

**Міністерство освіти і науки України
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова
Херсонська філія**

Енерготехнічний факультет
Кафедра автоматики та електроустаткування

Рекомендовано до захисту
Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування
_____ Михальченко П.Є.
«____» _____ 20__ року

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА

до кваліфікаційної роботи магістра

на тему: Удосконалення трансформатора фазового компаундування системи
автоматичного регулювання збудження суднового синхронного генератора

Виконав: здобувач VI курсу, групи 6367зм
за спеціальністю: 141 "Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма:
«Експлуатація суднових автоматизованих
систем»

(назва)

Попов Д.А.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Керівник Ставинський Р.А.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

Рецензент Шарейко Д.Ю.

(прізвище та ініціали)

(підпис)

м. Херсон – 2020 р.

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова
Херсонська філія

Інститут, факультет Енерготехнічний

Кафедра Автоматики та електроустаткування

Освітньо-кваліфікаційний рівень другий (магістерський)

Галузь знань 14 "Електрична інженерія"

(шифр і назва)

Спеціальність 141 "Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка"

(шифр і назва)

Освітньо-професійна програма "Експлуатація суднових автоматизованих систем"

(назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

**Завідувач кафедри автоматики та
електроустаткування**

Михальченко П.Є.

“ _____ ” _____ 20__ року

**ЗАВДАННЯ
НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ МАГІСТРА**

Попов Дмитро Володимирович

1. Тема проекту: Удосконалення трансформатора фазового компаундування системи автоматичного регулювання збудження суднового синхронного генератора.

Науковий керівник: к.т.н., доцент Ставинський Р.А.

Затверджена наказом ХФНУК від _____ року № _____.

2. Строк подання студентом роботи:

3. Об'єкт дослідження: трансформатор з номінальною потужністю 53 кВА, кількість фаз $m = 3$; частота струму мережі: $f = 50$ Гц; номінальні напруги: $U_1 = 19,2$ В; $U_{21} = 400$ В; $U_{21} = 235$ В.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік задач, які потрібно вирішити):

4.1. Системи і обладнання автоматичного регулювання напруги та розробка структурної схеми генератора типу МСК.

4.2. Аналіз конструкторсько-технологічних рішень трифазних трансформаторів.

4.3. Розрахунок трансформатора фазового компаундування з алюмінієвою обмоткою.

4.4. Розрахунок трансформатора фазового компаундування з мідною обмоткою.

4.5. Охорона праці.

4.6. Охорона навколишнього середовища.

Перелік графічного матеріалу:

1. Принципова електрична схема системи збудження генератора.
2. Принципова електрична схема блоку генератор-трансформатор.
3. Конструктивна схема системи автоматичного регулювання збудження синхронного генератора.
4. Активна частина стрижневого трифазного трансформатора.
5. Конструктивні схеми просторових електромагнітних систем.
6. Варіанти активної частини просторових трифазних трансформаторів.
7. Варіанти активної частини просторового трансформатора з паралельними стінками обмоткових вікон.
8. Загальний вигляд просторового трансформатора фазового компаундування.

Дата видачі завдання: __.__.20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН
виконання випускної роботи

Найменування розділів	Строк виконання	Відмітка про виконання
1. Системи і обладнання автоматичного регулювання напруги та розробка структурної схеми генератора типу МСК.		
2. Аналіз конструкторсько-технологічних рішень трифазних трансформаторів.		
3. Розрахунок трансформатора фазового компаундування з алюмінієвою обмоткою.		
4. Розрахунок трансформатора фазового компаундування з мідною обмоткою.		
5. Охорона праці.		
6. Охорона навколишнього середовища.		

Здобувач _____ Попов Д.А.
(підпис)

Науковий керівник _____ к.т.н., доцент Ставинський Р.А.
(підпис)

АНОТАЦІЯ

У дипломної роботі виконані проектні розрахункові дослідження трифазного триобмоткового трансформатора фазового компаундування при використанні схеми симетричного просторового магнітопроводу, виконано порівняльний аналіз двох трансформаторів з мідною та алюмінієвою обмотками.

В першому та другому розділах зроблено аналіз технічних рішень забезпечення підтримки постійної напруги синхронного генератора та розроблено функціональну та принципову схеми системи автоматичного регулювання збудження суднового синхронного генератора. Розраховано основні данні трансформатору на основі сталих режимів роботи суднового генератора. Виконано аналіз технічних рішень трифазних трансформаторів, на основі якого обрано раціональну конфігурацію та оптимальні співвідношення розмірів активної частини трансформатора з витим стиковим магнітопроводом. У третьому та четвертому розділах приведені розрахунки варіантів вказаного трансформатора з симетричним просторовим магнітопроводом та з мідною і алюмінієвою обмотками.

ANNOTATION

In the diploma work the design calculation researches of the three-phase three-winding transformer of phase compounding using the scheme of a symmetrical spatial magnetic circuit are executed, the comparative analysis of two transformers with copper and aluminum windings is executed.

In the first and second sections the analysis of technical decisions of maintenance of maintenance of a constant voltage of the synchronous generator is made and the functional and basic scheme of system of automatic regulation of excitation of the ship synchronous generator is developed. The basic data of the transformer are calculated on the basis of constant modes of operation of the ship generator. The analysis of technical solutions of three-phase transformers is performed, on the basis of which the rational configuration and optimal ratios of the sizes of the active part of the transformer with the twisted butt magnetic circuit are chosen.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
1. СИСТЕМИ І ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ І ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ГЕНЕРАТОРА ТИПУ МСК	9
1.1. Характеристики регулювання систем збудження генераторів	9
1.2. Аналіз систем автоматичного регулювання збудження генераторів	12
1.3. Структурна та принципова електрична схеми системи збудження суднового генератора типу МСК	24
1.4. Налаштування системи збудження синхронних генераторів	27
1.5. Призначення і види трансформаторів фазового компаундування	31
1.6. Розрахунок системи фазового компаундування виходячи зі сталих режимів СГ. Попередній розрахунок параметрів ТФК	36
1.7. Висновки до розділу 1	39
2. АНАЛІЗ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ	40
2.1. Магнітні системи трифазних трансформаторів. Аналіз питомої матеріалоемності існуючих конструкцій активної частини трифазних трансформаторів	40
2.2. Технічні рішення активної частини трансформатора малої потужності з просторовим магнітопроводом	47
2.3. Висновки до розділу 2	55
3. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОВОГО КОМПАУНДУВАННЯ З АЛЮМІНІЄВОЮ ОБМОТКОЮ	56
3.1. Визначення головних розмірів і геометричних співвідношень з оптимізацією за критерієм мінімуму маси	56
3.2. Розрахунок розподілу індукції в технологічному зазорі та струму неробочого руху	64
3.3. Розрахунок втрат неробочого руху	67
3.4. Визначення втрат короткого замикання та характеристик	69

4. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОВОГО КОМПАУНДУ-	
ВАННЯ З МІДНОЮ ОБМОТКОЮ	73
4.1. Визначення головних розмірів і геометричних співвідношень з опти-	
мізацією за критерієм мінімуму маси	73
4.2. Розрахунок магнітного кола трансформатора	80
4.3. Розрахунок втрат неробочого руху	83
4.4. Визначення втрат короткого замикання та характеристик	85
5. ОХОРОНА ПРАЦІ	89
Вступ	89
5.1. Аналіз впливу небезпечних та шкідливих виробничих факторів	91
5.2. Розрахункова частина	96
5.3. Заходи з техніки безпеки	100
6. ОХОРОНА НАВКОЛИШНЬОГО СЕРЕДОВИЩА	103
Вступ	103
6.1. Забруднення Світового Океану	104
6.2. Розробка заходів щодо запобігання забрудненню навколишнього се-	
редовища	106
ЗАГАЛЬНИЙ ВИСНОВОК	107
ЛІТЕРАТУРА	108

ВСТУП

У дипломній роботі розглядаються питання підвищення технічного рівня системи автоматичного регулювання збудження (АРЗ) суднового синхронного генератору за рахунок впровадження трансформатора фазового компаундування зниженої матеріалоємності.

Вказані системи АРЗ знайшли широке застосування в суднових електроенергетичних системах, що дозволило поліпшити статичні і динамічні характеристики регулювання збудження, зменшити масогабаритні показники, забезпечити достатню надійність в експлуатації генератора агрегату.

Судновою електроенергетичною системою називається сукупність електричних пристроїв, об'єднаних процесом виробництва, перетворення і розподілення електроенергії, призначеної для живлення суднових приймачів та від її нормального функціонування залежить уся життєдіяльність сучасного судна.

У процесі роботи суднової електроенергетичної системи відбувається безупинна зміна навантаження споживачів і зміна потужності генератора, що віддається. Ці зміни викликають відхилення напруги в системі, і якщо відсутній процес регулювання, то якість в електричній енергії, що виробляється генератором, погіршується. Зайві навантаження генератора суднової електроенергетичної системи мають випадковий характер. При цьому ефективне ручне регулювання струму генератора практично неможливо. Подібну дію в таких умовах можна виконувати тільки за допомогою автоматичних регуляторів.

При розгляданні існуючих систем автоматичного регулювання збудження синхронного генератору визначено, що фазове компаундування є найкращім способом регулювання збудження синхронного генератора. В якості регулятора стабільності напруги доцільно використовувати трансформатор фазового компаундування.

Трансформатори фазового компаундування є одним з основних елементів, який впливає на продуктивність системи автоматичного регулювання збудження, на її ефективність і коефіцієнт корисної дії. Отже від того на скільки ефективним

і економічно вигідним буде використання даного трансформатора, залежить робота суднової електроенергетичної системи, а значить і життєдіяльність судна.

Актуальність теми. Виробництво і випуск трифазних трансформаторів малої та середньої потужності в різних країнах характеризується величезними витратами активних матеріалів – листової електротехнічної сталі, міді, алюмінію й ізоляційних матеріалів. До даних трансформаторів і особливо до тих з них, що призначені для електричних систем і комплектів транспортних засобів, пред'являються вимоги мінімально можливих масогабаритних і підвищених енергетичних показників. Ця вимога може бути виконана за допомогою використання нетрадиційної просторової електромагнітної системи трансформатора замість планарної.

З огляду на усе вище сказане, можна зробити висновок про те, що завдання розробки і виробництва трифазних трансформаторів зі зниженими витратами сталі і міді є важливим і актуальним.

Мета і задачі дослідження. Робота направлена на вирішення питання можливості удосконалення системи автоматичного регулювання збудження суднового синхронного генератора.

Для досягнення поставленої мети в магістерській роботі визначені і вирішені такі задачі:

- аналіз систем і обладнання автоматичного регулювання напруги та розробка структурної схеми генератора типу МСК;
- аналіз конструкторсько-технологічних рішень трифазних трансформаторів;
- обґрунтування конструкторсько-технологічних рішень трансформатора з нетрадиційною конфігурацією елементів активної частини;
- розрахунки варіантів трансформатора фазового компаундування.

Також в роботі розглянуті екологічні питання та питання охорони праці.

Об'єкт дослідження – трифазні силові трансформатори спеціального виконання.

Предмет дослідження – показники технічного рівня варіантів електромагнітних систем (ЕМС) трансформаторів з традиційною і перетвореною структурою активних елементів.

Наукова новизна одержаних результатів:

- визначено вплив заміни триобмоткового трансформатора фазового компанування системи регулювання збудження суднового синхронного генератора класичного виконання на просторовий трансформатор з паралельними стінками обмоткових вікон.

1. СИСТЕМИ І ОБЛАДНАННЯ АВТОМАТИЧНОГО РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ ТА РОЗРОБКА СТРУКТУРНОЇ І ПРИНЦИПОВОЇ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СХЕМИ ГЕНЕРАТОРА ТИПУ МСК

1.1. Характеристики регулювання систем збудження генераторів

В даний час у суднобудуванні, а саме в суднових електроенергетичних системах (СЕЕС) знайшли широке застосування автоматичні регулятори збудження (АРЗ). Це обумовлено низкою причин, основною з яких є стабільна та надійна робота суднових електричних споживачів, яка може бути забезпечена в тому випадку, коли напруга в системі зі зміною режиму роботи зберігається на визначеному рівні при припустимому відхиленні від нормального значення.

Для відновлення напруги в системі після її зниження в нормальному чи аварійному режимах, необхідно зробити зміну збудження генераторів. Дослідження і досвід експлуатації СЕЕС показали, що системи АРЗ мають велике значення для забезпечення надійної роботи суднового електрообладнання.

Ручне регулювання збудження недостатньо ефективно як по точності, так і по швидкості. Економічний ефект від застосування автоматичного регулювання збудження дуже великий.

До пристроїв АРЗ у СЕЕС пред'являються більш високі вимоги до якості регулювання, чим до пристроїв промислових систем. Також пристрої регулювання повинні мати підвищену експлуатаційну надійність, а крім того, понижені габарити і вагу.

Іншими не менш важливими причинами використання пристроїв АРЗ в СЕЕС є наступні:

- висока якість регулювання збудження в сталих і перехідних режимах, яка може бути виконана тільки за допомогою АРЗ. Досягти такої якості за допомогою ручного регулювання збудження неможливо внаслідок уповільнення процесу регулювання.

- на працюючих генераторах системи АРЗ форсують збудження і при

цьому збільшують напругу на шинах системи, а генератор, що підключається, входить у синхронізм надійно і швидко. Швидка форсировка збудження до максимального (стельового) значення підвищує стійкість паралельної роботи генераторів, забезпечує швидке відновлення напруги після відключення коротких замикань і збереження в роботі асинхронних двигунів. Крім того, форсировка збудження генераторів дозволяє значно підвищити межі потужності, яка передається генераторам у систему.

Якість регулювання збудження генератора залежить від системи збудження і її характеристик.

Система регулювання збудження генератора може знаходитися чи в сталому стані, чи в перехідному.

У залежності від того, чи повернеться напруга генератора в новому сталому режимі до свого первісного значення, або прийме інше значення, розрізняють астатичні і статичні характеристики регулювання (рис. 1.1).

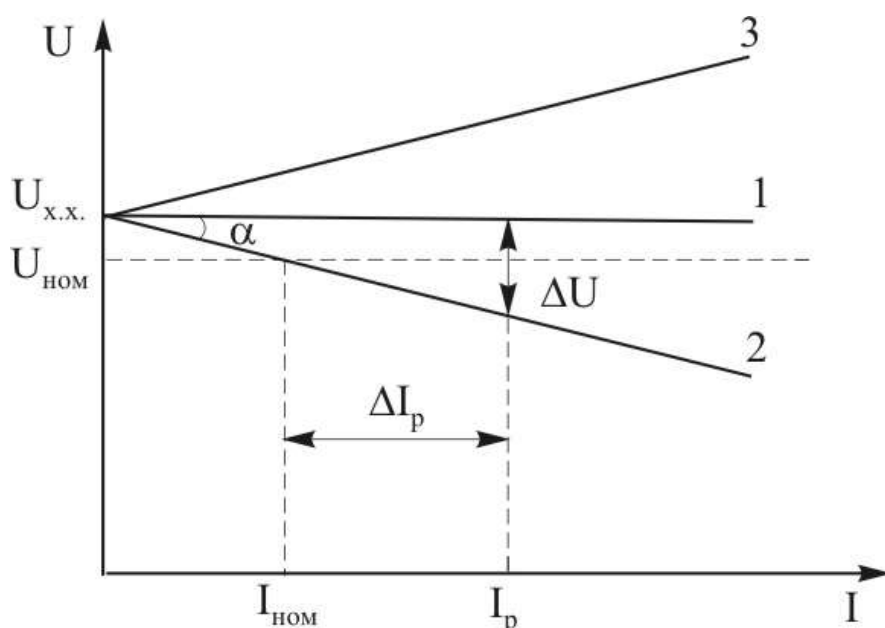


Рис. 1.1. Характеристики регулювання:

1 – астатичні, 2, 3 – статичні.

При регулюванні по астатичних характеристиках сталі значення напруги генератора залишається постійним незалежно від величини навантаження.

Основними властивостями системи регулювання порушення по астатичній характеристиці є те, що система знаходиться в сталому стані лише при одному значенні напруги генератора, яке неоднозначно пов'язано з навантаженням.

При регулюванні по статичній характеристиці величина напруги генератора зі зміною навантаження не залишається постійною. Ступінь зміни напруги при зміні навантаження визначається нахилом характеристик регулювання або коефіцієнтом статизма.

Згідно рис. 1.1 рівняння характеристики регулювання має вид:

$$U = U_{xx} - k_c I_p, \quad (1.1)$$

де U – напруга на виводах генератора при визначеному значенні реактивного струму I_p ; U_{xx} – напруга холостого ходу; k_c – коефіцієнт статизма характеристики регулювання.

Коефіцієнт статизма:

$$k_c = \frac{U_{x.x} - U_{ном}}{U_{x.x}} = \operatorname{tg} \alpha. \quad (1.2)$$

Співвідношення між збільшеннями напруги і реактивного струму визначається рівнянням:

$$\Delta U + k_c \Delta I_p = 0. \quad (1.3)$$

Розрізняють характеристики з позитивним коефіцієнтом статизма, коли напруга генератора зменшується при збільшенні реактивної навантаження (рис.1.1, крива 2), і з негативним коефіцієнтом статизма, коли напруга генератора збільшується при збільшенні реактивному навантаженні (рис. 1.1, крива 3).

Статична характеристика показує, наскільки стале значення напруги генератора буде відрізнятися від початкового значення. Ця відмінність визначається коефіцієнтом статизма чи так називаною статичною помилкою.

Основною властивістю системи регулювання збудження по статичній характеристиці є те, що система знаходиться в сталому стані при різних значеннях напруги генератора, яка обумовлена однозначно навантаженням. Кожному значенню навантаження відповідає своє значення напруги генератора.

1.2. Аналіз систем автоматичного регулювання збудження генераторів

За принципом регулювання розрізняють наступні основні системи автоматичного регулювання збудження

- з регулюванням по відхиленню регульованої величини (напруга генератора) – автоматичні регулятори напруги;
- з регулюванням по обурюванню (по струму статора генератора) - пристрої компаундування;
- з комбінованим регулюванням (по відхиленню регульованої величини і по збурюванню).

За способом впливу на збудження генератора автоматичні регулятори збудження, що застосовуються в СЕЕС, поділяються на три групи

- регулятори, що змінюють збудження генераторів за допомогою зміни опору в ланцюзі обмоток збудження збудників;
- регулятори, що змінюють збудження генераторів шляхом введення в обмотки збудження збудників додаткового струму підживлення, що залежить від відхилення регульованої величини і збурювання;
- регулятори, що діють на зміну збудження генераторів введенням струму підживлення, що залежить від відхилення регульованої величини і збурювання, безпосередньо в коло ротора.

До першої групи відноситься вугільний регулятор напруги, заснований на використанні електромеханічного принципу. Принципова схема включення вугільного регулятора зображена на рис. 1.2.

До другої групи відноситься електромагнітний регулятор (рис. 1.3) і система автоматичного регулювання збудження безщіткового синхронного генератора (рис. 1.4).

