p і осьову F''_{oc} , помітимо, що нерівновисокість викликає додаткові осьові зусилля F''_{oc} , які прагнуть збільшити нерівновисокість обмоток.

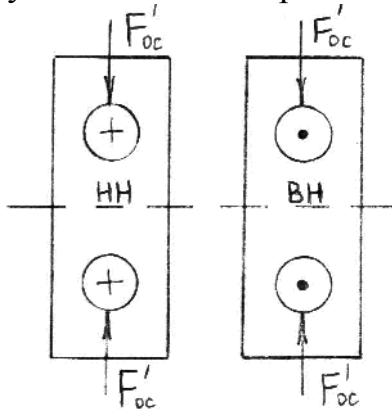


Рис. 7.7.

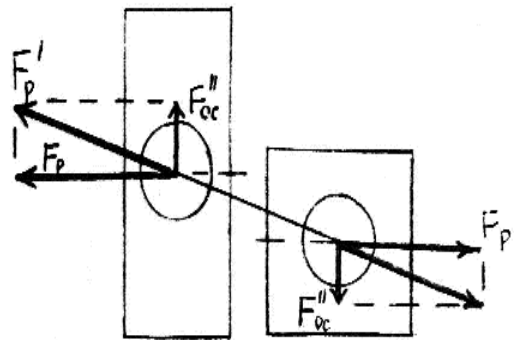


Рис. 7.8.

Слід зазначити, що сумарна осьова сила обмотки є алгебраїчною сумою F'_{oc} і F''_{oc} , оскільки напрям F''_{oc} залежить від конфігурації нерівновисокості і розривів в обмотках. Можливі випадки подані в таблиці на рисунку 7.11 [1].

Сумарна осьова сила створює механічні напруги в ізоляції обмоток або ярмовій ізоляції, які повинні бути менше напруги межі текучості її. Якщо $F'_{oc} - F''_{oc} > 0$ (рис. 7.8), то перевіряється подовжня ізоляція обмоток (прокладки, ізоляція провідників). Якщо $F''_{oc} - F'_{oc} > 0$, то обмотку розтягує сумарна сила, і слід перевіряти міцність ярмової ізоляції.

Попутно відзначимо, що осьові зусилля (як і радіальні) змінні в часі. Для усунення вертикальних вібрацій обмоток в трансформаторах потужністю до 630 кВ·А застосовують розклинування (клин з дерева забивають між ярмом і верхніми частинами обмоток), а в трансформаторах потужністю 1000 кВ·А і вище – пресуючі болти (рис. 7.9). Мета їх – створити монолітність обмоток в осьовому напрямі.

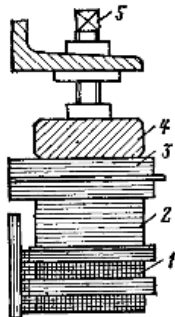


Рис. 7.9.

На рис. 7.9 позиції: 1 – витки обмотки; 2 – ізоляційна прокладка; 3 – пресуюче

кільце; 4 – пресуючий «башмак»; 5 – пресуючий болт, закріплений до виступу ярмової балки.

7.3. Розрахунок механічних сил в обмотках

Напрямок сил, що діють на провідники обмотки, можуть бути визначені, використовуючи представлення реального складного розподілу поля розсіяння у вигляді накладання двох ідеалізованих полів.

Одне з полів розсіяння направлено уздовж осі стрижня – подовжнє. Густина цього поля (або індукція) B_d показана на рис. 7.10 для випадку двох рівновисоких концентричних обмоток.

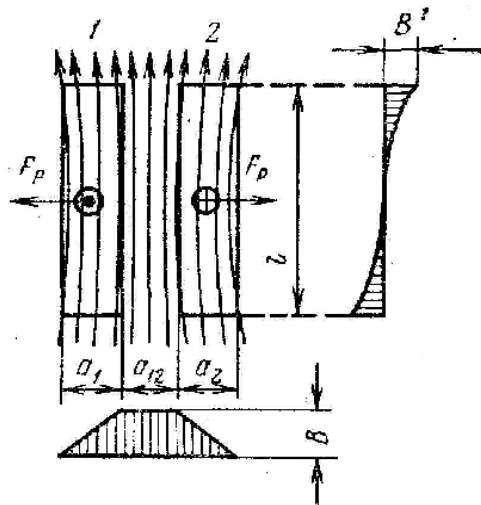


Рис. 7.10.

Друга складова поля розсіяння, що ідеалізується, направлена уперек осі стрижня – поперечна. Густина поперечного поля розсіяння (або індукція) B_q показана на рис. 7.10.

Ідеалізація напрямів силових магнітних ліній (вздовж і поперек осі стрижня) замінює реальний (складніший і багатовекторний) розподіл, але дозволяє одержати ті ж напрями сил, що були одержані вище. Крім того, така ідеалізація дозволяє одержати аналітичні вирази для розрахунку усереднених (але найбільших) радіальних і осьових сил, що діють на провідники обмотки і її ізоляцію.

Реальний розподіл поля розсіяння зводиться до двох ідеальних за допомогою коефіцієнта Роговського. Це означає, що магнітні силові лінії поздовжнього поля паралельні осі стрижня, а поперечного – перпендикулярні осі стрижня.

У випадку нерівної висоти обмоток, наприклад, на рис. 7.11, обмотку нерівної висоти (або з розривами) замінюють двома: рівновисокою і обмоткою, у якій частина має знак МРС некомпенсованої в місці розриву (нерівновисокої), а решта протилежні знаки (разом сумарна МРС цієї обмотки дорівнює нулю, а розподіл індукції F'' показане на рис. 7.11. При цьому рівновисокі обмотки мають зусилля, що розраховуються згідно рис. 7.10, а третя додаткова обмотка зумовить появу зусилля F''_{oc} , напрям якого для кожної реальної обмотки залежить від конфігурації нерівновисокості (або розривів, тобто нерівномірного розподілу витків обмоток по висоті).

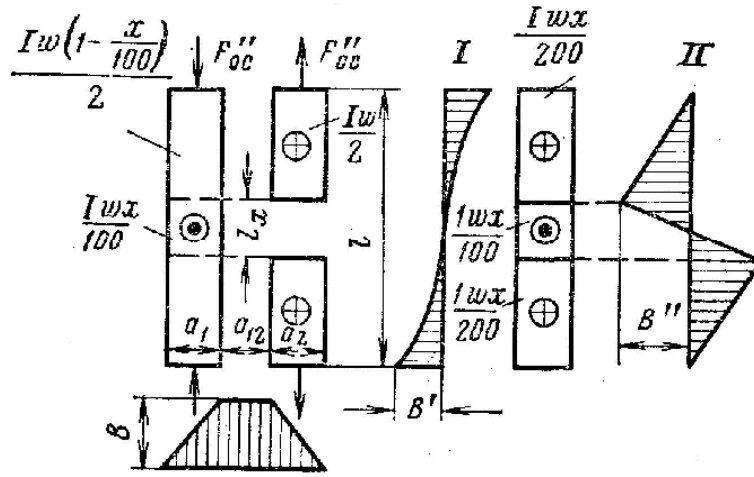


Рис. 7.11.

Для визначення в обмотці радіальної складової скористаємося загальновідомим виразом, що визначає діючу на провідник із струмом i силу f_{np} , який має довжину L і розміщена в полі з індукцією B_x

$$f_{np} = B \cdot i \cdot L. \quad (7.10)$$

Для всієї обмотки трансформатора найбільше усереднене радіальне зусилля згідно (7.11) прийме вигляд

$$F_p = B_{cp.d} \cdot i_{k.max} \cdot w \cdot L_b, \quad (7.11)$$

де $B_{cp.d}$ – середнє значення індукції поздовжнього поля розсіяння обмотки; $i_{k.max}$ – максимальне амплітудне значення струму раптового к.з. (ударний струм); w – кількість витків обмотки; L_b – середня довжина витка обмотки.

Величина середньої індукції подовжнього поля

$$B_{cp.d} = \frac{\Phi_{cp.d}}{P_{обм}}, \quad (7.12)$$

де $\Phi_{cp.d}$ – умовний поздовжній потік розсіяння, рівномірно розподілений уздовж радіального розміру обмотки; $P_{обм} = \pi \cdot [(D'')^2 - (D')^2] / 4$ – площа перерізу обмотки, перпендикулярна осі стрижня; D'' і D' – відповідно зовнішній і внутрішній діаметри обмотки.