До третьої групи відноситься система самозбудження й автоматичного регулювання збудження генераторів, яка виконана за допомогою статичних пристроїв (рис. 1.5)

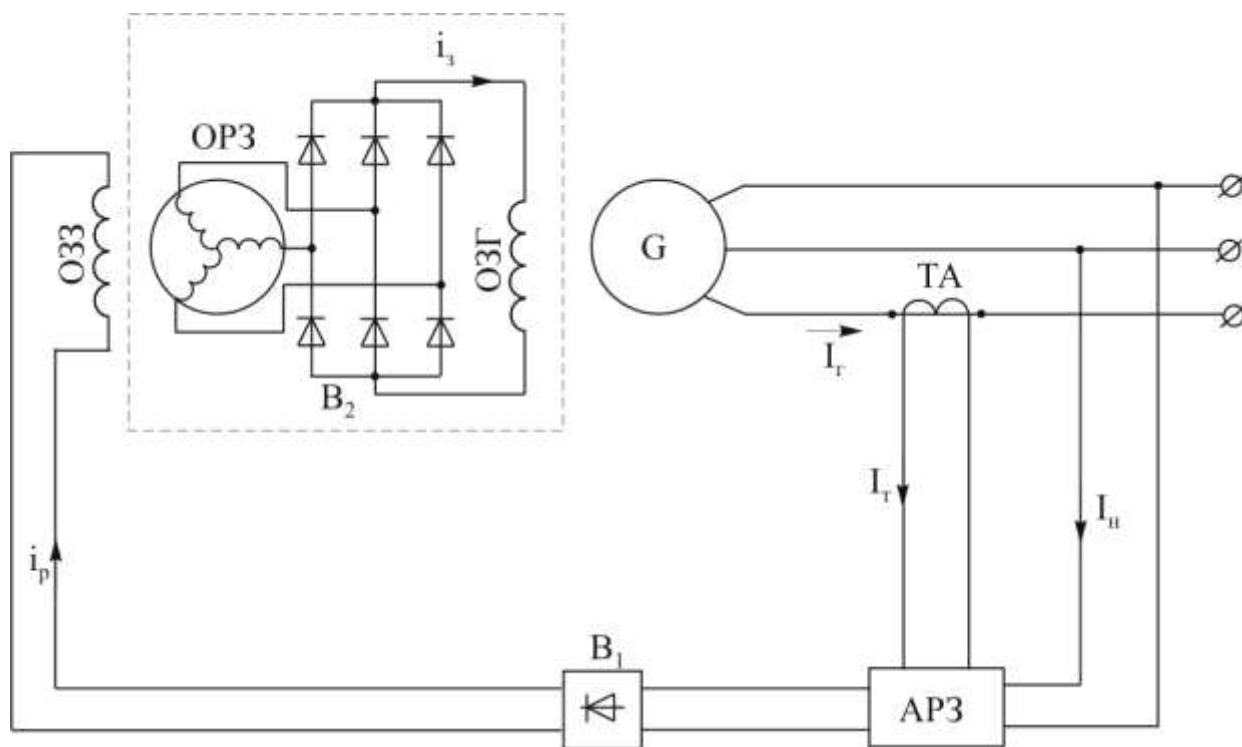


Рис. 1.4. Принципова схема регулювання збудження генератора шляхом введенням в обмотку збудження збудника БГС струму підживлення від напруги і струму статора

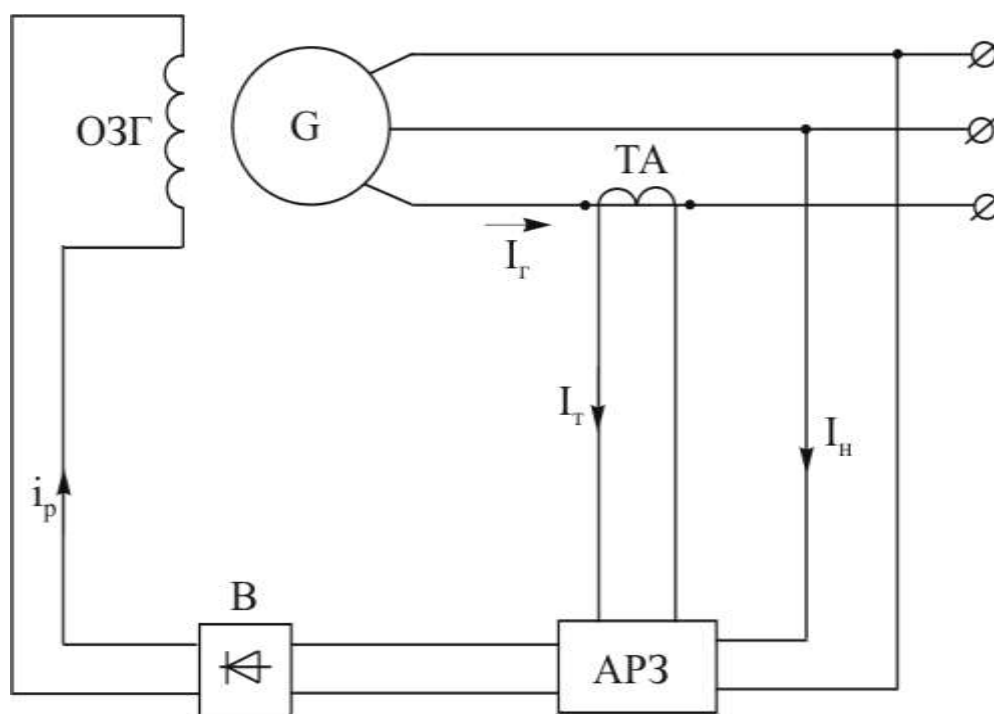


Рис. 1.5. Принципова схема регулювання збудження генератора шляхом ведення в коло ротора токового підживлення від напруги і струму статора

В системі (рис. 1.2) задане значення напруги генератора при різних навантаженнях підтримується шляхом зміни опору вугільного реостата $R_{\text{уг}}$ у колі обмотки збудження генератора ОЗГ. Значення опору вугільного реостата залежить від ступеня стиску шайб і визначається положенням рухливої системи регулятора, на котру впливають сили електромагніта E , балансової пружини Π і плоских пружин підвіски якоря $Я$, а також реакції вугільних стовпів.

Регулятор розраховується так, щоб при заданій напрузі регулююче зусилля, що діє на рухливу систему, дорівнювало нулю.

При збільшенні регульованої напруги зусилля електромагніта і реакції вугільних стовпів переважає над результируючим зусиллям балансової і плоскої пружин, і якір, що переміщується вниз у бік сердечника електромагніта, піднімає натискне коромисло K . Вугільні стовпи під дією власної реакції розтискаються і опір їх зростає.

При зменшенні напруги генератора якір регулятора під дією результируючої сили балансової і плоскої пружин переміщається нагору (від сердечника) і вугільні стовпи, що стиснуті коромислом, зменшують свій опір. Струм обмотки електромагніта також зростає. Коли він досягає максимального номінального значення, що відповідає заданій напрузі, переміщення рухливої частини регулятора припиняється.

Напруга генератора відновлюється, але якір електромагніта регулятора буде займати вже інше положення. Для того, щоб якір знаходився в рівновазі тільки тоді, коли напруга генератора відповідає заданому значенню, необхідне узгодження тягової характеристики електромагніта з результируючою характеристикою механічних зусиль на всьому ході якоря при одному визначеному значенні струму в робочій обмотці регулятора. Таке узгодження забезпечується в регуляторах типу РУН відповідним виконання профілю якоря.

Таким чином, вугільний регулятор напруги є регулятором астатичним, тобто таким, що підтримує задане значення напруги генератора незалежно від величини навантаження.

Астатичну характеристику регулятора забезпечують дві умови:

- ідеальне узгодження тягових характеристик при заданому значенні струму в робочому ланцюзі електромагніта;
- відсутність гістерезиса магнітопроводу регулятора і зони нечутливості.

Ці умови в реальних регуляторах (рис. 1.2) цілком не виконуються. Тому під час роботи регулятора при різних навантаженнях генератора напруга в сталих режимах трохи відрізняється від заданого значення. Необхідне значення напруги в цих випадках можна відрегулювати настановним опором R_y (рис. 1.2).

Чутливість регулятора до зміни величини напруги 1-1,5 %. Точність регулювання напруги при зміні навантаження в межах 0-125 % от номінальної в сталому режимі складає ± 2 %. Час дії регулятора, тобто час першого досягнення номінальної напруги при накиді, наприклад по 100 % індуктивному навантаженню ($\cos\varphi = 0,1$), складає 0,6 секунд і напруга відновлюється за 1,5-2,0 секунди.

Вугільні регулятори напруги схеми (рис. 1.2) досить прості і дешеві, мають відносно малі масу і габарити. Однак їм притаманні суттєві недоліки, основними з яких є наступні. В умовах сильної тряски і вібрацій вугільний стовпчик виходить з ладу, що призводить до порушення настроювання регулятора. Через це характеристика регулювання нестабільна і не забезпечує стійкого розподілу реактивного навантаження між генераторами. Навіть при сильному стиску вугільного стовпчика його опір не дорівнює нулю, тому неможливо одержати максимальний струм при форсировці збудження, тобто максимальної швидкості підвищення напруга збудника до максимального значення.

Вугільний електромеханічний регулятор має запізнювання спрацьовування при раптових змінах режиму роботи генератора (накид навантаження, коротке замикання), що приводить до збільшення максимальної величини провалу напруги і довгий час відновлення напруги.

Усе це привело до того, що вугільні регулятори, незважаючи на ряд переваг, у другій половині минулого віку замінені регуляторами інших типів, заснованих на принципі фазового і токового компаундування.

Компаундування є найбільш простим способом стабілізації напруги синхронного генератора (СГ). Розрізняють системи струмового компаундування, у яких струм збудження генератора визначається тільки значенням струму навантаження, та системи фазового компаундування, у яких струм збудження залежить як від значення струму навантаження, так і від значення і коефіцієнта потужності.

Пристрої струмового компаундування здійснюють зміну збудження генератора тільки в залежності від величини навантаження, тому вони відносяться до систем автоматичного регулювання збудження, що засновані на принципі регулювання по збурюванню. Тут обурюючим впливом є струм навантаження. На рис. 1.6 показано різновид системи (рис. 1.3), тобто схему непрямого струмового компаундування синхронного генератора.

У такій системі непряме компаундування, тобто керуючі впливи здійснюються через збудник. При відсутності збудника в самозбудному СГ керуючий вплив передається безпосередньо на коло збудження. Такі системи називаються системами прямого компаундування.

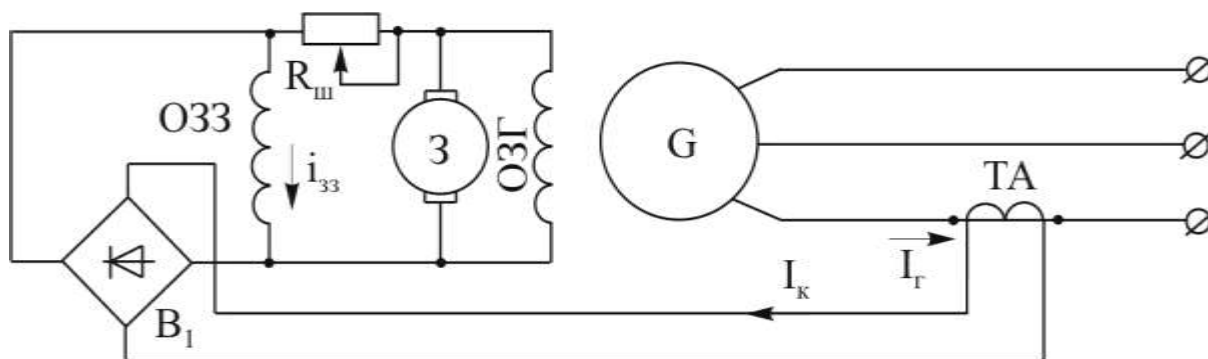


Рис. 1.6. Принципова схема струмового компаундування синхронного генератора

Струм статора генератора через трансформатор струму ТА (по вторинній обмотці якого проходить компаундуєчий струм I_k) і випрямляч B_1 подається в обмотку збудження збудника. Додатковий компаундуєчий струм i_k компенсує значну частину спадання напруги, що обумовлений струмом навантаження, на виводах генератора. Необхідна величина струму i_k забезпечується шляхом вибору відповідних параметрів всіх елементів, що входять у ланцюг компаундування.

Система струмового компаундування відноситься до простих пристроїв регулювання збудження безупинної дії без зони нечутливості. Регулювання порушення в схемі струмового компаундування діє за законом:

$$E_{dl} = E_{dlo} + k_i I_r, \quad (1.4)$$

де E_{dl} – електрорушійна сила (ЕРС) генератора, яка пропорційна напрузі збудника; E_{dlo} – ЕРС генератора, що пропорційна напрузі збудника при відсутності підживлення від системи компаундування; k_i – коефіцієнт компаундування по струму; I_r – струм генератора.

При короткому замиканні і значних накидах навантаження в електроенергетичній системі, що супроводжуються різким зниженням напруги на виводах генератора, струм компаундування i_k визначається зростанням швидкості струму статора генератора I_r . Відбувається збільшення швидкості наростання напруги збудника і форсировка збудження генератора до максимального значення. Після різкого зростання струму статора, унаслідок відсутності зони нечутливості, практично миттєво підвищується напруга на обмотці збудження збудника. Завдяки наявності надперехідної і перехідної складових струму статора значно підвищуються ефективність дії пристрою в процесі форсировки збудження.

Однак струмове компаундування цілком не вирішує питання регулювання збудження, тому що не забезпечують сталості напруги на виводах генератора при зміні коефіцієнта потужності навантаження. Струм компаундування i_k пропорційний повному струму статора, і напруга генератора змінюється в залежності від значення $\cos\varphi$ навантаження.

Якщо генератор працює з постійним навантаженням при різних коефіцієнта потужності, то струм компаундування, а отже, і струм збудження генератора залишаються постійними, тому що пристрій компаундування на зміну $\cos\varphi$ не реагує. Компенсація падіння напруги генератора при зміні реактивного навантаження не відбувається, а тому точність регулювання недостатня і складає 5-10 %.

Підвищити точність регулювання без автоматичного регулювання напруги по відхиленню неможливо, тому застосовують системи компаундування з коректором напруги чи системи фазового компаундування.

Необхідність переходу до систем фазового компаундування підтверджується наступними поняттям: напруга СГ буде підтримуватися постійною тільки в тому випадку, якщо струм збудження i_z буде залежати від струму навантаження I (по значенню і коефіцієнту потужності), так як це ілюструється сімейством регулювальних характеристик генератора при різних $\cos\phi$ (рис. 1.7).

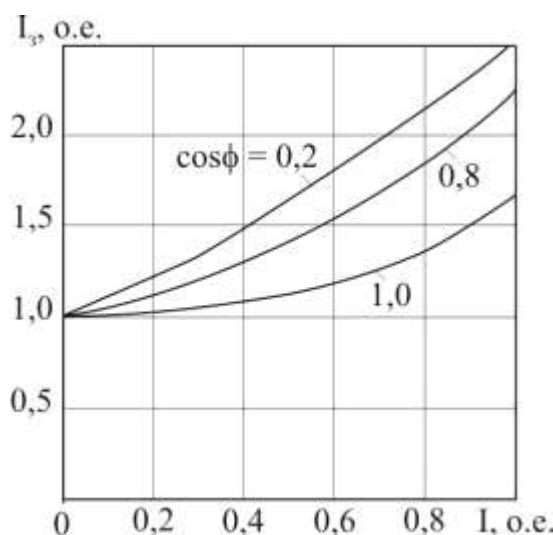


Рис. 1.7. Вигляд регулювальних характеристик СГ при постійних напрузі і частоті обертання генератора

Інакше кажучи, якщо ввести поняття регулювальної (чи вихідної) характеристики системи прямого компаундування (розуміючи під цим терміном залежність струму на виході випрямних пристроїв, замкнутих на обмотку збудника, від струму навантаження генератора при різних коефіцієнтах потужності, але постійній напрузі), то точність регулювання чи точність стабілізації напруги генератора у всіх його нормальних режимах роботи буде визначатися тим, наскільки близько збігаються регулювальні характеристики системи АРЗ і генератора.

Системи фазового компаундування (рисю 1.4 – рис. 1.8) засновані на принципі комбінованого регулювання і забезпечують підтримку сталості напруги синхронного генератора при зміні струму і коефіцієнта потужності та навантаження.

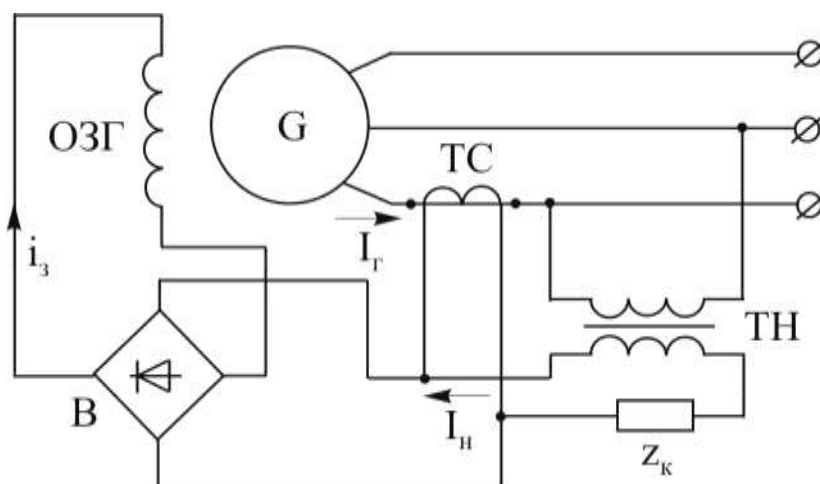


Рис. 1.8. Принципова схема фазового компаундування

Для пояснення принципу дії фазового компаундування розглянемо векторні діаграми (рис. 1.9) напруги і струмів, що побудовані для різних коефіцієнтів потужності генератора $\cos\phi$.

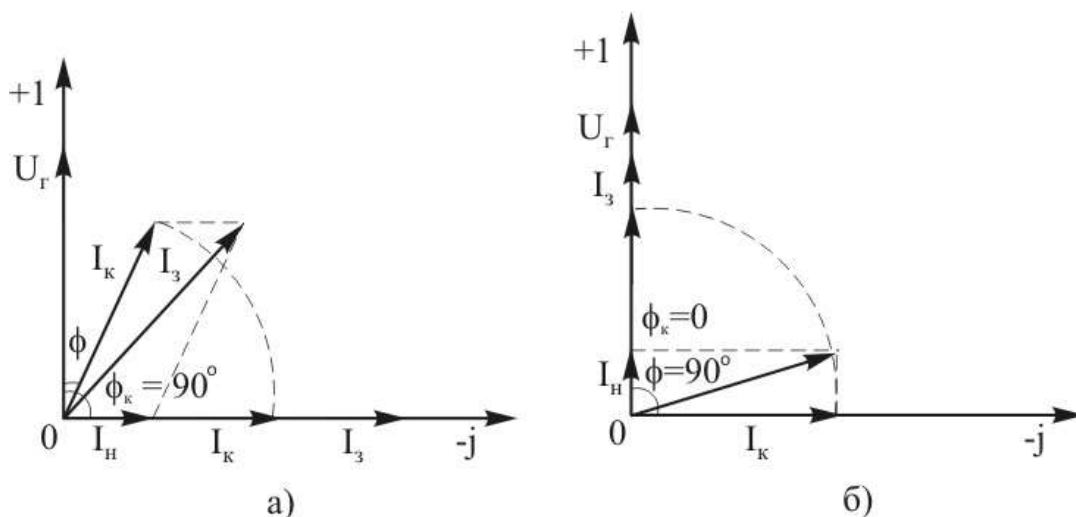


Рис. 1.9. Векторні діаграми напруги і струмів паралельного з'єднання вторинних обмоток трансформатора струму і напруги:
а – при зсуві фаз $\phi_k = 90^\circ$; б – при $\phi_k = 0^\circ$.

Зі схеми і діаграми видно, що для фазового компаундування закон регулювання збудження виражається рівнянням:

$$E_{dl} = E_{dlo} + |k_u U_\Gamma + j k_i I_\Gamma|,$$

де U_Γ – напруги генератора; I_Γ – струм генератора; k_u – коефіцієнт компаундування по напрузі.

З цього вираження випливає, що додатковий струм обмотки збудження I_z визначається геометричною сумою струму компаундування I_k , який пропорційний току генератора і струму підживлення від напруги I_n , що обумовлений напругою генератора (вектор струму відстає від вектора напруги на кут, рівний приблизно 90°), тобто залежить від коефіцієнта потужності.

Чим нижче $\cos\varphi$, наприклад при граничному значенні по струму навантаженню генератора, тим більше додатковий струм підживлення збудження.

При геометричному підсумовуванні струму компаундуванні зі струмом підживлення від напруги відповідно до вираження для закону регулювання напруги, при зміні навантаження генератора необхідна корекція напруги (що обумовлено вимогами для забезпечення регулювання збудження від режиму холостого ходу генератора до повного навантаження при низьких значеннях $\cos\varphi$) компенсує тільки вплив магнітного насичення генератора і збудника, а також гістерезис збудника і температурні зміни опору обмоток. У цьому випадку вплив $\cos\varphi$ навантаження враховується геометричним підсумовуванням, а потужність коректора зменшується.

Принцип побудови фазових схем заснований на законі зміни ЕРС генератора в залежності від величини і фази струму генератора. Фазові схеми у випадку застосування для їхньої побудови трансформаторів струму і напруги в нормальному виконанні не можуть бути безпосередньо здійснені ні при паралельному, ні при послідовному з'єднанні їхніх вторинних обмоток. "Жорсткий" зв'язок (без додаткових активних чи реактивних опорів) між трансформаторами компаундування і напруги не забезпечує можливості роботи фазової схеми.

Так, при рівнобіжному з'єднанні вторинних обмоток трансформаторів струму ТА і напруг TV без спеціального додаткового опору, напруга в точках 1,2 (рис. 1.10, а) визначається тільки напругою генератора. У залежності від величини струму генератора буде змінюватися завантаження трансформатора напруги, але в силу сталості напруги в точках 1, 2 регулюючого ефекту компаундування не буде.

Для побудови фазових схем необхідно мати в крапках 1 і 2 "м'яку" характеристику напруги. Для цього в коло трансформатора напруги ТН необхідно ввести додатковий елемент – так називаний компаундуючий опір z_k великої величини.

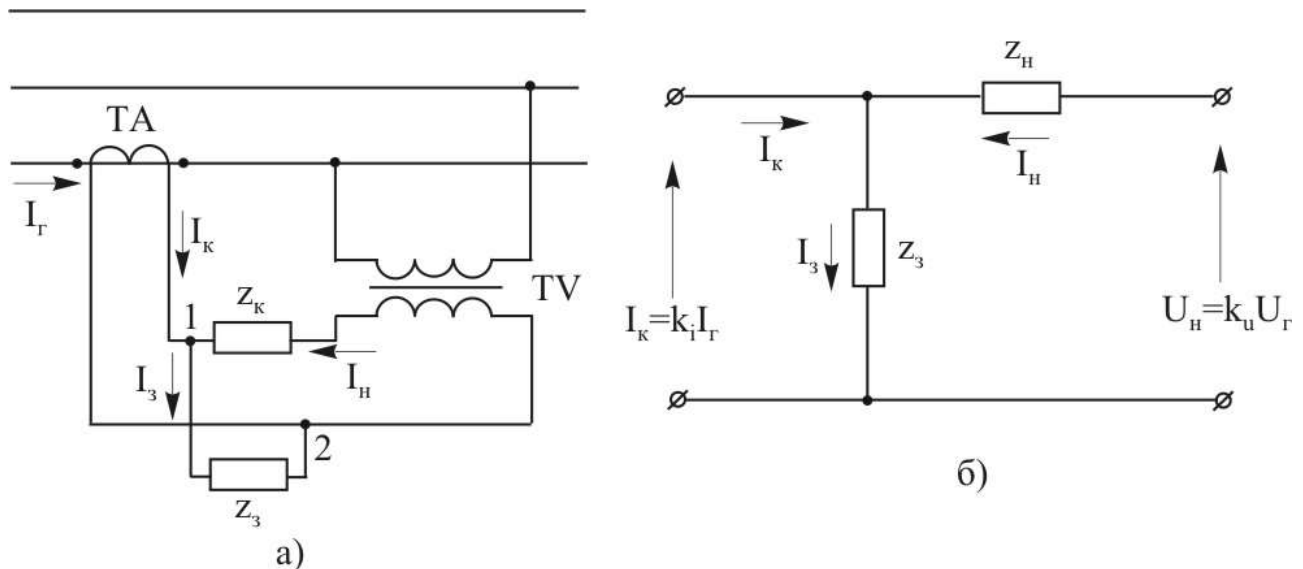


Рис. 1.10. Фазова схема паралельного з'єднання трансформаторів струму і напруги:

а – принципова схема; б – еквівалентна схема.

Зневажаючи розсіюванням, активними опорами обмоток, та намагнічувальними струмами, трансформаторів, а також активними втратами в їх магнітопроводах, схему фазового компаундування приводимо до еквівалентної схеми.

При цьому здійснюється додавання струмів по рівнянню:

$$i_3 = i_k + i_n, \quad (1.5)$$

де $I_3 = i_3$ – струм збудження генератора;

$$k_u U_\Gamma = U_3 + z_k I_3, \quad (1.6)$$

Компандуючий струм I_k і напруга збудження U_3 визначаються:

$$I_k = k_i I_\Gamma; \quad U_3 = z_3 I_3. \quad (1.7)$$

Після відповідної підстановки в рівняння (1.5) і (1.6), одержуємо для струму I_3 вираз:

$$I_3 = \frac{1}{z_k + z_o} (k_i z_k I_\Gamma + k_u U_\Gamma). \quad (1.8)$$

З цього виразу випливає, що характер геометричного підсумовування залежить від z_k .

Якщо відсутній компаундуючий опір ($z_k = 0$), струм збудження генератора визначається тільки складовою від напруги і нормальна робота системи виявляється неможливою.

Схема, приведена на рис. 1.11 відповідає випадку послідовного з'єднання вторинних обмоток трансформаторів струму і напруги, при якому підживлення збудження визначається тільки трансформатором струму, що також неприйнятно. У цій схемі на відміну від попереднього випадку має місце підсумовування не струмів, а ЕРС джерел живлення.

Для виконання побудови фазової схеми необхідно мати в точках 1, 2 "м'яку" характеристику джерела струму. Тому варто вести додатковий опір z_T паралельно ТС малої величини. Тоді додаванню ЕРС впливає рівняння:

$$\dot{U}_3 + z_k \dot{I}_3 = \dot{U}_H + z_T (k_i \dot{I}_T - \dot{I}_3), \quad (1.9)$$

де напруга збудження U_3 і компаундування U_k :

$$U_3 = z_3 I_3, \quad U_k = k_u U_T.$$

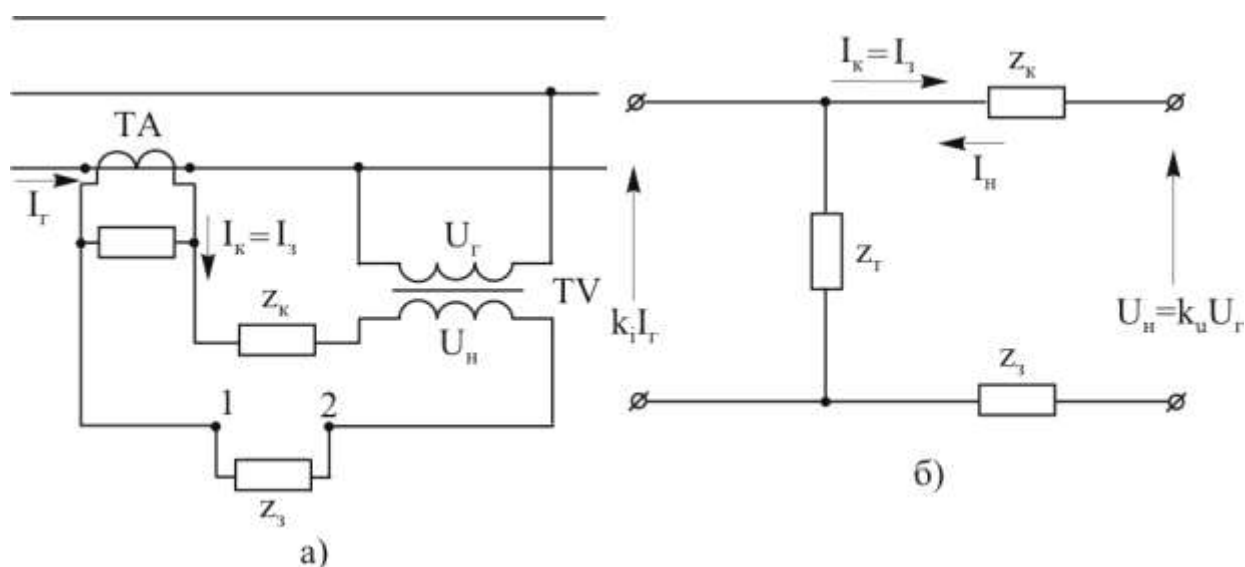


Рис. 1.11. Фазова схема послідовного з'єднання трансформаторів струму і напруги:

а – принципова схема; б – еквівалентна схема.

Після перетворення одержуємо рівняння для струму в колі збудження:

$$I_3 = \frac{1}{z_k + z_3 + z_r} (k_i z_k I_r + k_u U_r) . \quad (1.10)$$

Рівняння (1.10) показує, що струм збудження I_3 залежить від опору z_r .

Якщо опір z_r відсутній, то живлення від джерела напруги U_r не впливає на зміну струму I_3 , і він залежить тільки від струму генератора. У рівнянні (1.10) геометрично складаються падіння напруги на опорі z_r і напруга підживлення U_r .

1.3. Структурна та принципова електрична схеми системи збудження суднового генератора типу МСК

В системі збудження, яка розглядається, виконавчим елементом служить дросель відбору потужності LW . Система збудження генератора типу МСК (рис. 1.12) включає: об'єкт регулювання – СГ G ; трансформатор фазового компаундування (ТФК) TW ; компаундуючий дросель LM ; випрямний пристрій V ; схему управління початковим збудженням генератора $K1$ з блок контактами $K1A$ і $K2A$; трансформатор струму TA , який є джерелом сигналу для коректора напруги UN ; пристрій гасіння поля $K2$. В коректорі напруги UN можна виділити окремі функційні вузли: вимірювальний трансформатор TN ; магнітний підсилювач A ; пристрій статизму AN .

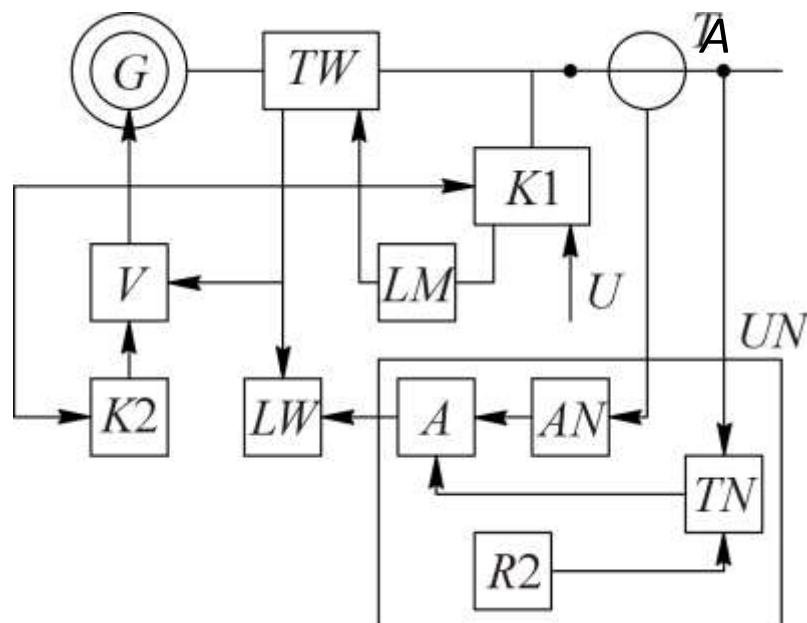


Рис. 1.12. Структурна схема системи збудження генератора типу МСК

Усі перераховані блоки з технологічної позиції можна об'єднати у дві групи: з параметрами які регулюються (дросель відбору потужності, магнітний підсилювач, пристрій статизму) і з параметрами які не регулюються (інші блоки). Особливе місце займає СГ, параметри якого є визначальними для інших блоків.

В системі збудження, яка розглядається, можна виділити два кола регулювання напруги: за відхиленням, до якого входять блоки A , TN , LW , AN , TA та за обуренням, яке утворене обмоткою струму трансформатора компаундування TW . Виконавчі елементи в обох колах однакові – випрямляч V і обмотка збудження генератора.

Початкове збудження здійснюється від потужного джерела трифазної напруги, наприклад від шин головного розподільчого щита. Для підключення цього джерела передбачена спеціальна допоміжна схема на контакторах $K1A$, $K2A$, KQ , $K3Q$ (рис. 1.13). Напруга від джерела для самозбудження генератора поступає на дросель LM через контакти, які замикаються контактором $K2A$, при цьому контакти контактора $K1A$ відключають його від шин генератора. Гасіння поля забезпечується контактом KQ , який вмикається за допомогою пар контактів QF і SQ . Гасінням магнітного поля генератора називається швидке зниження до нуля струму збудження і магнітного потоку, який їм утворюється. Пристрій гасіння магнітного поля необхідний для передбачення розвитку пошкодження генератора при відключенні живлення та при внутрішньому короткому замиканні.

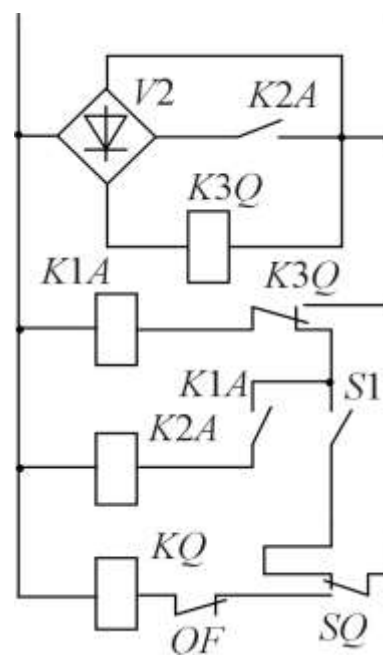


Рис. 1.13. Допоміжна схема

Принципова електрична схема системи збудження генератора яка характеризує з'єднання та включення елементів TW , LW , LM , TN , AN та інших, зображена на рис. 1.14.

1.4. Налагоджування системи збудження синхронних генераторів

Технологічний процес налагодження СГ складається з наступних операцій: перевірки монтажу, контролю працеспроможності системи збудження на неробочому русі; перевірки функціонування системи збудження під навантаженням; перевірки функціонування коректору напруги; контролю роботоспроможності системи збудження з коректором напруги під навантаженням; регулювання пристрою статизму.

При контролі ізоляції обмоток СГ необхідно визначати значення двох параметрів: опору ізоляції та коефіцієнту абсорбції за відповідними методологіями [3].

Перевірку функціонування системи збудження на холостому русі проводять для оцінки правильності взаємодії усіх блоків, які забезпечують початкове збудження генератора, а також його збудження на холостому русі. В генераторах типу МСК початкове збудження здійснюється за допомогою контакторів $K1A$, $K2A$ від фаз або від стороннього потужного джерела трифазної напруги, наприклад від шин головного розподільчого щита. Для підключення такого джерела існує допоміжна схема (рис. 1.13).

Найбільш розповсюдженим дефектом при перевірці такої схеми є відсутність початкового збудження генератора через неспівпадання полярності поля, яке утворює обмотка збудження, з полярністю поля остаточного намагнічування. Якщо після зміни полярності виводів обмотки збудження, генератор збуджується, переходять до перевірки роботи системи гасіння поля.

В системі АРЗ (рис. 1.14) гасіння поля здійснюється закороченням обмотки збудження через вентилі випрямляча V за допомогою контактора KQ , який вмикається перемикачем SQ (рис. 1.13).

При перевірці гасіння поля звертають увагу на те, щоб після замикання контактів перемикача SQ контакти контактора KQ замикали вихід випрямляча V . При цьому напруга на виводах генератора повинна знизитися до нуля.

Після перевірки функціонування системи збудження на неробочому русі, переходять до фазировки генератора. При фазировці за допомогою фазовказника-пробника визначають тільки порядок чергування фаз генератора і порівнюють його з порядком чергування фаз шин головного електророзподільного щита. При співпаданні порядку чергування фаз можна вмикати генераторний автомат $QF1$ та подавати напругу від генератора на шини щита, а також приступати до контролю роботоспроможності системи збудження на холостому русі. В цьому режимі роботи системи збудження контролюють максимальну $U_{\max}$ і мінімальну $U_{\min}$ напруги генератора, які відповідають двом крайнім положенням движка регулятора уставки R_2 . Ці два значення визначають діапазон зміни напруги:

$$\Delta U = 100(U_{\max(\min)} - U_{\text{ном}}) / U_{\text{ном}},$$

де $U_{\text{ном}}$, – номінальна напруга генератору.

Слід відмітити, що СГ на неробочому русі розвиває максимальну напругу при практично вимкненому коректорі UN , коли струм підмагнічування дроселя LW мінімальний, а його опір – найбільший. Струм, який протікає через головні обмотки W_{LW} дроселя LW , в цьому випадку мінімальний. Тому практично увесь струм вторинної обмотки трансформатору компаундування TW створює основний потік збудження СГ G .