Рівномірно розподілений потік по поздовжній осі

$$\Phi_{cp.d} = \frac{F_{обм.ср} \cdot K_p}{R_\mu}, \quad (7.13)$$

де $F_{обм.ср} = i_{k.max} \cdot W / 2$ – рівномірно розподілена МРС обмотки уздовж радіального її розміру; R_μ – магнітний опір; K_p – коефіцієнт Роговського.

На рис. 7.12 показаний реальний розподіл $F_{обм.x} = i \cdot W_x = f(x)$ по ширині (радіальному розміру) обмотки з W витками.

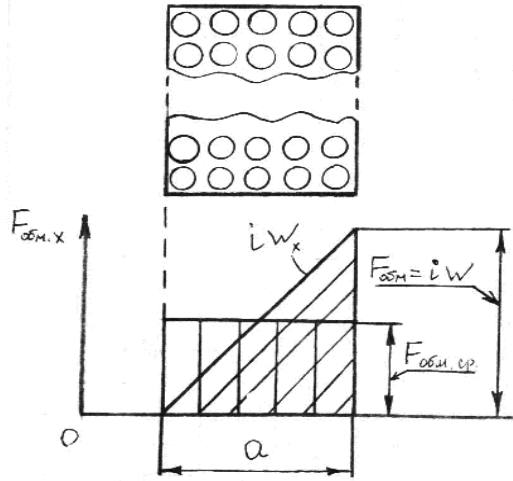


Рис. 7.12.

Цей реальний розподіл замінюють незалежною від координати x постійною $F_{обм.ср}$, причому площа між віссю x і прямою $F_{обм.x} = i \cdot W_x = f(x)$ рівна площі, що розміщена між віссю x і прямою $F_{обм.ср}$. Ці площі повинні бути рівні. Рівність вказаних площ має місце при

$$F_{обм.ср} = i \cdot W / 2. \quad (7.14)$$

Для випадку раптового к.з. найбільше значення

$$F_{обм.ср} = i_{к.макс} \cdot W / 2. \quad (7.15)$$

Магнітна силова лінія подовжнього поля розсіяння замикається через залізо стрижня, ярем і проміжок між верхнім і нижнім яром. Нехтуючи магнітними опорами ділянок електротехнічної сталі, вважаючи, що магнітні силові лінії подовжнього поля паралельні осі стрижня, мають довжину, рівну довжині стрижня L_c , і магнітну проникність на ділянках між ярами рівну $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$, можна записати вираз для магнітного опору

$$R_\mu = \frac{1}{\mu_0} \cdot \frac{L_c}{\Pi_{обм}}, \quad (7.16)$$

де $\Pi_{обм}$ – поперечний переріз обмотки з (7.12).

Підставляючи в (7.11) вирази (7.12), (7.13), (7.14) і (7.16), одержимо

$$F_p = \frac{\mu_0}{2} (i_{к.макс} \cdot W)^2 \cdot K_p \cdot \frac{L_g}{L_c} \text{ Н}. \quad (7.17)$$

З урахуванням чисельного значення $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн/м}$ і, ввівши коефіцієнт $\beta = L_g / L_c$, остаточно одержимо вираз з [1]

$$F_p = 0,628 \cdot (i_{к.макс} \cdot W)^2 \cdot K_p \cdot \beta \cdot 10^{-6} \text{ Н}. \quad (7.18)$$

Для визначення сил F'_{oc} скористаємося виразом для усередненої індукції по поперечній осі $B_{ср.q}$, рекомендований проведеними дослідженнями

$$B_{ср.q} = B_{ср.d} \cdot a_p / L, \quad (7.19)$$

де $a_p = a_{12} + (a_1 + a_2)/3$ – приведений канал розсіяння.

Скориставшись підходом до визначення середньої МРС, викладеного на рис. 7.12, для випадку поперечної складової поля розсіяння, одержимо

$$F_{cp.q} = i_{k.max} \cdot W \cdot K_p / 4 \text{ Н}. \quad (7.20)$$

Здійснивши перетворення, подібні як і для F_p , з врахуванням (7.19) і (7.20), одержимо

$$F'_{oc} = 0,628 \cdot \frac{(i_{k.max} \cdot W)^2 \cdot L_g \cdot K_p}{L_c} \cdot 10^{-6} \cdot \frac{a_p}{2L_c} \text{ Н}, \quad (7.21)$$

а з врахуванням (7.17)

$$F'_{oc} = F_p \cdot a_p / (2L_c) \text{ Н}. \quad (7.22)$$

Нерівновисокість обмоток і нерівномірний розподіл витків по висоті обмотки викликає додаткове поперечне поле розсіяння і зусилля F''_{oc} (рис. 7.8 і рис. 7.11). Результати досліджень в [1] рекомендують визначати ці зусилля

$$F''_{oc} = F_p \cdot L_x / (L'' \cdot K_p \cdot m) \text{ Н}, \quad (7.23)$$

де L_x – відстань розриву обмотки по висоті (рис. 7.13) або наближена відстань при нерівномірному розподілі витків по висоті (рис. 7.14); L'' – відстань від стрижня до стінки бака (рис. 7.15), частина довжини магнітної силової лінії, де має місце основний магнітний опір по поперечній осі; m – постійний множник, що характеризує особливості нерівномірного розподілу витків по висоті і нерівновисокості обмоток; приймають його величину з таблиці на рисунку 7.11 [1].

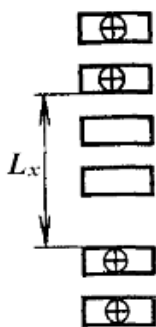


Рис. 7.13.

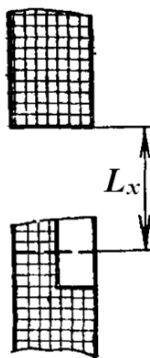


Рис. 7.14.

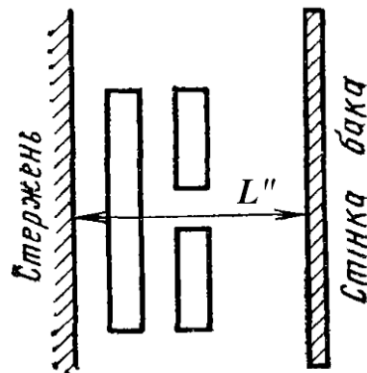


Рис. 7.15.

Розраховані сили за (7.18), (7.22) і (7.23) використовуються для оцінки механічної міцності обмоток.

Як вказувалося раніше, радіальна сила F_p намагається стиснути обмотку внутрішню (зазвичай, НН в силових трансформаторах) і розірвати зовнішню (зазвичай, ВН).

У разі порушення механічної міцності обмоток (говорять "втрата стійкості") відбуваються зміни форми витка (рис. 7.6).

Оцінку стійкості при дії F_p проводять, зазвичай, для обмотки НН, яку сила F_p прагне стиснути (рис. 7.16).

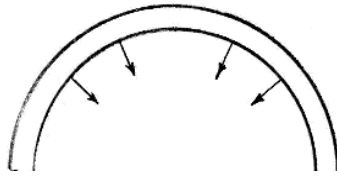


Рис. 7.16.

Зусилля стиснення визначається

$$F_{сж.р} = F_p / (2\pi) \quad H, \quad (7.24)$$

по якому розраховується напруга стиснення

$$\sigma_{сж.р} = F_{сж.р} \cdot 10^{-6} / (w \cdot \Pi) \quad МПа, \quad (7.25)$$

де $F_{сж.р}$ – радіальна сила стиснення, H ; w – кількість витків обмотки; Π – поперечний перетин проводу одного витка, $м^2$.

Стійкість внутрішньої обмотки залежить від багатьох факторів. Вважають, що при $\sigma_{сж.р} = 30 \text{ МПа}$ для мідних обмоток і при $\sigma_{сж.р} = 15 \text{ МПа}$ для алюмінієвих обмоток стійкість (або механічна міцність) обмоток забезпечується.

Перевірку стійкості зовнішньої обмотки на розтягування від сили F_p проводять і оцінюють так само, як і для внутрішньої, використовуючи вирази (7.24) і (7.25). При цьому слід зазначити, що частіше перевірку стійкості зовнішньої обмотки не проводять, оскільки вона знаходиться в сприятливіших умовах.