Якщо при контролі встановлено, що напруга СГ в одному з крайніх положень регулятора уставки R_2 все ж не досягає необхідного максимального значення, необхідно збільшити опір дроселя LW з тим, щоб збільшити струм збудження СГ.

Конструкцією дроселя LW генератору типу МСК передбачено регулювання його опору шляхом зміни повітряного зазору між стрижнями та ярмом магнітопроводу. При використанні цього регулюючого елементу слід мати на увазі, що при зміні зазору δ , змінюють не тільки найбільшу, але й найменшу напругу, яка відповідає другому крайньому положенню регулятора уставки R_2 . При цьому одночасно з розширенням діапазону зміни напруги відбувається й зміна встановленого відхилення напруги δU . Існує певний діапазон зміни зазору. Поза цим ді-

апазоном перехідний процес стає незатухаючим и система збудження не виконує своїх функцій.

При налагоджуванні системи збудження генератора любого типу, необхідно пам'ятати, що напруга на його виводах є функцією багатьох величин – потужності, частоти обертання, коефіцієнту потужності, та ін. Тому при налаштуванні будь-якого режиму роботи, змінюючи одні величини, треба прагнути підтримувати незмінними значення інших величин. Наприклад, частоту обертання первинного двигуна СГ і відповідно частоту струму необхідно підтримувати постійною тому, що їх зміна призводить до зміни індуктивних опорів обмоток трансформаторів, дроселів та інших елементів системи збудження, а також самого струму збудження та в кінцевому рахунку напруги генератора. Таким чином, якщо значення якогось параметру будуть змінюватися при різних частотах обертання, то можливо невірне судження про роботу системи збудження.

При контролю роботоспроможності СГ на неробочому русі слід враховувати, що мінімальна напруга генератора на неробочому русі відповідає максимальному струму підмагнічування дроселя LW , а отже, й найменшому струму збудження. Якщо зміною опору регулятора уставки R_2 не вдається отримати необхідне значення напруги, то необхідно збільшити або кількість витків в обмотці управління дроселя LW , або струм підмагнічування дроселя, чи зменшити зазор в його магнітопроводі. При цьому слід мати на увазі, що значне підвищення числа витків обмотки управління призводить до зростання часу встановлення напруги при раптовій зміні навантаження генератора від 0 до 100%.

Отримавши в результаті регулювання значення $\Delta U = \pm 5\%$, можна переходити до наступної операції налаштування.

Головним завданням операції «перевірка функціонування системи збудження під навантаженням» є перевірка узгодження дії обмоток струму та напруги в трансформаторі компаундування TW (рис. 1.14). Дана операція виконується тільки для генераторів, в яких, подібно СГ типу МСК, блоки системи збудження з'єднані електричними зв'язками безпосередньо на судні.

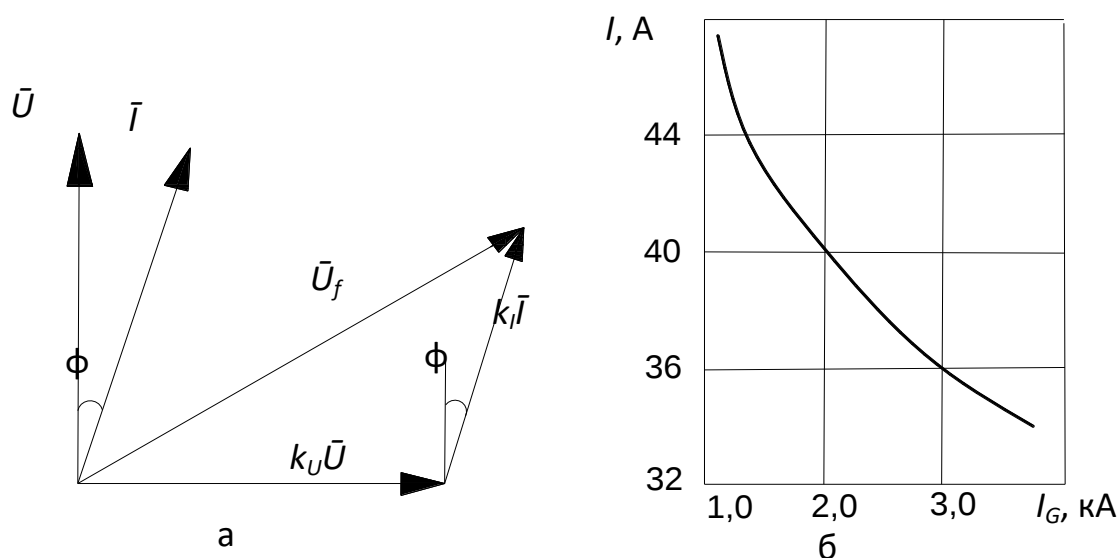


Рис. 1.15. Векторна діаграма трансформатора фазового компаундування (а) та залежність струму лінійного дроселя від навантаження (б).

Трансформатор компаундування в СГ створений таким чином, що складові струму збудження, які пропорційні струму навантаження $k_I I$ та напрузі $k_U U$, підсумовуються як векторні величини, кут між якими визначається коефіцієнтом потужності навантаження $\cos \phi$ (рис. 1.15, а). Такий підсумок складових струму збудження дозволяє отримати вихідну характеристику системи збудження (залежність струму збудження від напруги СГ, струму навантаження та коефіцієнта її потужності), яка найбільш наближена до регульовальної характеристики СГ, що й дозволяє системі збудження підтримувати напругу на виводах генератора практично незмінною.

Вірність взаємодії обмоток ТФК TW (рис. 1.14) перевіряється за характером зміни струму в бмотка лінійного дроселя LM при зміні струму навантаження генератора. Якщо зі збільшенням навантаження струм лінійного дроселю LM зменшиться (рис. 1.15, б), то обмотки ТФК TW включені вірно. В протилежному випадку необхідно змінити місцями початки та кінці обмотки напруги ТФК.

Векторна діаграма, наведена на рис. 1.15, а, показує, що результуючий вектор U_f при збільшенні струму навантаження I_G (рис. 1.15, б) зростає за рахунок складової $k_I I$, тоді як складова $k_U U$ навіть при сталій напрузі на виводах генератора зменшується. У зв'язку з тим, що в системі збудження відсутній регулюючий

елемент, який дозволяє відкоректувати значення U_f в залежності від $\cos\phi$ навантаження, регулювання параметрів системи збудження можна виконувати при будь-якому значенні $\cos\phi$ з діапазону припустимих значень для даного генератору.

Всі сучасні системи збудження СГ мають коректор напруги, який дозволяє значно зменшити встановлене відхилення напруги δU (до $\pm 1\%$). Правильність функціонування коректору напруги оцінюють, порівнюючи зміну напруги при включенні та відключенні навантаження на генератор з вимкненим та ввімкненим коректором системи збудження. Якщо при ввімкненому коректорі зміна напруги менше, то він функціонує вірно. В протилежному випадку перевіряють узгодження сигналів, які поступають від вимірювальних елементів на обмотки W_{TN1} , W_{TN2} магнітного підсилювача A .

Пристрій статизму AN (рис. 1.12) в системі збудження призначений для отримання сигналу струму навантаження, який є необхідним для забезпечення стійкої паралельної роботи СГ з мережею та іншими генераторами без урівнювальних з'єднань. З метою такого забезпечення на обмотку управління W_{AN} магнітного підсилювача A подається сигнал від трансформатора струму TA і випрямляча $V1$. Цей сигнал, шумуючись магнітним шляхом з сигналами інших обмоток W_{TN1} і W_{TN2} , визначають вихідний струм підсилювача A , який керує підмагнічуванням дроселя LW . В залежності від полярності сигналу, що поступає від пристрою статизму, напруга СГ при зміні навантаження або зростає, або знижується. У першому випадку СГ працює з від'ємним статизмом, а в другому випадку з позитивним статизмом. Значення статизму задається опором резистора $R1$.

1.5. Призначення і види трансформаторів фазового компаундування

Статичні системи самозбудження й автоматичного регулювання збудження суднових синхронних генераторів різних типів, що випускаються промисловістю, засновані на принципі фазового компаундування і мають незначні відмінності у виконанні.

Основними елементами таких систем є: ТФК чи керований підмагнічуванням трансформатор, коректор напруги на електромагнітних (рис. 1.14) чи напівпровідникових (рис. 1.16) елементах, дроселі, напівпровідникові вентилялі.

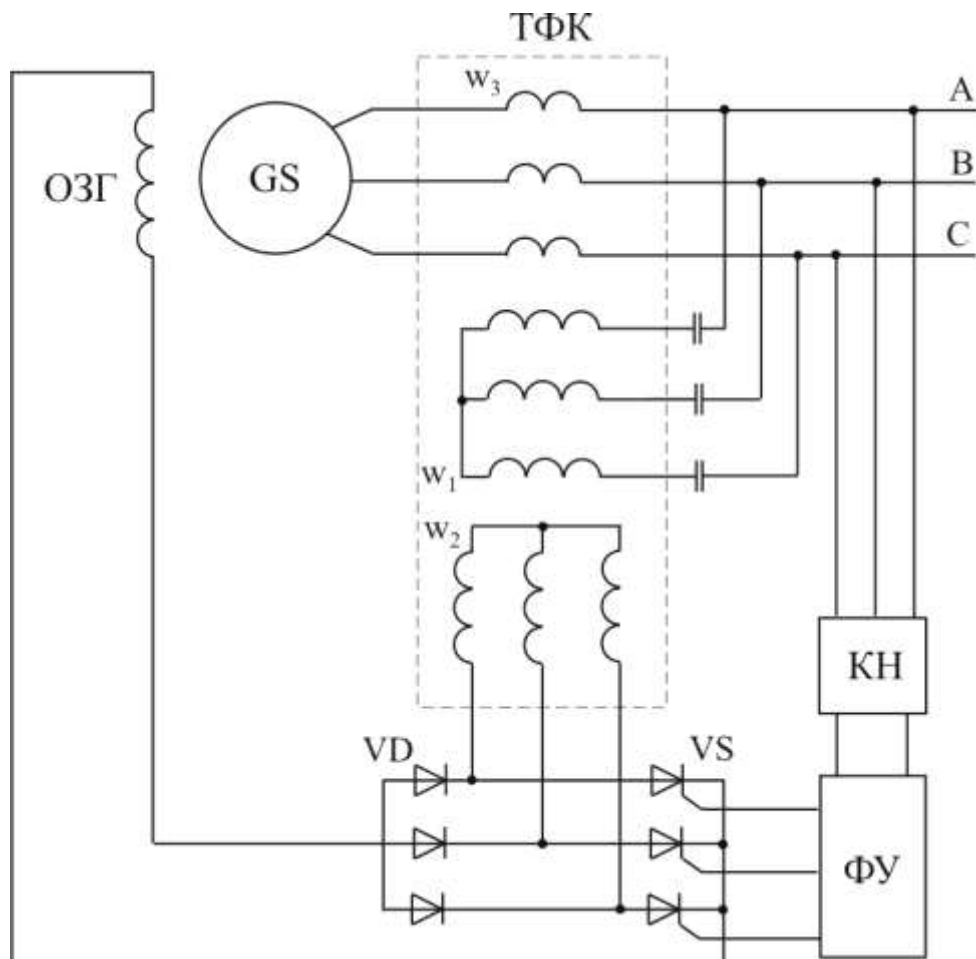


Рис. 1.16. Схема фазового компаундування з керованими вентилями

Можливість застосування ТФК у таких схемах можна обґрунтувати в такий спосіб.

У схемах фазового компаундування сигнали автоматичного регулювання від струму генератора і підживлення від напруги з'єднуються електромагнітним шляхом (в магнітному полі магнітопроводу) за допомогою триобмоткового та тристрижневого трансформатора традиційного виконання. У цьому випадку замість електричного зв'язку вторинних обмоток трансформаторів струму і напруги має місце електромагнітний зв'язок між трьома обмотками, що забезпечує підсумовування струмів чи напруг.

Дію трансформатора фазового компаундування пояснює приклад триобмоткового однофазного трансформатора (рис. 1.17).

У вказаному прикладі всі три обмотки: обмотка напруги (ОН), обмотка струму (ОС) і робоча обмотка (РО) знаходяться на одному стрижні.

Обмотка ОН підключається на фазну напругу, обмотка ОС підключається на фазний струм. З робочої обмотки РО одержується струм, який передається в обмотку збудження (ОЗ) генератора.

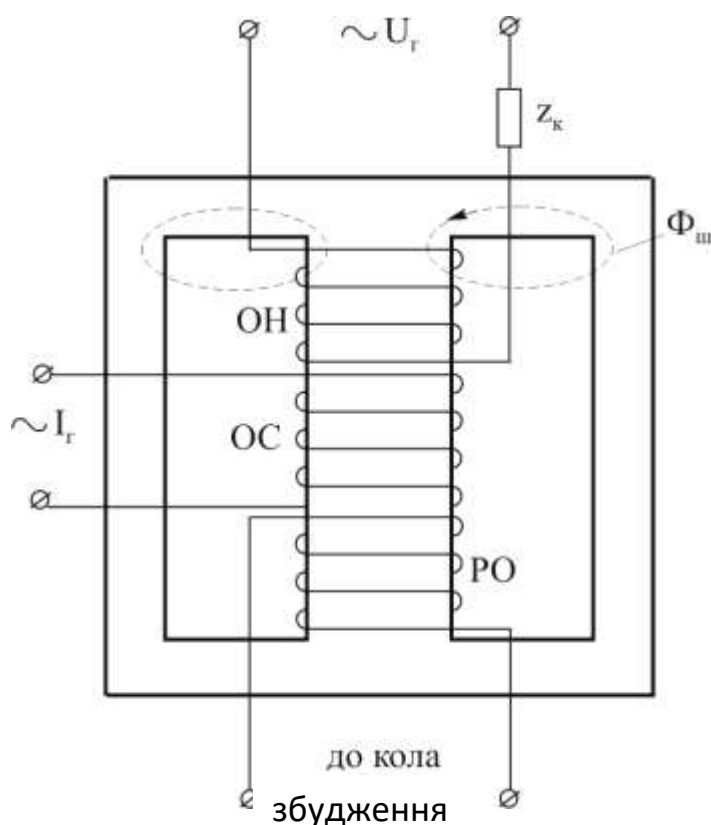


Рис. 1.17. Триобмотковий однофазний трансформатор

Результуючий магнітний потік визначається сумарною магніторушійною силою трьох обмоток. При цьому, сумарна магніторушійна сила, що впливає на функціонування вихідної обмотки, є геометричною сумою дії токової обмотки й обмотки напруги, що еквівалентно підсумовуванню струмів при паралельному з'єднанні вторинних обмоток окремих трансформаторів струму і напруги:

$$\dot{E}_{\mu} = \dot{F}_{\text{он}} + \dot{F}_{\text{от}} + \dot{F}_{\text{ро}} \cong 0.$$

Аналогічно працює тристрижневий трансформатор (рис. 1.18).

В тристрижневому трансформаторі ЕРС вихідної обмотки визначається магнітним потоком середнього стрижня, рівним геометричній сумі потоків крайніх стрижнів, обумовлених напругою їхніх обмоток. У силу цього підсумовування магнітних потоків у тристрижневому трансформаторі є аналогічним їхньому підсумовуванню при послідовному з'єднанні вторинних обмоток окремих однофазних трансформаторів струму і напруги. Однак подібний трансформатор відрізняється від двох вказаних однофазних трансформаторів кращими масогабаритними і енергетичними показниками.

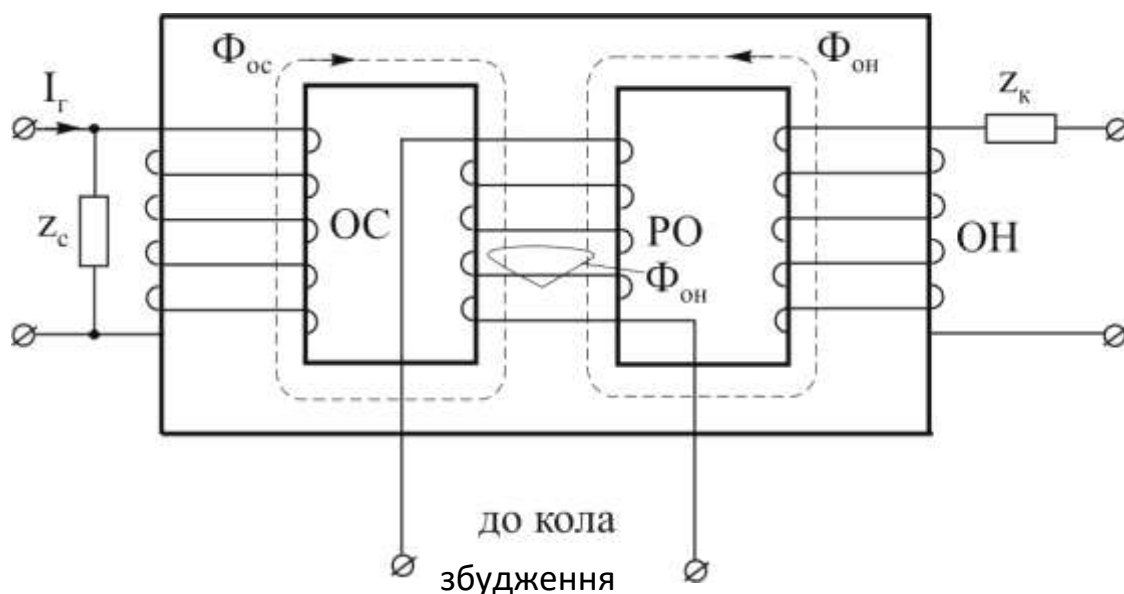


Рис. 1.18. Тристрижневий трансформатор

Також фазові схеми можна будувати, використовуючи трансформатори спеціальних конструкцій, наприклад, з магнітним шунтом чи з повітряним зазором.

Магнітний шунт розташовується між обмоткою струму й обмоткою напруги та послабляє магнітний зв'язок між ними. Опір розсіювання обмотки напруги збільшується і визначається тільки магнітним шунтом, що еквівалентно послідовному включенню в коло обмотки компаундуючого дроселя. При цьому відбувається

зм'якшення зовнішньої характеристики трансформатора, тобто збільшується динаміка зміни напруги в ланцюзі збудження генератора.

У якості компаундуючого опору в схемах фазового компаундування самозбудних синхронних генераторів, можуть використовуватися як індуктивні опори (дроселі), так і ємнісні опори (конденсаторні батареї).

Ємнісний опір зменшує повний опір кола збудження генератора, полегшуючи процес самозбудження. При цьому статичні і динамічні характеристики системи досить високі.

Статизм регулювання не перевищує $\pm 3\%$ при зміні навантаження від 0 до 100 % і коефіцієнта потужності від 1 до 0,4. При накиді 100 % індуктивного навантаження з $\cos\varphi = 0,2$ час зниження напруги складає 0,6 секунд.

Однак, при цьому ємнісні опори мають підвищені масогабаритні показники та вартість відносно дроселів, що економічно не вигідно. Тому у вищевказаних схемах у якості компаундуючого опору часто густо використовують дроселі.

На рис. 1.16 приведено схему фазового компаундування з застосуванням тиристорів. Вони включаються на вихід робочої обмотки ТФК, змінюючи струм збудження генератора. Уведення тиристорів замість дроселя дозволило зменшити масу і габарити системи і підвищити її швидкодію, тому що тиристори є безінерційними керованими елементами.

Тиристори в схемах АРЗ керують струмом (напругою) збудження СГ.

Трансформатор ТФК складається з трьох обмоток: струму w_3 , що включається послідовно з навантаженням у фази генератора, напруги w_1 , що підключається на лінійну напругу генератора, і вихідний w_2 . Обмотка струму разом з вихідною обмоткою може бути відділена від обмотки напруги магнітним шунтом.

Процес самозбудження СГ аналогічний процесу самозбудження генератора постійного струму і визначається величиною ост-точної ЕРС і опором кола збудження. У даній схемі самозбудження здійснюється випрямленим струмом блоку силових випрямлячів (тиристорів), до якого подається напруга генератора через обмотки w_1 і w_2 трансформатора ТФК. Величина струму збудження в режимі неробочого руху СГ встановлюється при налаштуванні схеми шляхом зміни індук-

тивності розсіювання обмотки напруги w_1 , який досягається регулюванням зазору між шунтом і стрижнем магнітопроводу трансформатора.

Стабілізація напруги СГ, що працює під навантаженням з різними коефіцієнтами потужності, забезпечується вторинним струмом трансформатора ТФК, що дорівнює геометричній сумі струмів первинних обмоток w_3 і w_1 .

Система самозбудження підтримує напругу СГ в межах $\pm 2,5 \%$ від величини номінальної величини при зміні навантаження от 0 до 100 %, $\cos\varphi$ от 0,7 до 0,95 і швидкості обертання $\pm 2 \%$.

У динамічних режимах СГ із системою самозбудження час перехідного процесу скорочується більш ніж у три рази в порівнянні із системами збудження, що мають магнітні збудники.

1.6. Розрахунок системи фазового компаундування виходячи зі сталих режимів СГ. Попередній розрахунок параметрів ТФК

1.6.1. Вихідні дані: тип СГ МСК – 625 – 1500 [1]: номінальна потужність СГ $P_n = 500$ кВт; $S_n = 625$ кВА; номінальна лінійна напруга $U_{\text{лн}} = 400$ В; номінальний струм статора $I_n = 902$ А; номінальне значення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_n = 0,8$; номінальна частота $f_n = 50$ Гц; спосіб з'єднання обмоток статора Y; номінальний струм обмотки збудження $I_{fn} = 114$ А; струм збудження неробочого руху $I_{f0} = 72,5$ А; опір обмотки збудження $r_f = 0,18$ Ом; остаточна електрорушійна сила генератора $E_0^* = 1\%$; синхронний індуктивний опір СГ $x_d^* = 2,08$.

1.6.2. Визначення безрозмірних розрахункових параметрів a і b [1] системи АРЗ з ТФК, що залежать від співвідношень компаунду чого опору x_k та опору системи збудження СГ r_f :

$$a = x/x_{\text{ш}} ; x_k = p r_f.$$

Величини a і p знаходяться на основі залежності $P_{\min} = f(x_d^*)$ і $P_{\text{кр}} = f(a)$ [1].

Визначення $P_{\min}$.

Значенню $\chi_d^* = 2,08$ відповідають згідно рис. 5.44 [1] величини $P_{\min(a=1)} \approx 3,5$; $P_{\min(a=0,5)} \approx 3,3$; $P_{\min(a=0)} \approx 3,2$.

Визначення критичного значення $P_{\text{кр}}$

$$P_{\text{кр}} = \sqrt{0,5 \left(\frac{1 - E_0^*}{E_0^*} - 1 \right)} = \sqrt{0,5 \left(\frac{1 - 0,01}{0,01} - 1 \right)} = 7.$$

На основі графічних залежностей $P_{\text{кр}} = f(a)$ і $P_{\min} = f(a)$ на рис. 1.19 знаходяться значення $a^* = 0,58$; $p^* = 0,34$.

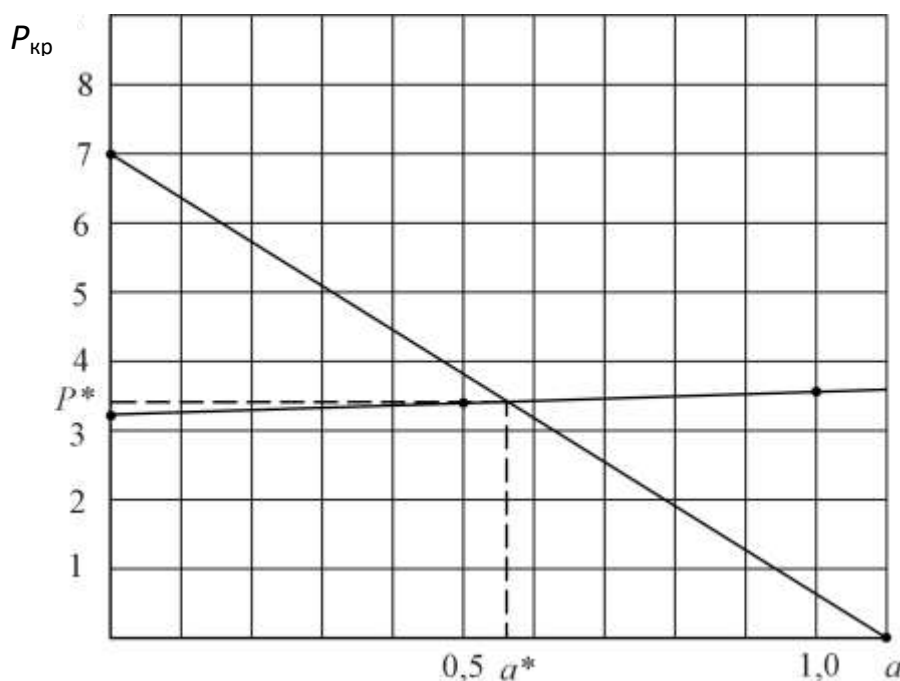


Рис. 1.19. Визначення розрахункових параметрів системи автоматичного регулювання збудження

1.6.3. Визначення основних параметрів системи компаундування [1].

Коефіцієнт трансформації обмотки напруги

$$K_U = \frac{I_{\text{фн}} R_f \sqrt{(1 - a^*)^2 + p^{*2}}}{U_{\text{фн}}} = \frac{114 \cdot 0,18 \sqrt{(1 - 0,58)^2 + 0,34^2}}{231} = 0,048,$$

де $U_{\text{фн}}$ – номінальна фазна напруга

$$U_{\text{фн}} = U_{\text{лн}} / \sqrt{3} = 400 / \sqrt{3} = 231 \text{ В.}$$

Коефіцієнт трансформації обмотки струму

$$K_U = \frac{I_{fH} x_d^* \sqrt{(1 - a^*)^2 + p^{*2}}}{I_H p^*} = \frac{114 \cdot 2,08 \sqrt{(1 - 0,58)^2 + 0,34^2}}{902 \cdot 0,34} = 0,588.$$

1.6.4. Визначення максимальних значень струмів елементів системи АРЗ.

Максимальний струм збудження

$$I_{f \max} = I_{f0} (1 + x_d^*) = 72,5(1 + 2,08) = 223,3 \text{ А.}$$

Максимальний струм у опорі компаундування

$$I_{L \max} = I_{f0} \sqrt{1 + \left[\frac{x_d^*}{p^*} (1 - a^*) \right]^2} = 72,5 \sqrt{1 + \left[\frac{2,08}{0,34} (1 - 0,58) \right]^2} = 137 \text{ А.}$$

Максимальний струм у шунтовому опорі

$$I_{ш \max} = I_{f0} \frac{a^*}{p^*} \sqrt{1 + x_d^*} = 72,5 \frac{0,58}{0,34} \sqrt{1 + 2,08} = 217 \text{ А.}$$

1.6.5. Розрахункова потужність ТФК

$$S_H = 1,5 r_f I_{f \max} (I_{L \max} + k_i I_H + I_{ш \max}) = \\ = 1,5 \cdot 0,18 \cdot 223,3 \cdot (137 + 0,588 \cdot 902 + 217) = 53320 \text{ В} \cdot \text{А} \approx 53 \text{ кВ} \cdot \text{А.}$$

1.6.6. Номінальні напруги ТФК

Фазна та лінійна напруги робочої обмотки:

$$U_{1\phi} = k_U U_{21\phi} = 0,048 \cdot 231 = 11,1 \text{ В;}$$

$$U_{1л} = \sqrt{3} U_{1\phi} = \sqrt{3} \cdot 11,1 = 19,2 \text{ В.}$$

Фазна та лінійна напруги обмотки вимірювання напруги:

$$U_{21л} = U_{нл} = 400 \text{ В;}$$

$$U_{21\phi} = U_{н\phi} = 231 \text{ В.}$$

Фазна та лінійна напруги обмотки вимірювання струму:

$$U_{22\phi} = k_i U_{1\phi} = 0,588 \cdot 231 = 355,83 \text{ В} \approx 136 \text{ В;}$$

$$U_{22л} = \sqrt{3} U_{22\phi} = \sqrt{3} \cdot 136 = 235 \text{ В.}$$

Потужність обмотки вимірювання напруги

$$S_{21} = 1,5 r_f I_{f \max} I_{ш \max} = 1,5 \cdot 0,18 \cdot 223,3 \cdot 217 = 13683,15 \text{ ВА} \approx 14 \text{ кВА.}$$

Потужність обмотки вимірювання струму

$$S_{22} = S_H - S_{21} = 53 - 14 = 39 \text{ кВА.}$$

1.7. Висновки до розділу 1

1.7.1. В розділі 1 розроблена структурна і принципова електрична схеми генератору типу МСК, розглянуті системи автоматичного регулювання збудження синхронного генератору.

1.7.2. Визначено, що фазове компаундування є найкращім способом регулювання збудження синхронного генератора.

1.7.3. В якості регулятора стабільності напруги доцільно використовувати ТФК, який відрізняється від електронно-напівпровідникових пристроїв регулювання підвищеною надійністю та значно меншою вартістю.

1.7.4. В якості командуючого опору вибраний дросель, який відрізняється від конденсаторів меншою вартістю, підвищеною надійністю та меншими габаритними розмірами.

2. АНАЛІЗ КОНСТРУКТОРСЬКО-ТЕХНОЛОГІЧНИХ РІШЕНЬ ТРИФАЗНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

2.1. Магнітні системи трифазних трансформаторів. Аналіз питомої матеріалоємності існуючих конструкцій активної частини трифазних трансформаторів

Активна частина сучасних трифазних трансформаторів складається з концентричних і обмоток, що чергуються, і магнітопровода. Магнітопровід містить стрижні, на яких розташовуються обмотки, необхідні для перетворення електричної енергії, і ярма, що служать для замикання магнітне коло. При цьому конструктивною і механічною основою трансформатора є його магнітопровід. Конструктивна схема, геометрична форма і співвідношення елементів магнітопроводу визначають не тільки витрати електротехнічної сталі, але й експлуатаційні показники, масу і вартість обмотувальних матеріалів, що йдуть на виробництво трансформаторів [5 - 9].

Практикою трансформаторобудування на протязі десятиліть були обрані дві основні схеми розташування окремих частин магнітопроводу: плоска і просторова. У плоскій системі подовжні осі всіх стрижнів і ярем розташовуються в одній площині (рис. 2.1). У просторовій системі осі стрижнів і ярем розташовуються в трьох площинах під кутом 120° (рис. 2.2).

Зазначені системи по взаємному розташуванню стрижнів і ярем також поділяються на стрижневі, броньові і броньострижневі. У представлений на рис.2.1 магнітній системі трифазного трансформатора ярма з'єднують різні стрижні, і кожне ярмо розташовується з боку торців стрижнів. Така магнітна система в торцевими ярмами називається стрижневий.

Якщо ж стрижень має бічні ярма, що з'єднують два різних кінці цього стрижня (рис. 2.3, а и б), те бічні поверхні обмоток як би закриті бронєю, отчого маг-

нітні системи цього типу при наявності не менш двох бічних ярм на кожному стрижні одержали назва броньових.

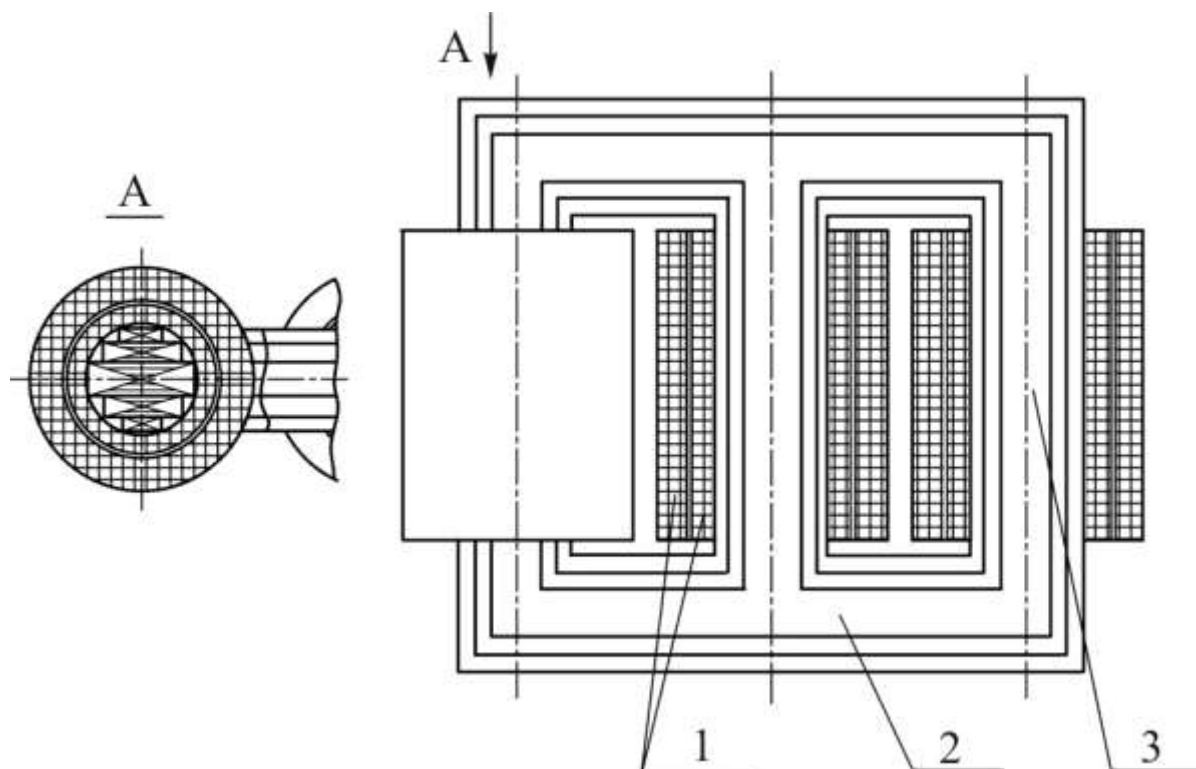


Рис. 2.1. Плоска стрижнева шихтована магнітна система трифазного трансформатора з обмотками: 1 - обмотка; 2 - ярмо; 3 - стрижень.

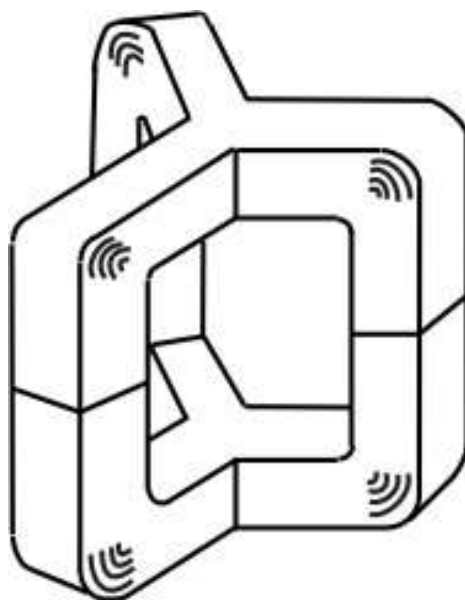


Рис. 2.2. Просторова стикова магнітна система

Системи, у яких не всі стрижні мають бічні ярма чи кожен стрижень має не більш ніж одне бічне ярмо називаються броньострижневими.

Найбільше поширення одержали плоскі магнітні системи стрижневого типу (рис. 2.1).

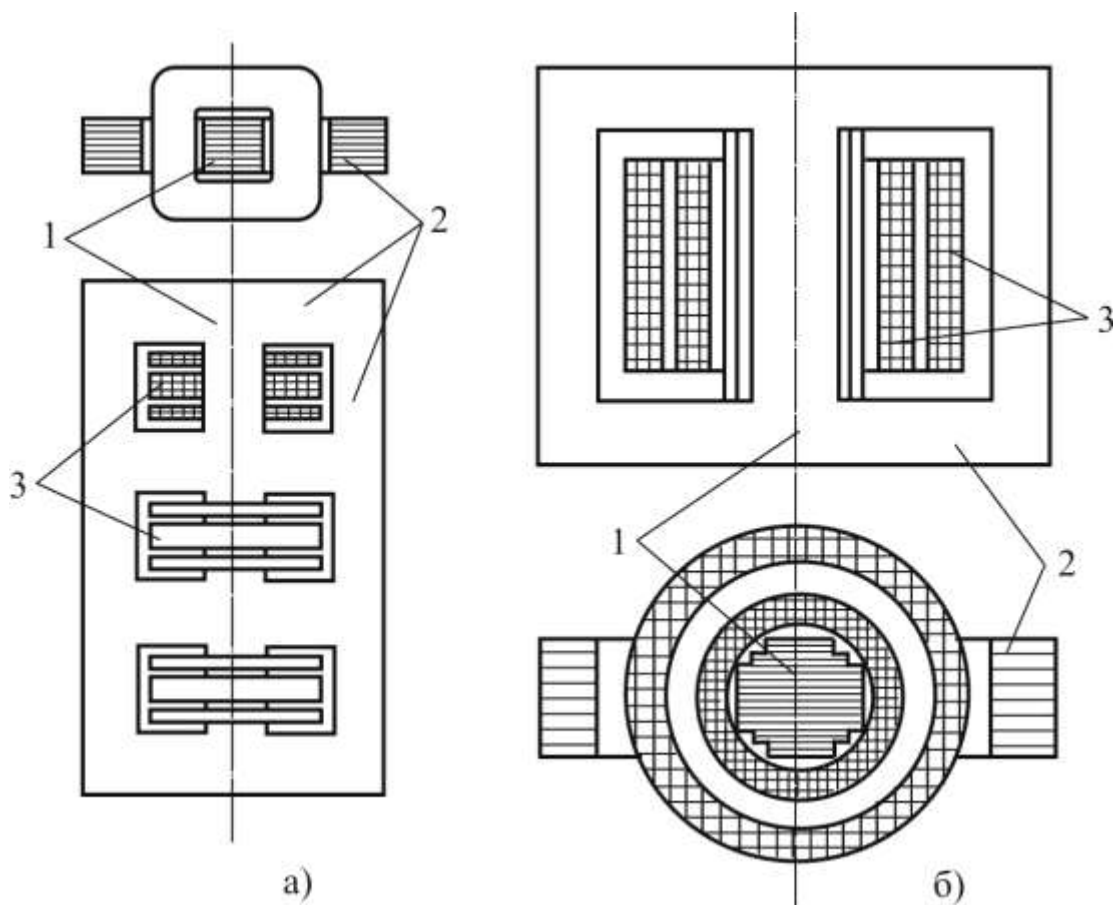


Рис. 2.3. Броньові магнітні системи трифазного (а) і однофазного (б) трансформаторів: 1 - стрижень; 2 - ярмо; 3 - обмотки

В трансформаторах середньої і великої потужності використовуються стрижні зі східчастою формою поперечного переріза, уписаної в окружність, охоплену кільцевими обмотками. Ширина пластин, що визначає ширину і товщину пакетів, що утворюють східчастий перетин, вибирається з умови одержання найбільшого коефіцієнта заповнення описаної окружності стрижня при мінімальних відходах листової сталі чи рулонної сталі. Для зниження струму неробочого руху шляхом зменшення технологічних зазорів у стиках, зборка магнітопровода ведеться з чергування шарів пластин у плетіння, тобто шихтовкою.