У загальному випадку напрям результуючої осьової сили визначається

$$F_{oc} = F'_{oc} \pm F''_{oc}. \quad (7.26)$$

Якщо $F_{oc} = F'_{oc}$ або $F'_{oc} > F''_{oc}$, то в цьому випадку F_{oc} стискає обмотку. При цьому F_{oc} сприймається ізоляцією провідників (у циліндрових обмотках) або міжкатушковими і опорними прокладками (у гвинтових і котушкових обмотках).

Напруга стиснення опорних прокладок, наприклад, згідно рис. 7.17, дорівнює

$$\sigma_{сж.ос.} = F_{oc} \cdot 10^{-6} / (n \cdot a \cdot b), \quad (7.27)$$

де n – кількість прокладок по колу обмотки; a – радіальний розмір обмотки, $м$; b – ширина прокладки, $м$.

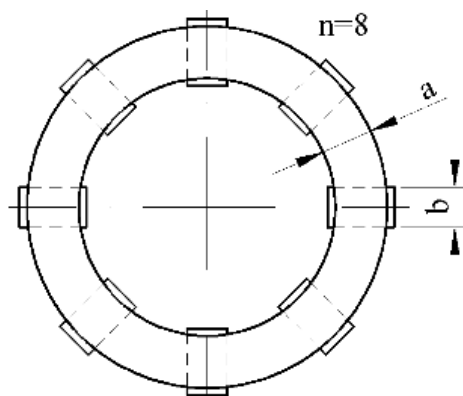


Рис. 7.17.

Напруга $\sigma_{сж.ос.}$ не повинна перевищувати 18...20 МПа, для трансформаторів потужністю до 6300 кВ·А і 35...40 МПа для трансформаторів великих потужностей.

Якщо $F''_{oc} > F'_{oc}$, то результуюче зусилля F_{oc} прагне розтягнути обмотку. В цьому випадку F_{oc} сприймається ізоляцією обмоток від ярма. Напряга стиснення її визначається аналогічно (7.25), де необхідно в знаменник підставити площу ізоляції обмотки від ярма.

7.4. Міри по посиленню механічної стійкості обмоток

Проектувальник трансформатора повинен не тільки оцінити механічну міцність обмоток, але передбачити ряд заходів по її забезпеченню на стадії проектування, вибором технології виготовлення і конструктивними рішеннями.

На стадії проектування найбільш прийнятними рішеннями, що обмежують зусилля в обмотках, є:

- зменшення максимального струму раптового к.з. шляхом підвищення величини напруги к.з., яке зазвичай задається стандартами;
- проектування обмоток рівної висоти, що дозволяє усунути зусилля F''_{oc} ;
- рівномірний розподіл регулювальних витків відносно середини висоти обмотки або зменшення зони розриву в обмотці;
- зниження густини струму в обмотках, що дозволяє збільшити перетин провідника і зменшити напругу в ньому від F_p .

Підвищення механічної стійкості обмоток в процесі виготовлення вдається досягти за рахунок надання їм монолітності, що створюється:

- попереднє пресуванням електроізоляційного картону, що використовується при виготовленні обмоток;
- рівномірним натягненням провідників при намотуванні обмотки;
- щільним приляганням провідників;
- механічним підпресуванням обмотки в осьовому і радіальному напрямках при виготовленні і сушці обмотки;
- просоченням обмоток після сушки і опресовування гліфталевим або іншими лаками.

До конструктивних заходів, що підвищують стійкість обмоток, відносять:

- збільшення (до необхідного) кількості рейок обмотки НН, провідники якої випробовують не тільки стиснення, але і перегин (рис. 7.6б);
- осьове пресування обмоток за допомогою пресувальних кілець і болтів (рис. 7.9);
- розташування регулювальних витків в циліндричних обмотках симетрично щодо середини висоти обмотки ВН;
- розташування регулювальних катушок в катушкових обмотках посередині висоти обмотки ВН;
- виконання в катушкових і гвинтових обмотках НН (у місці зони регулювальних катушок обмотки ВН) збільшених охолоджуючих каналів;
- розташування регулювальних витків ВН при РПН в окремих шарах, причому кількість витків шару дорівнює кількості витків ступеня регулювання.

7.5. Оцінка теплового стану обмоток при раптовому к.з.

Окрім механічних зусиль при раптовому к.з., діючих на обмотки, визначають і температуру нагрівання обмоток в цьому режимі.

Необхідність оцінки теплового стану при к.з. обумовлена істотним скороченням терміну служби ізоляції (втратою нею термічної міцності), а також механічної міцності металу обмоток при високих температурах.

Практика експлуатації трансформаторів показала, що короточасні нагріви до певних температур великого впливу на термін служби не роблять. Міждержавний стандарт ГОСТ 11677-85 встановив ці норми нагріву. Наприклад, для класу нагріво-стійкості **A** допустимі температури: 250°C для обмоток з мідними провідниками і 200°C – з алюмінієвими.

Розрахункова оцінка температур обмоток при раптовому к.з. проводиться умовно для сталого струму к.з. При цьому вважають, що всі втрати в обмотці йдуть на нагрівання металу обмотки із-за інерційності теплових процесів, а сам процес росту температури здійснюється за лінійним законом.

З урахуванням теплоємності металу і ізоляції провідників обмоток, розрахунок температур визначається виразами:

- для обмоток з мідними провідниками

$$\Theta_{\text{км}} = \frac{670 \cdot t_{\text{к}}}{12,5 \left(\frac{u_{\text{к}}}{j \cdot 10^{-6}} \right)^2 - t_{\text{к}}} + \Theta_{\text{н}}, \quad (7.28)$$

- для обмоток з алюмінієвими провідниками

$$\Theta_{\text{ка}} = \frac{670 \cdot t_{\text{к}}}{5,5 \left(\frac{u_{\text{к}}}{j \cdot 10^{-6}} \right)^2 - t_{\text{к}}} + \Theta_{\text{н}}, \quad (7.29)$$

де $t_{\text{к}}$ – тривалість к.з. на виводах масляного трансформатора, с; $u_{\text{к}}$ – напруга к.з., у відсотках; j – густина струму при номінальному режимі, $\text{A}/\text{м}^2$; $\Theta_{\text{н}} = 90^\circ\text{C}$ – початкова температура обмоток.

Тривалість к.з. $t_{\text{к}}$ визначається часом спрацювання струмового захисту. В даний час приймають $t_{\text{к}} = 4\text{с}$ для трансформаторів, к.з. у яких відбувається на сторонах з номінальною напругою до 35 кВ включно. Для трансформаторів, к.з. у яких здійснюється на сторонах з номінальною напругою 110 кВ і вище, приймають $t_{\text{к}} = 3\text{с}$. З урахуванням номінальної напруги трансформатора і приймається чисельне значення $t_{\text{к}}$, яке використовується в (7.28) або (7.29). Розрахований нагрів обмоток за цими формулами не повинен перевищувати 250°C для мідних і 200°C для алюмінієвих обмоток. Інакше необхідно провести перерахунок, зменшивши, наприклад, густину струму в обмотці.

Одночасно з перевіркою нагрівання обмоток при раптовому к.з. і заданому $t_{\text{к}}$ здійснюється контроль часу, при якому температура обмотки досягне гранично допустимої температури.

Час, протягом якого обмотка з мідними провідниками досягне 250°C, складає

$$t_{k250} \approx 2,5[u_k/(j \cdot 10^{-6})]^2. \quad (7.30)$$

Проміжок часу, при якому обмотка з алюмінієвими провідниками нагріється до 200°C, складе

$$t_{k200} \approx 0,79[u_k/(j \cdot 10^{-6})]^2. \quad (7.31)$$

Розрахований час нагріву обмотки до гранично допустимої температури повинен перевищувати час спрацьовування захисту, тобто t_k в (7.28) і (7.29).

Розділ № 8. Розрахунок магнітного кола трансформатора

8.1. Мета і завдання розрахунку

Розрахунок магнітного кола починають після остаточно вибраних основних розмірів трансформатора (D_{cm} і $L_{об}$), безпомилкового розрахунку геометрії прийнятих типів конструктивного виконання обмоток, точних розрахунків втрат і напруги к.з. (P_k і U_k), перевірок механічної і теплової міцностей обмоток при раптовому (аварійному) к.з.

Метою розрахунку магнітного кола трансформатора є визначення величин втрат неробочого ходу p_0 (втрат в сталі магнітопроводу при номінальній напрузі) і струму неробочого ходу i_0 .