Стрижні і ярма шихтованої магнітної системи повинні бути стягнуті і скріплені так, щоб магнітопровід являв собою досить тверду конструкцію як механічна основа трансформатора. Стяжка і кріплення повинні забезпечувати його достатню

механічну міцність після розшихтовки верхнього ярма при посадці обмоток, а також забезпечувати відсутність вільної вібрації пластин і мінімальний рівень шуму при роботі трансформатора в мережі. Ці вимоги досить добре задовольняються при рівномірно розподіленій напрузі стиску між пластинами стрижня і ярма, рівного $0,4 - 0,6$ МПа.

Особливістю плоскої стрижневої схеми магнітопроводу є магнітна несиметрія і рівність магнітних потоків ярем і крайніх стрижнів (рис. 2.4).

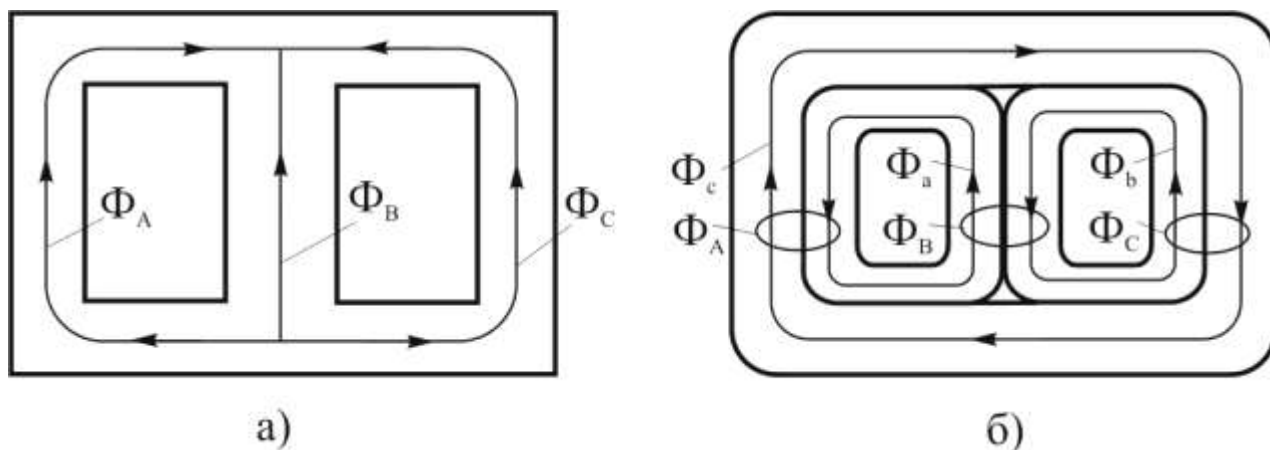


Рис. 2.4. Схеми стрижневої (а) і броньовий (б) схеми плоского магнітного кола трансформатора

Тому площа поперечного переріза ярма повинна бути більше чи дорівнює площі перетину стрижня.

При використанні конструкції (рис. 2.3, б) у трансформаторах малої потужності масового випуску різко здорожується виробництво, тому що зазначені рішення складні для автоматизованого виробництва. Тому використовуються стикові магнітопроводи, шихтовані із Ш-образних пластин (рис. 2.5) і розрізні стикові магнітопроводи (рис. 2.6).

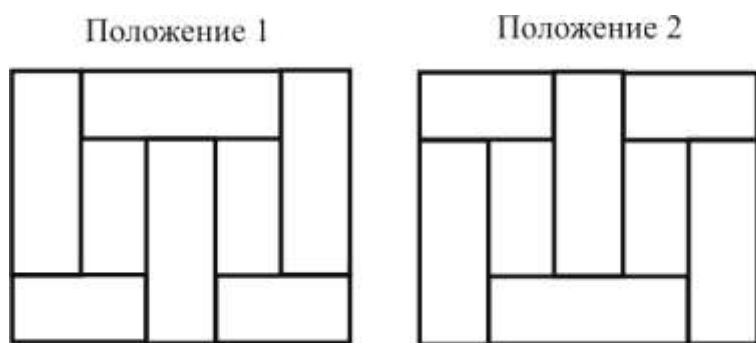


Рис. 2.5. Порядок зборки шихтованої з прямими стиками трифазної магнітної

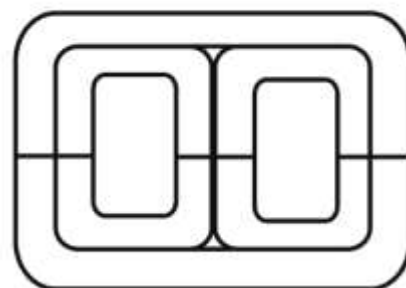


Рис. 2.6. Порядок зборки навитої зі стрічки

Однак недоліком шихтованих зі штампованих пластин магнітопроводів є значна кількість штампованих відходів електротехнічної сталі при виробництві.

В трифазному витому магнітопроводі (рис. 2.4, б) магнітний потік стрижня є геометричною сумою потоків двох навитих магнітно незв'язаних кільцевих контурів прямокутної форми. Наприклад, потік фази А можна представити у виді суми:

$$\dot{\Phi}_A = \dot{\Phi}_a + (-\dot{\Phi}_c). \quad (2.1)$$

Перехід магнітного потоку з одного контуру в інший утруднений, тому що три кільця цієї магнітної системи навиваються роздільно, і для зручності зборки між ними повинний дотримуватися невеликий технологічний зазор. Це значить, що магнітний потік і індукція в кожному кільці зв'язані з аналогічними величинами стрижневого шихтованого трансформатора і фактично індукція в кожному кільці повинна бути в $2\sqrt{3}$ більше загальної розрахункової індукції в стрижні:

$$\Phi_k = 2\Phi_c / \sqrt{3}; \quad B_k = 2B_c / \sqrt{3}, \quad (2.2)$$

де Φ_k и B_k , Φ_c и B_c – відповідно потоки й амплітуди і середні значення індукції в стрижнях і ярмах.

Крім того, коефіцієнт заповнення обмотувального вікна внаслідок наявності заокруглень радіусом r_m трансформатора (рис. 2.4) трохи нижче, ніж при їхній відсутності.

По зазначених причинах варіант трифазного трансформатора з плоскими витим магнітопроводом по питомій матеріалоемності й іншим показникам усту-

пає штампованому аналогу. Таким чином, зібрані в плетіння плоскі шихтовані магнітні системи, а також відносної простої зборки одержали найбільш широке поширення.

Однак існують недоліки наявних технічних рішень трансформаторів малої потужності.

Так загальним недоліком є підвищена відносна витрата міді. Обмотки таких трансформаторів у поперечному перерізі мають форму прямокутника з внутрішніми кутами, округленими радіусами r_0 . При цьому, у випадку перегину проводу по окружності малого радіуса r_0 , погіршується електрична міцність обмотки при короткому замиканні, зростають середня довжина витка і маса обмотки.

В наступний час у силових трифазних трансформаторах середньої і великої потужності знаходять усе більш широке застосування симетричних просторові магнітні системи (рис. 2.7).

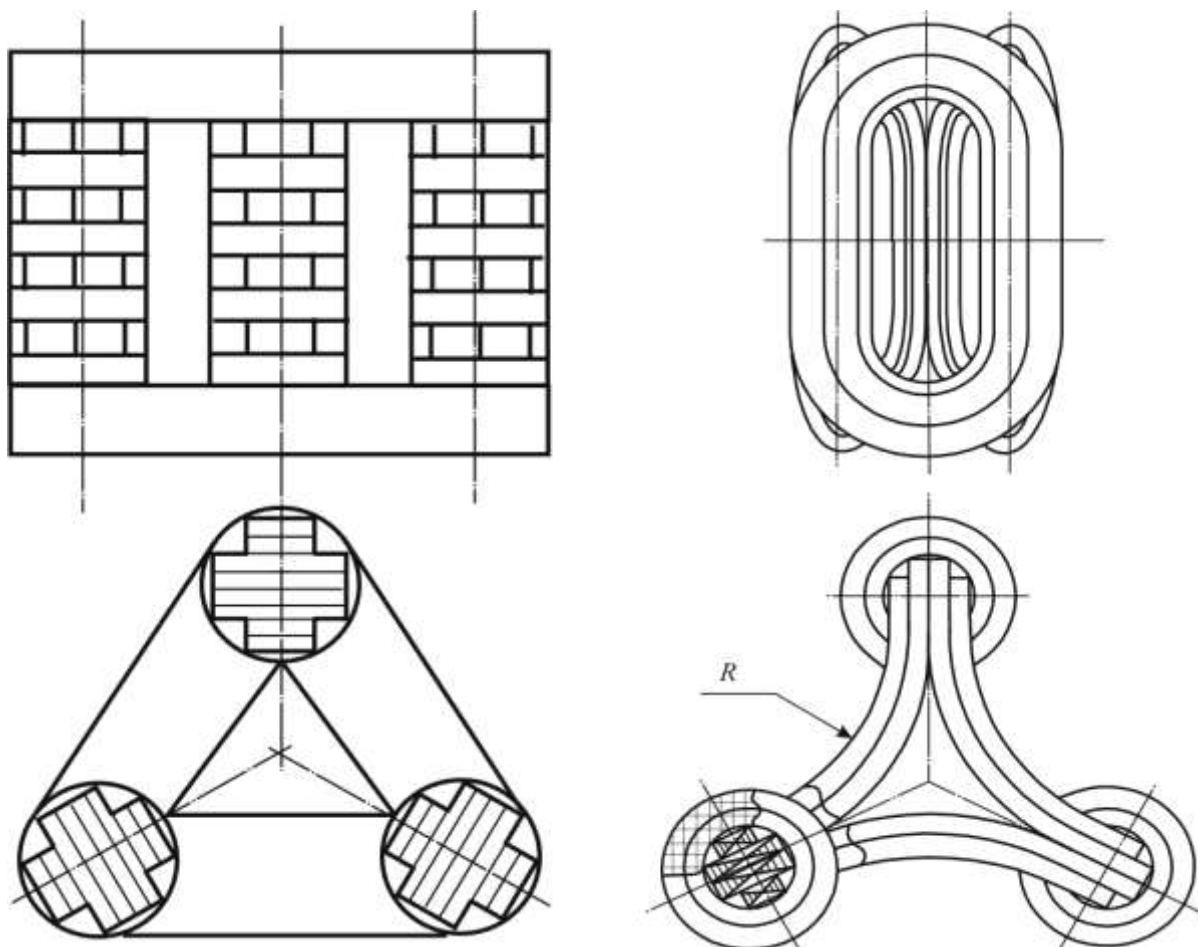


Рис. 2.7. Просторова стикова
магнітна система з стрижнями,
зібраними з плоских пластин

Рис. 2.8. Навита нерозрізна кільцева
просторова магнітна система

Стиковий магнітопровід (рис. 2.5) складається зі стрижнів, зібраних з пакетів плоских пластин (рис. 2.3), чи вигнутих за евольвентою пластин одного розміру, а також зі стрижнів, намотаних зі стрічки ЕТС по спіралі (рис. 2.6).

Ярма трикутної форми намотуються зі стрічкової ЕТС. Обмотки на таку систему встановлюються при зборці з окремих частин.

Магнітний потік і площа поперечного переріза стали ярма такої системи:

$$\Phi_{\text{я}} = \Phi_{\text{с}} / \sqrt{3}; \quad \Pi_{\text{я}} = \Pi_{\text{с}} / \sqrt{3}, \quad (2.3)$$

де $\Phi_{\text{я}}$ і $\Pi_{\text{я}}$ – магнітний потік і площа поперечного переріза витого ярма; $\Pi_{\text{с}}$ – площа поперечного переріза стали стрижня.

Однак у магнітопроводі (рис. 2.7) стрижні з'єднані шістьма я ділянками ярма, а в магнітопроводі (рис. 2.1) чотирма ділянками. Тому, з урахуванням збільшення загальної довжини ярма, маса активної сталі і втрати холостого ходу знижуються не відповідно до $\sqrt{3}$, а на 12-15%. При цьому, у зв'язку з наявністю двох стиків, струм холостого ходу зростають на 50-90 % для трансформаторів потужністю 160-630 кВ·А і на 90-140 % для трансформаторів потужністю 25-100 кВ·А у порівнянні із системою (рис. 2.1).

Існує також навита нерозрізна магнітна система (рис. 2.8) з трьома роздільними кільцевими контурами замикання магнітного потоку.

Для збільшення коефіцієнта заповнення описаної окружності навколо стрижневої частини кожного з контурів, кільця виконуються складеними і піддається деформації - згинаються по кривій радіусом $R_{\text{к}}$ і обпікаються. Обмотки намотуються після зборки системи на спеціальному верстаті.

Магнітопровід системи (рис. 2.8) у два рази знижує струм холостого ходу трансформатора, однак індукція в кожному контурі, аналогічно системи (рис. 2.5, б)

в $2/\sqrt{3}$ більше загальної розрахункової індукції в стрижні. Його застосування реальне можливо в трансформаторах потужністю до 630 кВ·А.

На основі викладеного, можна укласти, що найменшою питомою і технологічною матеріалоємністю відрізняються трансформатор із просторовими стиковими магнітопроводами (рис. 2.7 и 2.8). Однак стрижні з евольвентно-вигнутих пластин і навитої плашмя стрічки містять центральний технологічний отвір діаметром d_1 (рис. 2.9). При малій потужності трансформатора величина порівнянна з діаметром d стержня і різко знижує коефіцієнт заповнення внутрішнього простору обмотки. Крім того, торцеві поверхні кожного стрижня для зменшення стикових зазорів при малій потужності трансформатора повинні бути піддані механічній обробці.

У зв'язку з зазначеними особливостями і складністю конструкції, кращою стосовно до трансформаторів малої потужності, середньої і великої потужності система просторового магнітопроводу (рис. 2.7) стикова зі стрижнями, зібраними з плоских пластин і навитих ярем, технологічно незастосовна для трансформаторів малої потужності.

У даному дипломному проєкті для комплектації системи АРЗ суднового синхронного генератора запропоновано використати трифазну електромагнітну систему (ЕМС) з просторовим магнітопроводом схеми (рис. 2.7). Вказане технічне рішення дозволяє підвищити технічний рівень ТФК.

2.2. Технічні рішення активної частини трансформатора малої потужності з просторовим магнітопроводом

Запропонована й описана вище система магнітопроводу може бути використана в трансформаторі малої потужності у випадку його удосконалення.

Удосконалення трифазного трансформатора можливо шляхом зміни конструкції і конфігурації перетинів стрижнів і ярем магнітопроводу.

Забезпечення маловідхідного автоматизованого виробництва малих трифазних трансформаторів зі зниженої питомої і технологічної матеріалоємністю, що є

головною задачею даного проекту, можливо на основі маловідхідного магнітопроводу, що містить кільцеве вите ярмо [10, 11] і стрижні, виконувані шляхом порізки кільцевої заготовки.

У трансформаторі (рис. 2.10) с симетричним просторової магнітопроводом зазначеного типу, перетин кожного з трьох стрижнів повинний складатися з двох секторів abc і $a'b'c'$, утворених радіусом, рівним довжині ярма $l_{\text{я}}$ і центральними кутами 60° , а також розташованими між секторами прямокутником $abb'a'$ с довжиною, рівної $l_{\text{я}}$ і шириною, рівній ширині грані ярма з конфігурацією, описаної нижче, на стику зі стрижнем. Конструктивно стрижні замкнуті з торців Кільцевими навитими ярмами з конфігурацією внутрішнього контуру у виді симетричного шестигранника з трьома гранями шириною b_c і трьома гранями шириною b_o обмотувального вікна. Стрижні у відповідності зі способом [12] доцільно виконувати розрізанням кільцевою тригранною навитою заготовкою.

При зборці такого трансформатора сполучаються ділянки контурів трьох стрижнів між площами розрізів заготівлі з відповідними їм ділянкам зовнішнього і внутрішнього контурів ярма при обмотувальних вікнах з паралельними стінками.

При цьому забезпечується практично безвідхідне виробництво, оскільки відходи мінімальні, тому що ширина обмотувального вікна набагато більше ширини інструмента, що ріже, (нитку електрода, фреза, алмазний диск). У порівнянні з традиційними аналогами знижуються маса сталі і міді активний частини.

Конструктивна схема зазначеного трансформатора представлена на рис.2.11.

Зазначена технологія може бути використана при виготовленні магнітопроводів з діаметром описаного кола до 150 мм. Стрижні магнітопроводу можуть бути шихтованими у виді пакетів сталі різної довжини, чи мати іншу конструкцію.

У даній роботі стрижні магнітопроводу виконуються шихтованими у виді пакетів сталі різної довжини, розташованих поперек контуру стрижня. Це зроблено з метою рівномірного розподілу індукції в стрижнях.

Для обґрунтування можливості зниження матеріалоемності трифазного трансформатора малої потужності доцільно порівняльний аналіз запропонованого магнітопроводу (рис. 2.10) з кращих із аналогів (рис. 2.7 и 2.8) при дотриманні принципу електромагнітної еквівалентний.

Основними розмірами трансформаторами є елементи геометрії, що визначають площу перетину стрижня, висота обмоток чи висота обмотувального вікна усереднений діаметр витків обмоток, що визначає ширину обмоткового вікна. У зв'язку з цим, електромагнітно еквівалентними є трансформатори з однаковою площею Π_c перетину стрижні, однаковими обмотувальними даними (числами w_1 , w_2 , w_3), а також з однаковою площею Π_o обмоткового вікна.

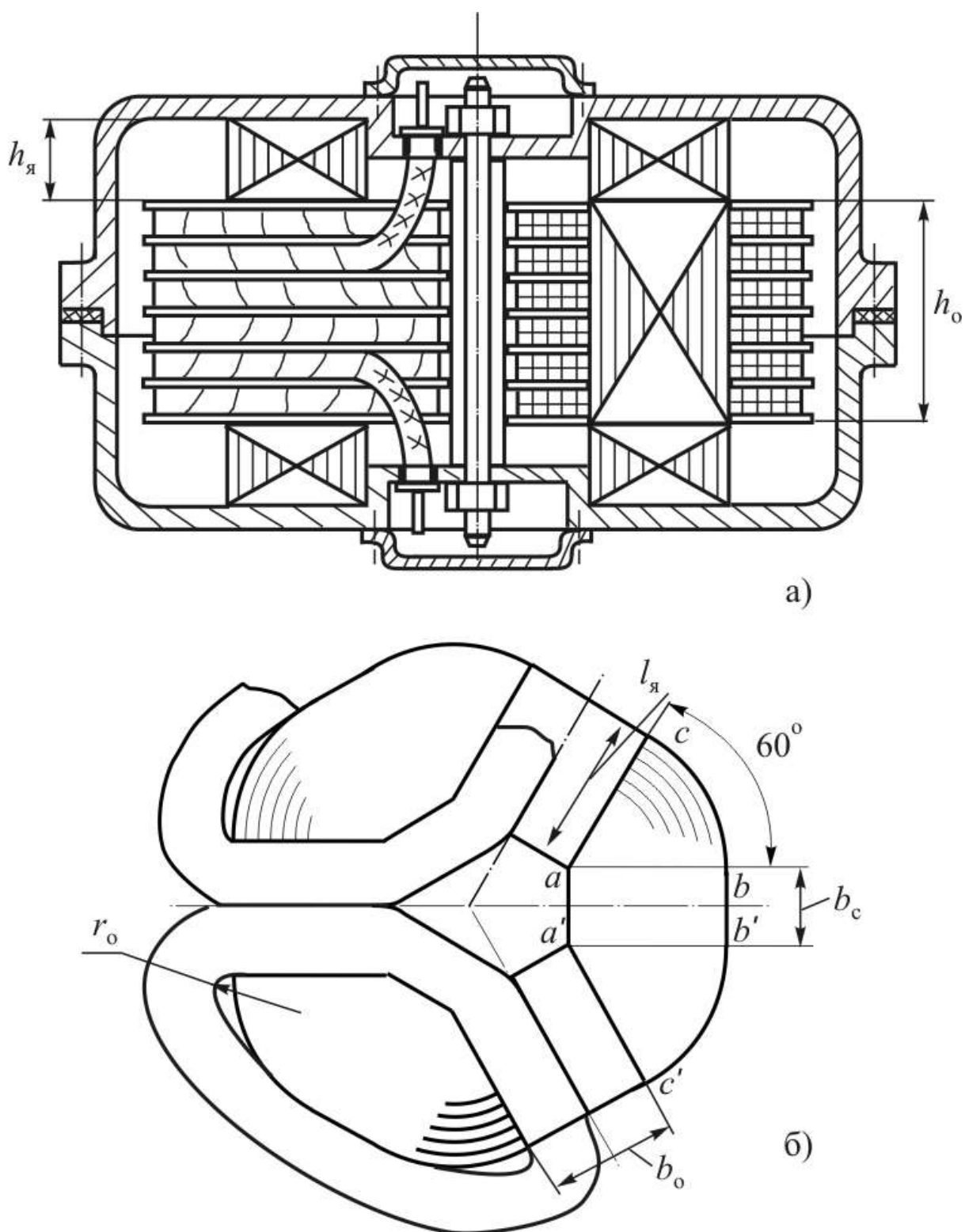


Рис. 2.10. Схема трифазного трансформатора малої потужності закритого виконання з просторовими стиковим магнітопроводом:
 а - принципова конструкція; б - активна частина

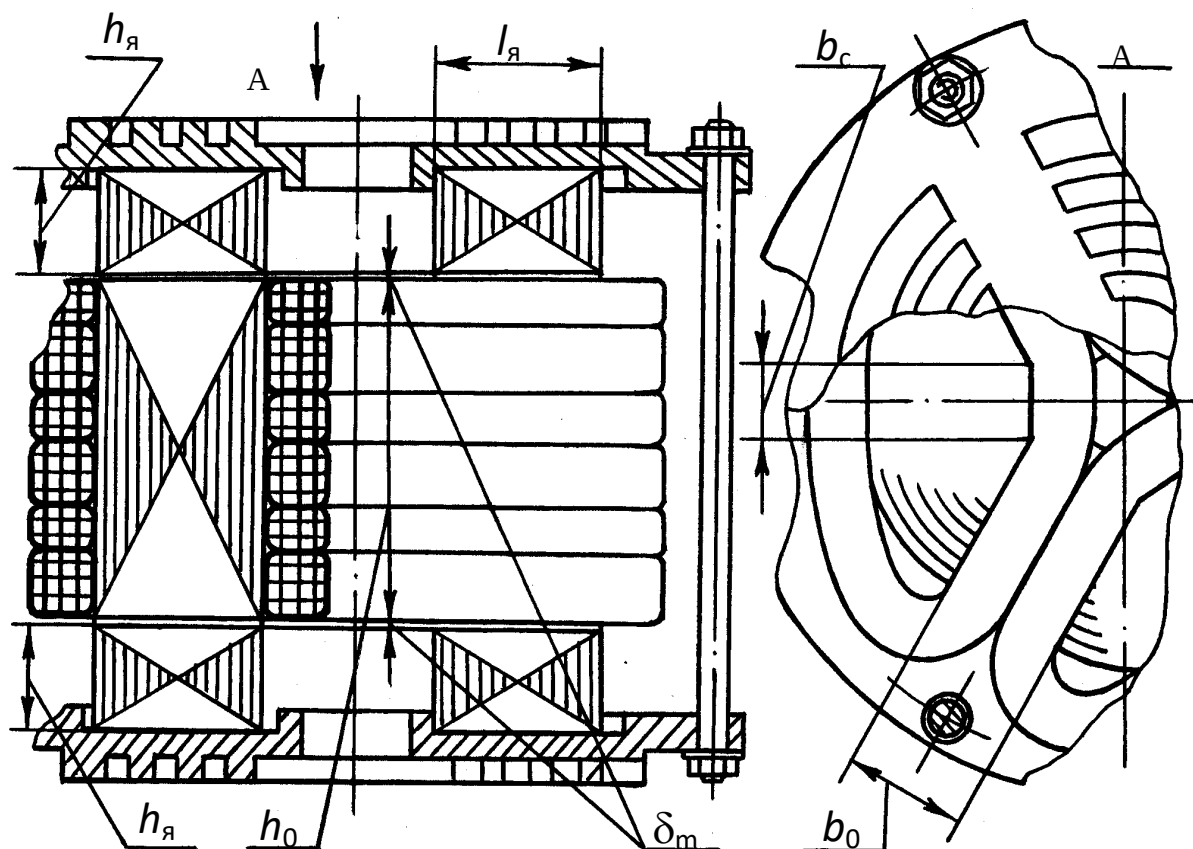


Рис. 2.11. Схема активної частини трифазного трансформатора малої потужності з просторовим магнітопроводом

При ідентичних величинах Π_c і Π_o обсяги і маси стали стрижнів порівнюваних трансформаторів однакові і різні в матеріалоемності трансформаторів визначаються особливостями конструкції і конфігурації стрижнів і ярем.

Мінімальний обсяг одного ярма, що відповідає ідеалізованому магнітопроводу трансформатора (рис. 2.7) визначається відповідно до рис. 2.12, а виразом:

$$V'_{\text{ятр}} = (\pi d'_c + 3b) \Pi_c / \sqrt{3}, \quad (2.3)$$

де $\Pi_c / \sqrt{3}$ - площа перетину ярма;

d'_c - діаметр стрижня;

b - сторона рівностороннього трикутника внутрішнього контуру ярма.

З рис. 2.12, а випливає, що розмір b визначається виразом:

$$b = AC - 2CC' = d'_c + b_o - d'_c \cos(\pi/6) = d'_c \left(1 + \left(-\sqrt{3}\right)/2\right) + b_o. \quad (2.4)$$

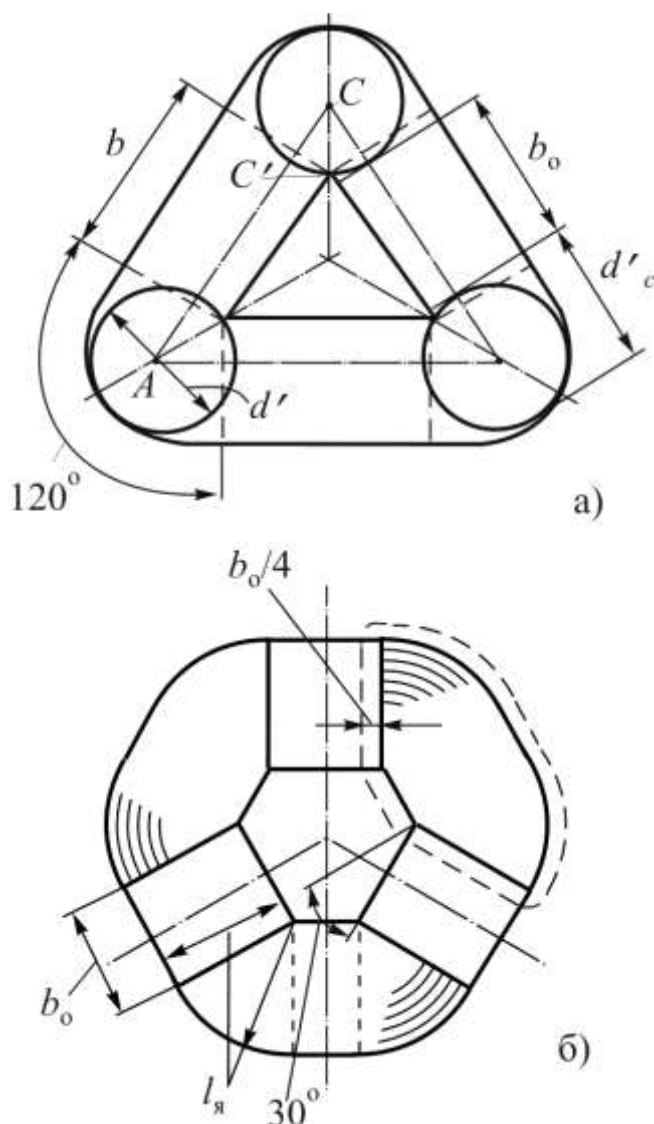


Рис. 2.12. Особливості геометричних співвідношень стрижів і ярем стикового просторового магнітопроводу:

а – з тригранним контуром ярма; б – с шестигранним контуром ярма.

З урахуванням (2.4), (2.3) запишеться у виді:

$$V'_{ятр} = \left\{ \pi d'_c + 3 \left[d'_c \left(1 - \sqrt{3}/2 \right) + b_o \right] \right\} \Pi_c / \sqrt{3}. \quad (2.5)$$

Обсяг одного ярма запропонованого магнітопроводу при рівності ($b_c = b_o$) визначиться, відповідно до рис. 2.12, б виразом:

$$V_{я} = (6b_o + \pi l_{я}) \Pi_c / \sqrt{3}, \quad (2.6)$$

де радіальний розмір магнітопроводу визначиться з вираження площі перетину стрижня

$$\Pi_c = l_{я} b_o + \pi l_{я}^2 / 3;$$

$$l_{\text{я}} = \sqrt{\frac{3\Pi_{\text{с}}}{\pi} + \left(\frac{3b_{\text{o}}}{2\pi}\right)^2} - \frac{3b_{\text{o}}}{2\pi}. \quad (2.7)$$

З врахуванням (2.7), (2.6) перетвориться до виду:

$$V_{\text{я}} = \frac{\Pi_{\text{с}}}{\sqrt{3}} \left\{ 6b_{\text{o}} + \pi \left[\sqrt{\frac{3\Pi_{\text{с}}}{\pi} + \left(\frac{3b_{\text{o}}}{2\pi}\right)^2} - \frac{3b_{\text{o}}}{2\pi} \right] \right\}. \quad (2.8)$$

Максимальна ефективність використання запропонованої конструкції магнітопровода досягається при виконанні умови:

$$\begin{aligned} V'_{\text{ятр}} &= \left\{ \pi d'_{\text{с}} + 3 \left[d'_{\text{с}} \left(1 - \sqrt{3}/2 \right) + b_{\text{o}} \right] \right\} \Pi_{\text{с}} / \sqrt{3} \geq V_{\text{я}} = \\ &= \left\{ 6b_{\text{o}} + \pi \left[\sqrt{\frac{3\Pi_{\text{с}}}{\pi} + \left(\frac{3b_{\text{o}}}{2\pi}\right)^2} - \frac{3b_{\text{o}}}{2\pi} \right] \right\} \Pi_{\text{с}} / \sqrt{3}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Після перетворення (2.9) може бути спрощене до виду:

$$\begin{aligned} \Pi'_{\text{с}} &= \pi d'^2_{\text{с}} / 4; \quad d'_{\text{с}} (\pi + 3 - 1,5\sqrt{3}) + 3b_{\text{o}} \geq \pi \sqrt{\frac{3\pi d'^2_{\text{с}}}{4\pi} + \frac{9b_{\text{o}}^2}{4\pi^2}} - 1,5b_{\text{o}}; \\ d'_{\text{с}} (3,1416 + 3 - 2,5981) + 3b_{\text{o}} &\geq 6b_{\text{o}} + \pi \sqrt{0,75d'^2_{\text{с}} + 0,228^2 b_{\text{o}}} - 1,5b_{\text{o}}; \\ 3,535d'_{\text{с}} - 1,5b_{\text{o}} &\geq \pi \sqrt{0,75d'^2_{\text{с}} + 0,228^2 b_{\text{o}}} - 1,5b_{\text{o}}; \\ 0,5222d'^2_{\text{с}} - 2 \cdot 0,5386d'_{\text{с}}b_{\text{o}} &\geq 0; \\ d'_{\text{с}} &\geq 2,0628b_{\text{o}}. \end{aligned}$$

У такий спосіб, $d_{\text{с}} > d'_{\text{с}} \geq 2,0628b_{\text{o}}$.

З [13] випливає, що для реальних трансформаторів з геометричними з-відносинами, близькими до оптимальних, умова (2.10) виконується.

Усереднена довжина витка обмоток трансформатора з магнітопроводом (рис. 2.12, а):

$$l_{\text{втр}} = \pi(d'_{\text{с}} + b_{\text{o}}/2). \quad (2.11)$$

Мінімальна усереднена довжина витка обмоток трансформатора (рис.2.10), відповідно до пунктирної лінії на рис. 2.12, б:

$$l = 2b_{\text{o}} + 2l_{\text{я}} + 2\pi(l_{\text{я}} + b_{\text{o}}/4)/3 + \pi b_{\text{o}}/3. \quad (2.12)$$

В реальному трансформаторі з магнітопроводом схеми (рис. 2.7) з ЕТС ярмо виконане складовим із двох кілець прямокутної форми з внутрішнім зкругленням радіусом r_b , а задане P_c , незалежно від потужності, через наявність технологічного отвору діаметром d_1 забезпечується при $d_c > d'_c$. У зв'язку з цим, маса якоря й усереднена довжина витка обмоток $V_{ятр} > V'_{ятр}$; $l_{wтр} > l'_{wтр}$.

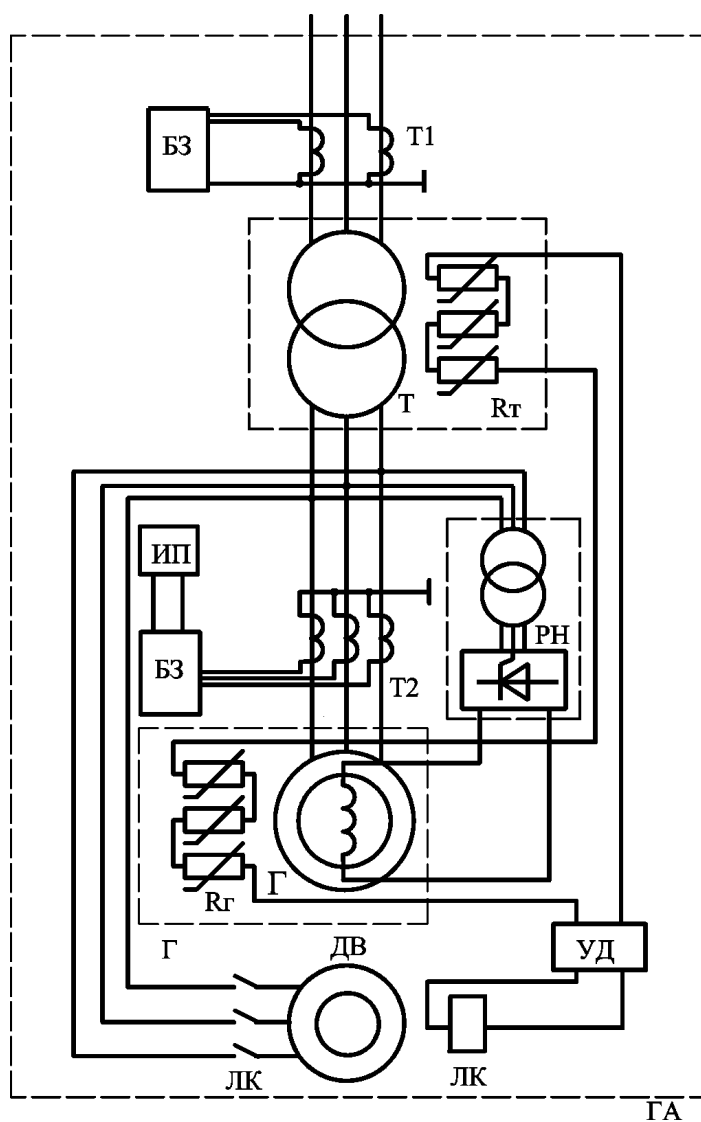
Порівняння (2.11) і (2.12) для конкретних d_c , b_o і l_y еквівалентних трансформаторів показує, що $l_{wтр} > l'_{wтр}$ на 10-15 %, тому що мінімальній довжині витка, що охоплює задану площу, відповідає окружність. Крім того, технічні рішення магнітопроводу (рис. 2.10, б) призначені для трансформаторів малої потужності. В існуючих конструкцій (рис. 2.1) зазначених трансформаторів, у зв'язку з наявністю чотирьох окружностей радіусом r_o , усереднена довжина витка обмотки перевищує значення (2.12).

З аналізу (2.9)-(2.12) також впливає, що маса і матеріалоемність обмотки і трансформатора (рис. 2.10) у цілому знижуються при зменшенні об'єму ярма $V_{ятр}$ і довжини обмотки $l_{wтр}$.