Чисельні величини p_0 і i_0 неробочого ходу (н.х.) задаються відповідними стандартами. Згідно міждержавному стандарту ГОСТ 11677-85 відхилення їх величин від заданих не повинно перевищувати плюс 30% для струму н.х. і плюс 15% для втрат н.х. у виготовленому трансформаторі. При проектуванні розрахункові величини не повинні перевищувати відповідно плюс 15% і плюс 7,5% (тобто в два рази менше).

Поставлена мета досягається рішенням наступних задач:

- остаточним вибором марки сталі і плану шихтовки магнітопроводу;
- розрахунком геометричних розмірів і величини маси магнітопроводу;
- розрахунком втрат і струму неробочого ходу.

8.2. Марка сталі і план шихтовки

У сучасному трансформаторобудуванні при виготовленні силових трансформаторів застосовують тільки марки холоднокатаних сталей вітчизняного (3404, 3405, 3406, 3407, 3408) або зарубіжного (М6Х, М4Х) виробництва. Проте, в експлуатації знаходяться й трансформатори, магнітопровід яких виконаний з гарячекатаних сталей (1212...1413).

Обидва типи сталей називають електротехнічними, оскільки вміщують добавки кремнію (друга цифра в позначенні вказує процентний вміст кремнію). Відрізняються ці сталі умовами прокату, структурою і, найголовніше, різними параметрами: питомими втратами і питомими потужностями намагнічування.

Під питомими втратами в сталі магнітопроводу розуміють величину втрат, що виділяються в одному кілограмі маси при певній густині магнітного потоку (тобто індукції) і відомій частоті перемагнічування сталі ($f, Гц$). Позначають ці втрати – p , розмірність $Вт/кг$.

Аналогічно вводять поняття "питома намагнічуюча потужність", під якою розуміють повну потужність, необхідну для створення певної величини індукції при заданій частоті в перерізі магнітопроводу. Позначається питома намагнічувальна потужність – q , розмірність $(В \cdot А)/кг$.

У [1] і довідковій літературі приводяться таблиці, в яких для частоти 50 $Гц$

(частіше всього) і різних марок сталі, дані чисельні значення p і q залежно від величини індукції з урахуванням товщини листа сталі магнітопроводу.

Вибрана сталь з меншими p і q дорожче, але дозволяє за інших рівних умов понизити масу магнітопроводу, зменшити габарити і струм неробочого ходу, підвищити ККД, зменшити величину втрат н.х.

В процесі розрахунку магнітного кола можливий вибір марки сталі, що відрізняється від раніше прийнятої. Це рішення може диктуватися необхідністю виконання вимог до p_0 і i_0 , або економічними міркуваннями.

На величини p_0 і i_0 , а також на вартість виготовлення магнітопроводу впливають форми кутів пластин, з яких шихтується магнітопровід. Це обумовлено тим, що холоднокатані сталі мають менші p і q уздовж прокату, а при відхиленні магнітних силових ліній від напрямку прокату приводять до збільшення їх в 1,5...2 рази. Цією властивістю обумовлена строга вимога здійснювати різку пластин, з яких шихтується магнітопровід, уздовж прокату.

Проте, в місцях стику пластин уздовж осей стрижнів і ярем (кутах) має місце відхилення магнітних силових ліній поля від напрямку прокату. Це приводить до збільшення в цих місцях питомих втрат і намагнічуючих потужностей. Найбільші ці показники при прямих кутах (рис. 8.1а), найменші – при косих (рис. 8.1б). Частіше застосовують комбіновані стики (рис. 8.1в), як компроміс між вартістю у виготовленні і величиною питомих показників.

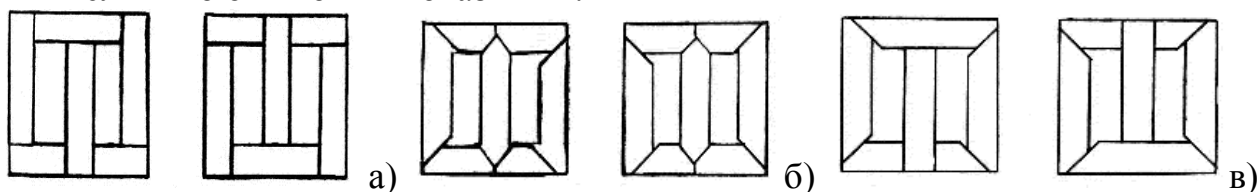


Рис. 8.1.

Аналітичне визначення збільшення p і q в кутках складне, тому їх величину залежно від форми і кількості видів кутів задають відповідними коефіцієнтами [1].

Тут треба звернути увагу на те, що збільшення p і q в кутах обумовлено відхиленням магнітних силових ліній від напрямку прокату в площині пластин.

Разом з тим, особливо відзначимо, що при шихтовці пакетів перекриття стиків в кутах здійснюють через один або два шари. У місцях стику утворюються немагнітні проміжки (повітряні проміжки або проміжки, заповнені трансформаторним маслом). Основа частина магнітних силових ліній огинає ці "повітряні зазори" в напрямі перпендикулярному площині пластин, рис. 8.2. Це викликає додаткове збільшення питомих втрат і намагнічуючих потужностей в сталі цих ділянок стиків внаслідок неспівпадіння напрямку потоку і прокату. Щоб відрізнити ці втрати і намагнічуючі потужності від перелічених вище, їх назвали "втрати в повітряному проміжку" і "намагнічуюча потужність в повітряному проміжку".

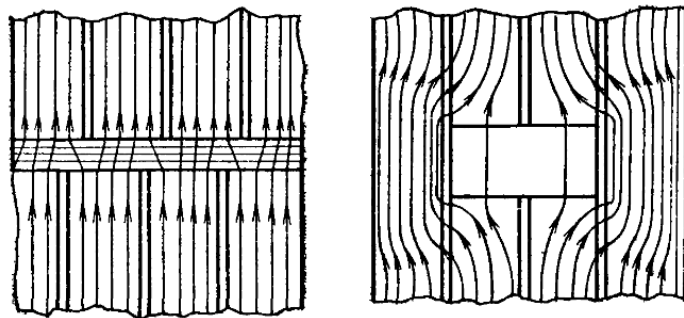


Рис. 8.2.

Необхідно відразу відзначити, що термін "втрати у повітряному проміжку" є некоректним, оскільки втрат активної потужності в повітряному проміжку (немагнітний проміжок) не може бути.

Залежно від марки сталі і величини індукції в стику для стандартної частоти питомі показники в проміжку приведені в таблицях [1], позначаються p_z і q_z і мають відповідно розмірність Bm/m^2 і $(B \cdot A)/m^2$.

Приступаючи до визначення геометричних розмірів, слід визначитися з механічним кріпленням магнітопроводу.

Зокрема, стягування верхніх і нижніх ярем здійснюється за допомогою шпильок або пресуючих пластин. Наявність останніх зменшує коефіцієнт заповнення круга і, при тому ж діаметрі стрижня, збільшує індукції в ньому. При цьому ростуть p_0 і i_0 . Пресуюча пластина знаходить застосування внаслідок ряду переваг механічного характеру.

8.3. Розрахунок геометричних розмірів і маси магнітопроводу

Найбільш поширена магнітна система силових трифазних трансформаторів – плоска. Для цієї системи нижче приводиться послідовність визначення геометричних розмірів і маси.

Спочатку необхідно уточнити переріз стрижня і ярма, які були прийняті раніше. З цією метою остаточно приймають кількість ступенів і розмірів пакетів в стрижні і ярмі, використовуючи рекомендації таблиць 8.2-8.5 [1]. Кількість ступенів в цих таблицях рекомендується з економічно доцільного поєднання величини коефіцієнта заповнення круга і витрат на виготовлення кількості ступенів (розмірів пластин). Ширина пакетів a і товщина b з таблиць дозволяють забезпечити найбільший коефіцієнт заповнення круга ступінчастою фігурою для вибраної кількості ступенів.

Кількість пакетів (ступенів) в ярмі менше, але переріз ярма в 1,02...1,05 рази більше за рахунок збільшення товщини крайніх пакетів.

На рис. 8.3 показано позначення розмірів стрижня і ярма, які знаходять з таблиць 8.2-8.5 [1].

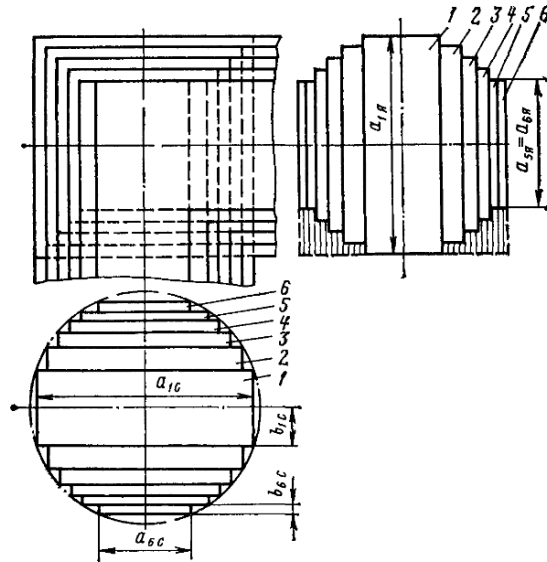


Рис. 8.3.

Переріз сталі стрижня знаходять, використовуючи вираз

$$\Pi_c = 2 \cdot K_z \cdot (a_{1c} \cdot v_{1c} + a_{2c} \cdot v_{2c} + \dots + a_{nc} \cdot v_{nc}), \quad (8.1)$$

де n – кількість ступенів стрижня; K_z – коефіцієнт заповнення сталлю ступінчастої фігури.

Аналогічно визначають переріз ярма Π_y .

Розраховані перерізи є уточненими (реальними), що дозволяють уточнити індукцію в стрижні:

$$B_c = \frac{U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_c}, \quad (8.2)$$

і в ярмі:

$$B_y = \frac{U_\phi}{4,44 \cdot f \cdot \Pi_y}. \quad (8.3)$$

Саме ці значення індукцій використовують надалі для визначення питомих втрат і намагнічуючих потужностей в стрижні і ярмі.

На рис. 8.4 приведені розміри плоскої трифазної магнітної системи. Розрахунку підлягають: L_c – висота стрижня, $C = D_2'' + a_{22}'$ – відстань між осями сусідніх стрижнів; h_y – висота ярма.

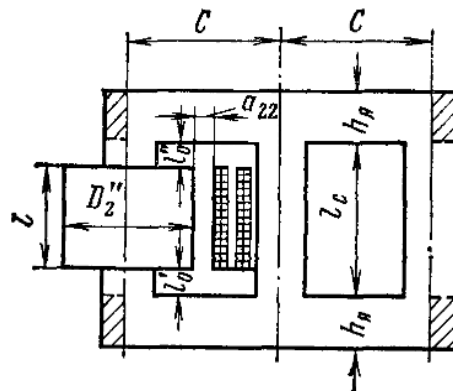


Рис. 8.4.

Висота стрижня

$$L_c = L_{обм} + L_0' + L_0'' \quad (8.4)$$

де $L_{обм}$ – висота обмотки (більш високої); L_0' і L_0'' – ізоляційні відстані, що визначаються за таблицею 4.5 [1]; для трансформаторів потужністю 1000÷6300 кВ·А L_0'' збільшують на 0,045 м, а для потужностей 10000÷63000 кВ·А до 0,08 м із-за застосування пресуючих кілець.

Висоту ярма $h_{я}$ приймають рівній $a_{1я}$ (рис. 8.3).

Знайдені розміри дозволяють знайти масу магнітної системи (чистої сталі) по окремих складових мас:

- стрижнів;
- ярем;
- кутів.

Маса сталі стрижнів дорівнює сумі

$$G_c = G_c' + G_c'' \quad (8.5)$$

де $G_c' = c \cdot P_c \cdot L_c \cdot \gamma_c$ – маса сталі стрижнів в межах розмірів вікна; c – кількість стрижнів; $G_c'' = c \cdot (P_c \cdot a_{1я} \cdot \gamma_{ст} - G_y)$ – маса сталі в місцях стику пакетів стрижня і ярма (заштриховані ділянки на рис. 8.3); $\gamma_{ст} = 7650 \text{ кг/м}^3$ – густина холоднокатаної сталі; G_y – маса одного кута, визначення якої приводиться нижче.

Маса сталі ярем складається з двох складових

$$G_{я} = G_{я}' + G_{я}'' \quad (8.6)$$

де $G_{я}' = 2(c-1) \cdot C \cdot P_{я} \cdot \gamma_{ст}$ – маса сталі ярем, розташованих між осями крайніх стрижнів; C – відстань між осями стрижнів; $G_{я}'' = 4G_y / 2 = 2G_y$ – маса стали кутів ярем, заштрихованих на рис. 8.4.

Для плоскої багатоступінчатої форми магнітопроводу маса одного кута

$$G_y = 2K_3 \cdot (a_{1c} \cdot a_{1я} \cdot b_{1c} + a_{2c} \cdot a_{2я} \cdot b_{2c} + \dots + a_{nc} \cdot a_{ня} \cdot b_{nc}) \gamma_{ст} \quad (8.7)$$

де n – кількість ступенів перетину стрижня.

У приведених виразах вхідні величини повинні мати розмірність системи СІ.

Повна маса сталі плоскої магнітної системи трансформатора

$$G_{ст.мп} = G_c + G_{я} \quad (8.8)$$

8.4. Розрахунок втрат і струму неробочого ходу

При розрахунку величин p_0 і i_0 знаходять суму, що складається з додатків, які знаходять для ділянок:

- стрижнів;
- ярем;
- кутів;

- стиків (повітряного зазору).

Вираз для визначення втрат неробочого ходу (при номінальній напрузі і під навантаженням) для плоскої трьохстрижневої магнітної системи з холоднокатаної сталі трифазного силового трансформатора

$$p_0 = [K_{n.p.} \cdot K_{n.з.} (p_c \cdot G_c + p_{я.} \cdot G_{я.}^l - 4p_{я.} \cdot G_y + \frac{p_c + p_{я.}}{2} \cdot K_{n.y.} \cdot G_y) + \sum p_3 \cdot n_3 \cdot \Pi_3] \cdot K_{n.я.} \cdot K_{n.n.} \cdot K_{n.ш.}, \quad (8.9)$$

де p_c (Bm/kg) – питомі втрати в сталі стрижнів, що визначаються по уточненій індукції в стрижні (8.2) для вибраної марки сталі з таблиць [1]; $p_{я.}$ (Bm/kg) – питомі втрати в сталі ярем, що визначаються подібно попередньому значенню, використовуючи (8.3); p_3 (Bm/m^2) – питомі втрати „в зазорі”, що визначаються за таблицями [1] з урахуванням індукцій, яку для прямих стиків, перпендикулярних осі стрижнів, приймають рівній індукції в стрижні (B_c), а для стиків, перпендикулярних осі ярма, приймають рівною індукції в ярмі ($B_{я.}$); для косих стиків індукцію у зазорі вважають $B_3 = B_c / \sqrt{2}$; n_3 – кількість однотипних кутів (проміжків); Π_3 – площа проміжку (стику), яка рівна при прямих стиках площі стрижня (Π_c) або ярма ($\Pi_{я.}$), а для косих стиків приймають $\Pi_3 = \sqrt{2} \cdot \Pi_c$; $G_c, G_{я.}^l, G_y$ – відповідно маси стрижнів, ярем і кутів, визначених за (8.5), (8.6), (8.7).

У вираз (8.9) входять коефіцієнти, які характеризують особливості конструкції і технології виготовлення. Їх чисельні значення приведені в §8.2 [1]. Нижче приведена розшифровка цих коефіцієнтів, що враховують збільшення втрат за рахунок впливу:

- $K_{n.p.}$ – різкі листів стали;
- $K_{n.з.}$ – наявності або відсутності заусениць;
- $K_{n.y.}$ – відхилення магнітних силових ліній від напрямку прокату в кутку і форму кута (рис. 8.5);

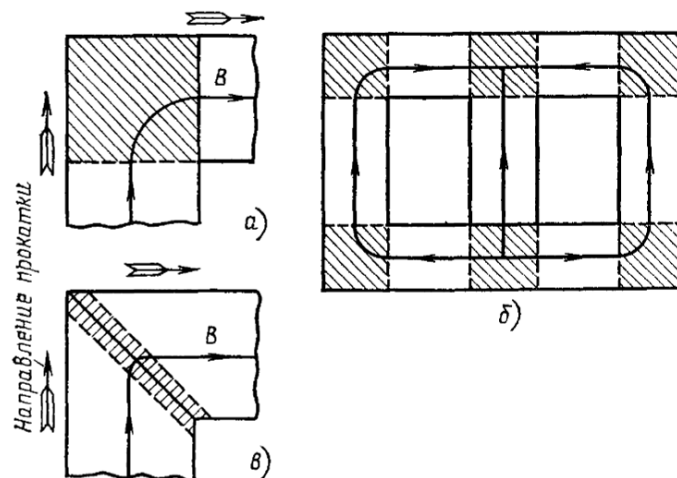


Рис. 8.5.

- $K_{n.я.}$ – форми перерізу ярма;
- $K_{n.n.}$ – пресування;
- $K_{n.ш.}$ – перешихтовки верхнього ярма.

Повна намагнічуюча потужність для того ж конструктивного виконання трансформатора має вираз за формою запису аналогічне (8.9)

$$q_0 = [K_{m.p.} \cdot K_{m.z.} (q_c \cdot G_c + q_y \cdot G_y' - 4q_y \cdot G_y + \frac{q_c + q_y}{2} \cdot K_{m.y.} \cdot K_{m.nl} \cdot G_y) + \sum q_z \cdot n_z \cdot P_z] \cdot K_{m.y.} \cdot K_{m.n.} \cdot K_{m.w}, \quad (8.10)$$

де q_c і q_y ($B \cdot A / \text{кг}$) – повні питомі намагнічуючі потужності у стрижні та ярмі, що визначаються за відповідними величинами індукцій з таблиць [1]; q_z ($B \cdot A / \text{м}^2$) – повна питома намагнічуюча потужність проміжків, що визначається з таблиць [1] і по індукціях відповідних p_z .

Решта величин такі ж, як і в (8.9), але чисельні значення коефіцієнтів відмінні і їх знаходяться в §8.2 [1], зміст цих коефіцієнтів такий же як і в (8.9), якщо замінити літеру індексу "n" на "m".

Розраховані втрати неробочого ходу p_0 не повинні відрізнятися від заданих стандартом більш плюс 7,5% і дозволяють визначити активну складову струму неробочого ходу

$$i_{0a} = \frac{p_0}{10 \cdot S_n} \%, \quad (8.11)$$

де p_0 має розмірність Вт , а номінальна потужність S_n - $\text{кВ} \cdot \text{А}$.

Повна намагнічуюча потужність визначає струм н.х.

$$i_0 = \frac{q_0}{10 \cdot S_n} \%, \quad (8.12)$$

де q_0 має розмірність $B \cdot A$, а S_n - $\text{кВ} \cdot \text{А}$.

Знайдене значення i_0 не повинне перевищувати плюс 15%, заданого стандартом.

Реактивна складова струму неробочого ходу

$$i_{0p} = \sqrt{i_0^2 - i_{0a}^2}. \quad (8.13)$$

Розрахунок магнітних систем трансформаторів інших конструкцій, наведений у главі 8 [1], виноситься на самостійну роботу при виконанні курсового проекту.

Розділ № 9. Тепловий розрахунок трансформатора

9.1. Мета й завдання теплового розрахунку

Втрати, що виділяються в обмотках, магнітопроводі й конструктивних елементах, проявляються у вигляді нагрівання цих частин конструкції трансформатора. У сталому тепловому режимі все тепло (або тепловий потік) трансформатора віддається в оточуюче середовище. При цьому температура нагрівання окремих частин конструкції (частіше обмоток) може перевищити припустиму й привести до порушення працездатності трансформатора.

Величина температури нагрівання залежить від температури оточуючого середовища. Оскільки ця температура коливається в широкому діапазоні, то вводять поняття "перевищення температури" над оточуючим середовищем, а температуру навколишнього середовища по рекомендаціям стандарту ГОСТ 11677-85 приймають 40°C.

Залежно від класу нагрівостійкості ізоляції, робочі властивості якої істотно залежать від нагрівання, і інших елементів конструкції вводять стандартами відповідні численні значення перевищення температур над навколишнім середовищем.

Метою теплового розрахунку трансформатора є визначення перевищень температур окремих елементів конструкції.

Поставлена мета для силового масляного трансформатора досягається вирішенням наступних завдань:

- визначенням перепадів температури між обмотками та магнітною системою, з одного боку, і маслом - з іншого;
- підбором конструкції й розмірів бака та системи охолодження, що забезпечують нормальну тепловіддачу всіх втрат при температурах обмоток, магнітної системи й масла, не перевищуючих припустимі температури;
- проведенням перевірного розрахунку перевищень температури обмоток, магнітної системи й масла над навколишнім повітрям.

Для силового трансформатора із природним масляним охолодженням нижче розглядається послідовність теплового розрахунку.

9.2. Процес теплопередачі трансформатора

Для успішного вирішення поставленої мети необхідно вказати ділянки перепаду температур і способи теплопередачі.

У загальному випадку в трансформаторі теплопередача здійснюється трьома способами:

- теплопровідністю, при якій передана кількість тепла

$$Q_{\lambda} = \lambda \cdot \Delta\Theta \cdot \frac{S}{L}, \quad (9.1)$$

де λ , Вт/(м·°C) – питома теплопровідність; $\Delta\Theta$, °C – перепад температур між границями входу й виходу теплового потоку взятої ділянки; S , м² – поверхня

(площа), через яку проходить тепловий потік; L , m – довжина розглянутої ділянки;
 - конвекцією (перенос тепла), при якій передана кількість тепла

$$Q_k = \alpha_k \cdot \Delta\Theta_k \cdot S_k, \quad (9.2)$$

де α_k , $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$ – коефіцієнт теплопередачі з поверхні S_k ; $\Delta\Theta_k$ – перепад (різниця) температури між поверхнею та омиваючим її охолодним агентом (повітря, масло і т.п.);

- випромінюванням (відвід тепла електромагнітними хвилями), при якій передана кількість тепла

$$Q_u = \alpha_u \cdot \Delta\Theta_u \cdot S_u, \quad (9.3)$$

де α_u , $Bm/(m^2 \cdot ^\circ C)$ – коефіцієнт випромінювання (або поглинання) з площі S_u ; $\Delta\Theta_u$ – перепад температури між нагрітою частиною й холодним навколишнім середовищем.

Процес теплопередачі в трансформаторі зручно зобразити у вигляді схеми, рис. 9.1.



Рис. 9.1.

Зазвичай, для трансформаторів потужністю до 63000 кВ·А перевіряють перепад температури між найбільш нагрітою точкою обмотки (ВН, НН і СН) і навколишнім середовищем (повітрям)

$$\Delta\Theta_{o.в.} = \Delta\Theta_o + \Delta\Theta_{o.м.} + \Delta\Theta_{м.б.} + \Delta\Theta_{б.в.}, \quad (9.4)$$

а температура нагрівання складе

$$\Theta_o = \Delta\Theta_{o.в.} + 40^\circ\text{C}, \quad (9.5)$$

яка повинна бути не більше припустимої температури для застосованого класу нагрівостійкості ізоляції обмоток.

Таким чином, тепловий розрахунок зводиться до перевірки допустимості нагрівання найбільш нагрітої частини конструкції. Зазвичай, це - обмотки.

9.3. Розрахунок перевищень температур усередині та на поверхні обмоток

Аналітичні вирази для визначення перепаду температур усередині обмоток залежать від їхньої конструкції.

Розглянемо багат шарову циліндричну обмотку, рис. 9.2а, прийнявши наступні умови:

- у напрямку вертикальної осі y обмотка має значний розмір, що забезпечує відсутність тепловіддачі в цьому напрямку, все тепло віддається в напрямках осі x ;
- обмотка являє собою однорідне тіло плоскої форми з однаковою теплопровідністю у всіх точках поперечного перерізу;
- з обох сторін обмотки обмивається трансформаторним маслом рівної температури;
- питомі втрати на одиницю об'єму незмінні і рівні $p, \text{Вт}/\text{м}^3$.

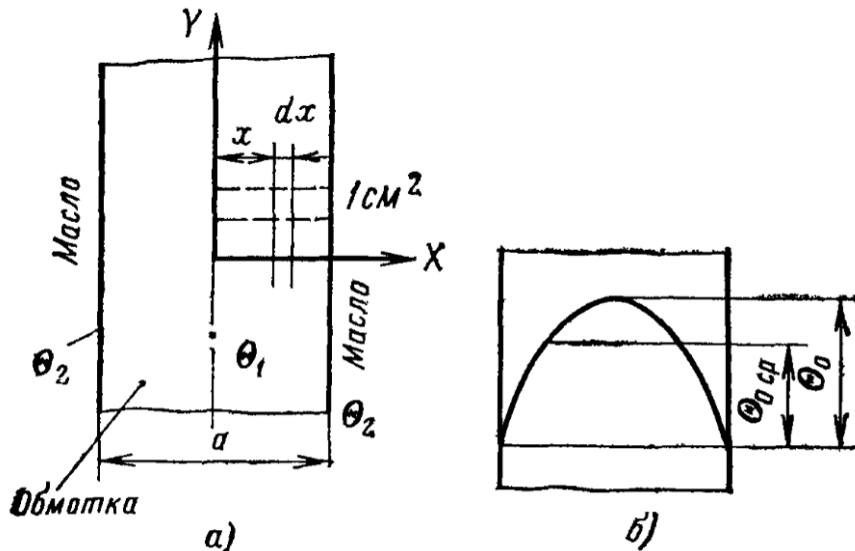


Рис. 9.2.

На рис. 9.2а виділимо трубку теплового потоку з одиничним перерізом, тоді тепловий потік (або потужність) на відрізок x дорівнює

$$P = px, \quad (9.6)$$

а перепад температури на елементі dx на підставі виразу (9.1)

$$d(\Delta\Theta_o) = \frac{Q_x \cdot dx}{\lambda \cdot S_x}. \quad (9.7)$$

З огляду на те, що $Q_x = px$, і $S_x = 1$, одержимо

$$d(\Delta\Theta_o) = \frac{px \cdot dx}{\lambda}. \quad (9.8)$$

Інтегруючи (9.8) для ділянки шляху теплового потоку від $x=0$ до $x=a/2$, одержуємо

$$\Delta\Theta_o = \Theta_1 - \Theta_2 = \frac{p}{\lambda} \int_0^{a/2} x dx = pa^2 / (8\lambda), \quad (9.9)$$

звідки слідує розподіл перепаду температури по перерізу обмотки, рис. 9.2б.

При розрахунках нагрівання циліндричних обмоток, використовуючи (9.9), приймають усереднене значення

$$\Delta\Theta_{o.c.p.} = \frac{2}{3} \Delta\Theta_o. \quad (9.10)$$

Слід зазначити, що коефіцієнт λ , що входить в (9.9), є усередненим, залежить від форми перерізу провідників обмотки. Розрахункові вирази для λ наведені в [1].

При розрахунках в (9.9) необхідно використовувати найбільшу ширину котушки, якщо обмотка має осьовий охолоджуючий канал, а також враховувати можливість закриття охолодженої поверхні ізоляційними циліндрами [1].

Внутрішній перепад малошарових циліндричних, гвинтових і безперервних спіральних котушкових обмоток визначається простіше. Використовуючи рис. 9.3 і (9.1), знаходять

$$\Delta\Theta_o = q \cdot \delta / \lambda_{i3}, \quad (9.11)$$

де $q=Q/S$ – щільність теплового потоку, $Вт/м^2$; δ – однобічна товщина ізоляції прямокутного проводу, $м$; λ_{i3} – питома теплопровідність ізоляції, $Вт/(м \cdot ^\circ C)$.

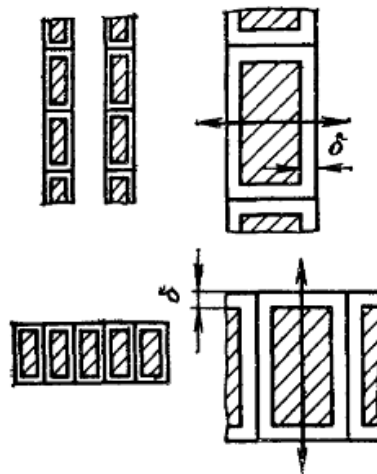


Рис. 9.3.

Перепад температури поверхні обмоток над охолоджуючим маслом неможливо визначити, використовуючи (9.2), тому що в міру руху нагору охолоджуючого масла змінюється величина температури перепаду. На це впливають тип обмоток, розташування охолоджуючих каналів (горизонтальний або вертикальний, радіальний або осьовий) і ряд інших факторів. У зв'язку з цим, при розрахунках застосовують вирази, отримані на підставі експериментів і підтверджені практикою.

Перепад температури поверхні обмоток над охолоджуючим маслом при відсутності радіальних (горизонтальних) охолоджуючих каналів

$$\Delta\Theta_{o.m.} = k \cdot q^{0,6}, \quad (9.12)$$

де $k = 0,285$.

Перепад температури поверхні обмоток, над охолоджуючим маслом при наявності радіальних каналів охолодження

$$\Delta\Theta_{o.m.} = \kappa_1 \cdot \kappa_2 \cdot \kappa_3 \cdot 0,35q^{0,6}, \quad (9.13)$$

де κ_1 -коефіцієнт, що враховує швидкість руху масла усередині обмотки [1]; κ_2 -коефіцієнт, що враховує ускладнення руху масла в обмотках [1]; κ_3 -коефіцієнт, що враховує геометрію каналу, таблиця 9.3 [1].

Знайдені перевищення дозволяють визначити середнє перевищення температури обмотки над температурою масла

$$\Delta\Theta_{o.m.c.p.} = \Delta\Theta_{o.c.p.} + \Delta\Theta_{o.m.} \quad (9.14)$$

9.4. Тепловий розрахунок бака

Активна частина трансформатора міститься в баку, ескіз якого наведений на рис. 9.4.

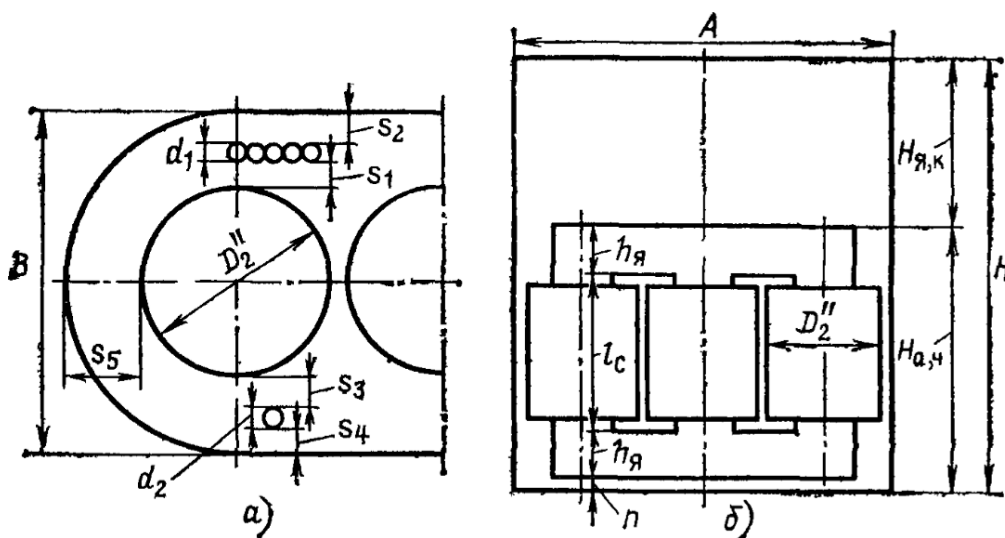


Рис. 9.4.

При виборі конструкції бака для трансформатора головну увагу варто звертати на гарну тепловіддачу, механічну міцність, простоту у виготовленні й по можливості менший зовнішній габарит.

Розміри активної частини трансформатора визначені раніше й відомі. Ізоляційні проміжки s_1, s_2, s_3, s_4 і s_5 вибирають із умов електричної міцності по таблицях 4.11 і 4.12 [1], виходячи з величини випробувальних напруг. Величини d_1 і d_2 приймають із урахуванням товщини відводів ВН і НН.

Перераховані розміри дозволяють визначити ширину бака

$$B = D_2'' + (s_1 + s_2 + s_3 + s_4 + d_1 + d_2), \quad (9.15)$$

і довжину бака для трифазного трансформатора

$$A = 2C + D_2'' + 2s_5. \quad (9.16)$$

Загальна глибина бака (рис. 9.4)

$$H_{\delta} = H_{a.ч.} + H_{я.к.}, \quad (9.17)$$

де $H_{a.ч.}$ – висота активної частини; $H_{я.к.}$ – відстань від верхнього ярма до кришки бака, обрана по таблиці 9.5 [1].

Висота активної частини визначається

$$H_{a.ч.} = L_c + 2h_{я} + n, \quad (9.18)$$

$n = 3 \dots 5$ см – товщина прокладки під нижнє ярмо.

Розміри бака дозволяють визначити поверхні конвекції стінок і кришки бака. Для овального бака поверхні конвекції вертикальних стінок бака

$$P_{к.б.} = [2 \cdot (A - B) + \pi B] H_{\delta}, \quad (9.19)$$

Поверхня конвекції кришки бака

$$P_{к.кр.} = 0,5 \cdot [(A - B) \cdot (B + \Delta B) + \pi (B + \Delta B)^2 / 4], \quad (9.20)$$

де $\Delta B = 10 \dots 20$ см – подвоєна ширина верхньої рами бака; 0,5 – коефіцієнт, що враховує ефективність охолодження конвекцією кришки бака.

Далі приймають орієнтовно поверхню випромінювання бака. Для бака з навісними радіаторами

$$P_u = P_{к.б.} \cdot k, \quad (9.21)$$

де $k = 1,5 \dots 2,0$ – коефіцієнт, що враховує співвідношення поверхні випромінювання до гладкої частини бака при навісних радіаторах [1].

Потім розрахунок зводиться до визначення необхідної повної поверхні конвекції

$$\sum P'_k = P_{к.б.} + P_{к.кр.} + P_{к.р.}, \quad (9.22)$$

звідки знаходиться необхідна поверхня конвекції радіаторів $P_{к.р.}$, використовуючи рівняння теплового балансу для стінок бака.

Рівняння складається з урахуванням експериментальних виразів для теплового потоку, що віддається з одиниці поверхні ($Вт/м^2$). Для теплопередачі випромінюванням ця величина для температур повітря $20 \dots 70^\circ C$

$$q_u = 2,8 \cdot \sqrt[4]{\Delta \Theta_{\delta.в.}}, \quad (9.23)$$

а для теплопередачі конвекцією

$$q_k = 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta \Theta_{\delta.в.}}, \quad (9.24)$$

де $\Delta \Theta_{\delta.в.}$ – перепад температур між баком і повітрям, що задається попередньо.

З урахуванням (9.23) і (9.24) рівняння теплового балансу для бака

$$\sum p = (p_0 + p_k + p_{дооб}) = 2,8 \cdot \sqrt[4]{\Delta \Theta_{\delta.в.}} \cdot P_u + 2,5 \cdot \sqrt[4]{\Delta \Theta_{\delta.в.}} \cdot \sum P'_k, \quad (9.25)$$

Для масляних силових трансформаторів клас нагрівостійкості – "А" (найбіль-

ша припустима температура нагрівання 105°C , а перепад температури над навколишнім середовищем $105-40=65^{\circ}\text{C}$). Тривало припустиме перевищення масла в баку над навколишнім середовищем

$$\Delta\Theta_{\text{м.в.}} = 65 - \Delta\Theta_{\text{о.ср.}} - \Delta\Theta_{\text{о.м.}}, \quad (9.26)$$

де значення $\Delta\Theta_{\text{о.ср.}}$ і $\Delta\Theta_{\text{о.м.}}$ беруть для найбільш нагрітої обмотки.

З вимоги стандарту до перевищення температури масла у верхніх шарах не більше 60°C слідує, що

$$\Delta\Theta_{\text{м.в.в.}} = 1,2\Delta\Theta_{\text{м.в.}} \leq 60^{\circ}\text{C} \text{ або } \Delta\Theta_{\text{м.в.}} \leq 50^{\circ}\text{C} \quad (9.27)$$

При виконанні умови (9.27) приймають

$$\Delta\Theta_{\text{б.в.}} = \Delta\Theta_{\text{м.в.}} - \Delta\Theta_{\text{м.б.}} = 50^{\circ}\text{C} - (5...6)^{\circ}\text{C}, \quad (9.28)$$

Величину $\Delta\Theta_{\text{б.в.}}$ з (9.28) підставляють в (9.25) і знаходять необхідну поверхню конвекції

$$\sum P'_k = \sum p / (2,5 \cdot \Delta\Theta_{\text{б.в.}}^{1,25}) - 1,25 \cdot P_u. \quad (9.29)$$

Далі визначають необхідну поверхню конвекції радіаторів, використовуючи (9.22) $P_{\text{к.р.}} = \sum P'_k - P_{\text{к.б.}} - P_{\text{к.кр.}}$, потім із таблиць уніфікованих розмірів радіаторів вибирають підходящий радіатор, поверхню конвекції якого приводять до поверхні конвекції гладкої стінки $P'_{\text{к.р.}}$ [1], і визначають кількість радіаторів

$$n_p = P_{\text{к.р.}} / P'_{\text{к.р.}} \quad (9.30)$$

округливши n_p до більшого цілого числа.

Потім уточнюють поверхню конвекції радіаторів.

При виборі числа радіаторів необхідно перевірити можливість їхнього розміщення навколо бака, для чого намалювати ескіз, що також необхідний для уточнення поверхні випромінювання.

9.5. Остаточний розрахунок перевищень температур

Цей розрахунок проводиться при остаточно прийнятих розмірах бака й кількості радіаторів.

Однак, попередньо уточнюються еквівалентна поверхня випромінювання (рис. 9.5) і повна поверхня конвекції.

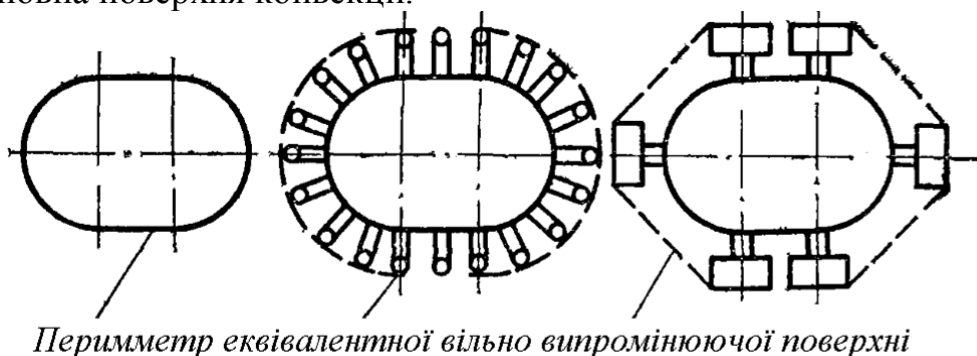


Рис. 9.5.

Тоді уточнене перевищення температури стінки бака над температурою навколишнього повітря

$$\Delta\Theta_{\bar{o}.v.} = \left[\frac{K(p_x + p_k)}{2,8\Pi_u + 2,5\Pi_k} \right]^{0,8}, \quad (9.31)$$

де $K = 1,05 \dots 1,10$.

Перевищення температури масла над температурою стінки бака

$$\Delta\Theta_{m.\bar{b}.} \approx K_1 \cdot 0,165 \cdot \left[\frac{K(p_x + p_k)}{\sum \Pi_k} \right]^{0,6}, \quad (9.32)$$

де $K_1 = 1,0$ для природного масляного охолодження.

Перевищення температури обмоток над температурою оточуючого повітря визначають для кожної обмотки як

$$\Delta\Theta_{o.v.} = \Delta\Theta_{o.c.p.} + \Delta\Theta_{o.m.} + \Delta\Theta_{m.\bar{b}.} + \Delta\Theta_{\bar{o}.v.}. \quad (9.33)$$

Для класу нагрівостійкості ізоляції А чисельне значення повинне бути $\Delta\Theta_{o.v.} \leq 65^\circ\text{C}$. При значеннях $\Delta\Theta_{o.v.}$ менш 60°C необхідно зменшити поверхню охолодження бака або кількість труб радіатора.

Подальші питання, що виникають при проектуванні трансформаторів, виносяться для самостійного вивчення в процесі виконання курсового проекту.

Список літератури

1. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергия, 1976. – 544 с.
2. Постников И.М. Проектирование электрических машин. – Киев: Гостехиздат УССР, 1960. – 910 с.
3. Сапожников А.В. Конструирование трансформаторов. – М., Л.: Госэнергоиздат, 1959. – 360 с.
4. Филиппишин В.Я., Туткевич А.С. Монтаж силовых трансформаторов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 432 с.