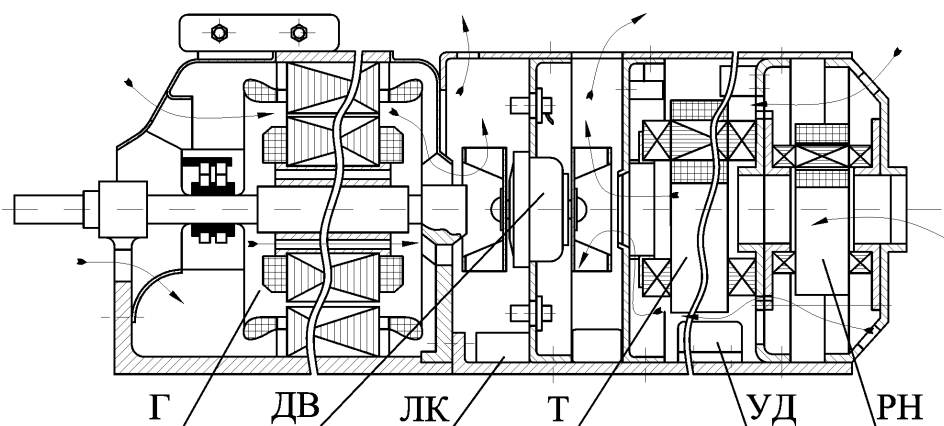
На підставі викладеного, можна зробити висновок, що запропоноване технічне рішення магнітопроводу трансформатора (рис. 2.10) забезпечує підвищення технічного рівня і зниження матеріалоемності малих трифазних трансформаторів.

Також слід відзначити, що використання просторової електромагнітної схеми забезпечує можливість об'єднання комплектного електроустаткування в єдині функціонально-пов'язані агрегати. Вказані схеми забезпечують конструктивну відповідність циліндричній формі електричній машині, кращі масогабаритні показники і відповідність конфігурації своїй активній частині (АЧ) спрямованому уздовж осі агрегату потоку охолодження.

На рис. 2.13 представлені принципова електрична і конструктивна схеми блоку генератор – трансформатор системи АРВ СГ з автоматичною примусовою вентиляцією.



а)



б)

Рис. 2.13. Принципова електрична (а) і конструктивна (б) схеми блока генератор – трансформатор

Як правило, блокові і транспортні генеруючі агрегати містять генератор G , трансформатор T , блоки захисту БЗ з вимірювальними трансформаторами $T1$ і $T2$ і контрольно-вимірювальними приладами ИП, а також пристрій автоматичного регулювання напруги РН (рис. 2.13, а). З метою зниження втрат на режимах недовантаження і підвищення ККД вентилятора, в конструктивній частині G (рис 2.13, б) відсутня самовентиляція. Форсоване охолодження G , T і комплектного устаткування забезпечується блоковим вентилятором з асинхронним приводом (двигун ДВ, пускач ЛК, пристрій управління УД) з пуском за допомогою датчиків температури. Вказані датчики (R_G , R_T) вбудовуються в ділянки фаз обмоток G і T , що максимально нагріваються [14].

2.3. Висновки до розділу 2

2.3.1. Відомі конструктивні рішення ТФК є досить габаритними та металоемними і не задовольняють сучасним вимогам.

2.3.2. Технічні рішення традиційних і тих, що перебувають у виробництві ЕМС однофазних і трифазних трансформаторів, не задовольняють достатньою мірою вимогам компактності і надійності, а також умовам ресурсозбереження.

2.3.3. З метою вирішення питань енергоресурсозбереження в судновому електрообладнанні доцільно використовувати нові просторові ЕМС, зокрема з витим стиковим магнітопроводом та секторною конфігурацією стрижнів.

2.3.4. Використання просторової електромагнітної схеми забезпечує можливість об'єднання комплектного електроустаткування в єдині функціонально-пов'язані агрегати.

3. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОВОГО КОМПАУНДУВАННЯ З АЛЮМІНІЄВОЮ ОБМОТКОЮ

При проектуванні трансформатора повинно бути забезпечено відповідність сучасним вимогам економічності його виробництва і експлуатації, а також електричної, механічної міцності і нагрівостійкості обмоток і інших частин.

Рішення поставленої задачі досягається правильним вибором розмірів і обмоткових даних трансформатора, раціональним вибором конструкції трансформатора і матеріалів активної частини і конструктивної частини, правильно організованих технологічних процесів виготовлення.

3.1. Визначення головних розмірів і геометричних співвідношень з оптимізацією за критерієм мінімуму маси

Початкові дані і основні електричні величини:

$S_n = 53 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – розрахункова повна потужність трансформатора;

$S_{21} = 14 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – повна потужність обмотки вимірювання напруги;

$S_{22} = 39 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – повна потужність обмотки вимірювання струму;

$m = 3$ – число фаз;

$f = 50 \text{ Гц}$ – частота мережі;

$\cos \varphi_2 = 0,8$ – коефіцієнт потужності вторинних обмоток;

$U_{1л} = 19,2 \text{ В}$ $U_{1ф} = 11,1 \text{ В}$ – лінійна і фазна напруги первинної обмотки відповідно.

Лінійна і фазна напруги обмотки вимірювання напруги:

$U_{21л} = 400 \text{ В}$; $U_{21ф} = 231 \text{ В}$.

Лінійна і фазна напруги обмотки вимірювання струму:

$U_{22л} = 235 \text{ В}$; $U_{22ф} = 136 \text{ В}$.

Активна потужність обмотки вимірювання напруги трансформатора фазового компаундування

$$P_{21} = S_{21} \cos \varphi_{21} = 14 \cdot 0,8 = 11,2 \text{ кВт.}$$

Активна потужність обмотки вимірювання струму трансформатора фазового компаундування

$$P_{22} = S_{22} \cos \varphi_{22} = 39 \cdot 0,8 = 31,2 \text{ кВт.}$$

Активна потужність вторинних обмоток триобмоткового трансформатора:

$$P_{2H} = S_{21} \cos \varphi_{21} + S_{22} \cos \varphi_{22} = 11,2 + 31,2 = 42,4 \text{ кВт.}$$

Попередній розрахунковий лінійний струм первинної обмотки

$$I_{1H} = P_{2H} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_e \cdot \cos \varphi'_1) =$$

$$I_{1H} = 42,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 19,2 \cdot 0,9 \cdot 0,912) = 1942 \text{ А,}$$

де $\cos \varphi'_1 = 1 / \sqrt{1 + 0,45^2} = 0,912$, $\eta_e = 0,9$ – попередні розрахункові енергетичні коефіцієнти трансформатора.

Номінальні лінійні струми вторинних обмоток триобмоткового трансформатора:

$$I_{21} = S_{21} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_{21}) = 14 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 16,166 \text{ А;}$$

$$I_{22} = S_{22} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_{22}) = 39 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 235) = 76,652 \text{ А.}$$

Попередні електромагнітні навантаження приймаються рівними: $B_c = 1,2 \text{ Тл}$;
 $\Delta_1 = 150 \text{ А/см}^2$; $\Delta_{21} = 150 \text{ А/см}^2$; $\Delta_{22} = 150 \text{ А/см}^2$.

Коефіцієнти напруг і потужностей первинної і вторинних обмоток:

$$K_{U1} = 1 - \frac{\Delta U\%}{200} = 1 - \frac{1}{200} = 0,995;$$

$$K_{U2} = 1 + \frac{\Delta U\%}{200} = 1 + \frac{1}{200} = 1,005;$$

$$K_{p21} = \frac{P_{21}}{P_2} = \frac{11,2}{42,4} = 0,264; \quad K_{p22} = \frac{P_{22}}{P_2} = \frac{31,2}{42,4} = 0,736.$$

Коефіцієнт початкових даних

$$K_{\text{пд}} = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot B_c} \cdot \left(\frac{K_{U1}}{\Delta_1 \eta_e \cos \varphi_1} + \frac{K_{U21} K_{p21}}{\Delta_{21}} + \frac{K_{U22} K_{p22}}{\Delta_{22}} \right) =$$

Відмітної й ускладнюючої розрахунки особливістю трансформатора з просторовим магнітопроводом є забезпечення розрахункового значення перетину стрижня Π_c при різних геометричних співвідношеннях елементів конфігурації стрижнів і ярма. Зазначені співвідношення залежать від величини зовнішнього D_3 і внутрішнього D_B діаметрів контурних окружностей магнітопроводу (відповідно зовнішнього і внутрішнього контуру магнітопроводу), а також відносини величин граней b_c і b_o контуру магнітопроводу (рис. 3.1).

Маса симетричного просторового магнітопроводу (рис. 3.1) визначається відповідно до [12] виразом

$$\begin{aligned} m_{\text{м}\Delta\text{ар}} &= \gamma_c [3h_o \Pi_c + 6(\Pi_y + \Pi_{\text{я}})h_{\text{я}}] = \gamma_c \left\{ 3\lambda_o D_B \sin(\pi/3) \pi k_K k_{3c} D_B^2 (a_M - 1)^2 / 12 \right\} + \\ &+ 6 \left[\pi D_B^2 (a_M - 1)^2 / 12 + \sqrt{3} D_B^2 (a_M - 1) / 4 \right] 0,3 k_K k_{3c} D_B (a_M - 1) \Big\} = \\ &= 0,68 \gamma_c k_K k_{3c} D_B^3 (a_M - 1)^2 [\lambda_o + 0,693(a_M - 1) + 1,146], \end{aligned}$$

де $a_M = D_3 / D_B$ і $\lambda_o = h_o / b_o$ – незалежні змінні координати.

При виконанні перетворень [12] вираз маси спрощується до вигляду

$$\begin{aligned} m_{\text{м}\Delta\text{ар}} &= 0,68 \gamma_c k_K k_{3c} \left(1,5^4 \sqrt{k_{\text{ид}} / [k_K k_{3c} k_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2]} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [\lambda_o + 0,693(a_M - 1) + 1,146] = \gamma_c \left(4 \sqrt{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{3o})} \right)^3 k_{\text{мм}\Delta\text{ар}}, \end{aligned}$$

де $k_{\text{мм}\Delta\text{ар}}$ – коефіцієнт зміни маси симетричного просторового магнітопроводу,

$$\begin{aligned} k_{\text{мм}\Delta\text{ар}} &= 2,295 k_K k_{3c} \left(4 \sqrt{1 / [k_K \lambda_o (a_M - 1)^2]} \right)^3 (a_M - 1)^2 \times \\ &\times [\lambda_o + 0,693(a_M - 1) + 1,146]. \end{aligned}$$

Маса алюмінієвої обмотки відповідно до [12] визначається виразом

$$\begin{aligned} m_{o\Delta\text{ар}} &= 1,53 \gamma_o k_{3o} \lambda_o (0,866 D_B)^2 1,36 D_B [1 + 1,5(a_M - 1)] = \\ &= 1,53 \gamma_o k_{3o} \lambda_o [1 + 1,5(a_M - 1)] D_B^3. \end{aligned}$$

Після перетворень вираз маси обмотки спрощується до вигляду

$$m_{o\Delta\text{ар}} = 1,53 \gamma_o k_{3o} \lambda_o [1 + 1,5(a_M - 1)] \left(1,5^4 \sqrt{k_{\text{ид}} / [k_K k_{3c} k_{3o} \lambda_o (a_M - 1)^2]} \right)^3 =$$

$$= \gamma_o \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{зс} k_{зо})} \right)^3 k_{мо\Delta ap},$$

де $k_{мо\Delta ap}$ – коефіцієнт зміни маси обмотки,

$$k_{мо\Delta ap} = 5,16 k_{зо} \lambda_o \left(\sqrt[4]{1 / [k_{к} \lambda_o (a_m - 1)^2]} \right)^3 [1 + 1,5(a_m - 1)].$$

Маса активних матеріалів

$$\begin{aligned} m_{\Delta ap} &= m_{мм\Delta ap} + m_{о\Delta ap} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{зс} k_{зо})} \right)^3 k_{мм\Delta ap} + \gamma_o \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{зс} k_{зо})} \right)^3 k_{мо\Delta ap} = \\ &= \gamma_c \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{зс} k_{зо})} \right)^3 k_{м\Delta ap}, \end{aligned}$$

де $k_{м\Delta ap}$ – коефіцієнт зміни маси активних матеріалів,

$$\begin{aligned} k_{м\Delta ap} &= k_{мм\Delta ap} + \gamma_o k_{мо\Delta ap} / \gamma_c = 2,295 \left(\sqrt[4]{1 / (k_{к} \lambda_o (a_m - 1)^2)} \right)^3 \times \\ &\times \{ k_{к} k_{зс} (a_m - 1)^2 [\lambda_o + 0,693(a_m - 1) + 1,146] + \\ &+ 2,248 k_{зо} \lambda_o [1 + 1,5(a_m - 1)] \gamma_o / \gamma_c \}. \end{aligned}$$

Залежності коефіцієнту зміни маси активних матеріалів від незалежних координат приведені на рис. 3.2.

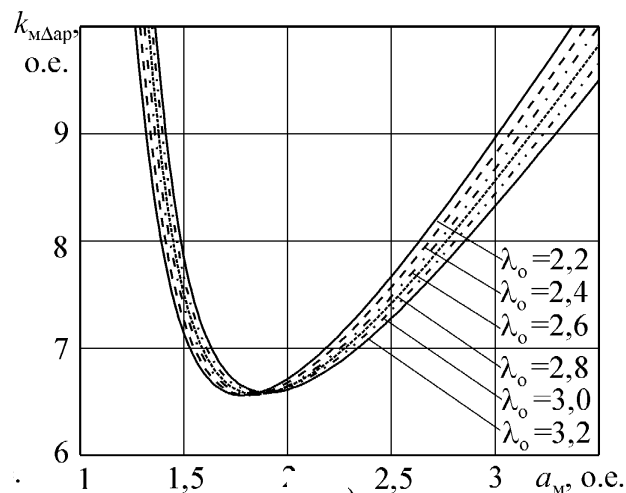


Рис. 3.2. Залежності коефіцієнту зміни маси активних матеріалів від незалежних змінних координат

Розрахунок трансформатора в цілому є математично нездійсненним завданням з великим числом рішень, тому що кількість невідомих конструктивних і електромагнітних параметрів перевищує кількість рівнянь. У зв'язку з цим, частина параметрів (задається згідно історично сформованому досвіду проектування і ви-

робництва трансформаторів згідно з рекомендаціями технічної літератури. Для розглянутого трансформатора з активною частиною (рис. 3.1) такими параметрами є електромагнітні навантаження: індукція в стрижні B_c , а також щільності струмів первинної і вторинної обмоток Δ_1 , Δ_{21} , Δ_{22} .

Обмотки трансформатора ізолюються друг від друга, інших струмоведучих частин, елементів магнітопроводу і конструктивних деталей. При робочих напругах вище 6000 В між обмотками, струмоведучими частинами і деталями трансформатора виконуються ізоляційні проміжки, величини яких знаходяться за допомогою досвідченої напруги (вибіркового) і при розрахунку враховуються відповідними коефіцієнтами заповнення [5]. Для обмоток із круглого проводу, що має емалеву ізоляцію на напругу до 660 В величина k_{30} складає 0,3...0,38; приймається $k_{30} = 0,38$.

На масогабаритні показники трансформатора також впливає величини k_{3c} і k_k , які відповідно залежать від типу ізоляції і товщини листів сталі і типу конструкції стрижнів. У даному випадку для сталі товщиною 0,5; 0,35 і 0,28 мм k_{3c} при оксидній ізоляції складає 0,95; 0,93 і 0,91; приймається $k_{3c} = 0,91$. Величина $k_k = 0,7...0,9$ для розглянутої конструкції.

Величина коефіцієнта заповнення контуру стрижня сталлю:

$$k_k = \frac{\Sigma \text{Площі пакетів сталі, що образують контур}}{\text{Площа контуру}}$$

$$k_k = 0,85.$$

У якості головного незалежного розрахункового параметра геометричного параметра трансформатора приймається відношення a_m . При цьому маса, вартість активної частини, а також ККД, що визначає основні втрати трансформатора, при заданих початкових даних і електромагнітних навантаженнях є функцією трьох геометричних перемінних параметрів a_m , λ_o і α_c .

Як видно з рис. 3.2 оптимальним геометричним співвідношенням активної частини відповідають наступні значення геометричних параметрів:

$$a_M = 1,75; \lambda_0 = 2,4.$$

Внутрішні діаметри описаного кола магнітопроводу:

$$D_B = \sqrt[4]{\frac{3K_{\text{пд}}}{\pi K_{30} K_{3c} \lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) K_{\alpha 2}^2}} =$$

$$= \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 15680}{\pi \cdot 0,38 \cdot 0,91 \cdot 2,4 (1,75-1) \cdot \left[\frac{0,289}{\sqrt{3}} + \frac{(1,75-1)}{3} \right] \cdot 0,634^2}} = 20,27 \text{ см};$$

$$D'_B = \frac{D_B}{\left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)} = \frac{20,274}{\left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right)} = 18,18 \text{ см.}$$

Зовнішній діаметр описаного кола магнітопроводу

$$D_3 = a \cdot D_B = 1,75 \cdot 20,27 = 35,48, \text{ см.}$$

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу

$$b_0 = D_B \cdot K_{\alpha 2} = 20,27 \cdot 0,634 = 12,854, \text{ см.}$$

Ширина стержня

$$b_c = D_B \cdot K_{\alpha 1} = 20,27 \cdot 0,289 = 5,86, \text{ см.}$$

Висота обмоткового вікна магнітопроводу

$$h_0 = \lambda_0 \cdot b_0 = 2,4 \cdot 12,85 = 30,85, \text{ см.}$$

Площа перерізу стрижня

$$P_c = \frac{\pi}{3} K_{3c} D_B^2 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) =$$

$$= \frac{\pi}{3} \cdot 0,91 \cdot 20,27^2 (1,75-1) \left(\frac{1,75-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 83,69, \text{ см}^2.$$

Висота ярма трансформатора

$$h_{\text{я}} = \frac{P_c}{\sqrt{3} K_{3c} l_{\text{я}}} = \frac{2\pi D_B}{3\sqrt{3}} \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) =$$

$$= \frac{2\pi \cdot 20,27}{3\sqrt{3}} \left(\frac{1,75-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 7,63, \text{ см.}$$

Довжина ярма трансформатора

$$l_{\text{я}} = \frac{(D_{\text{н}} - D_{\text{в}})}{2} = \frac{(35,48 - 20,27)}{2} = 7,6, \text{ см.}$$

Площини перетину витків первинної і вторинних обмоток, см^2 :

$$P'_{\text{еф1}} = \frac{I_{1\text{н}}}{\sqrt{3} \cdot \Delta_1} = \frac{1924}{\sqrt{3} \cdot 150} = 7,474;$$

$$P'_{\text{еф21}} = \frac{I_{21}}{\Delta_{21}} = \frac{16,166}{150} = 0,108;$$

$$P'_{\text{еф22}} = \frac{I_{22}}{\Delta_{22}} = \frac{76,652}{150} = 0,511.$$

Діаметри та кількість елементарних провідників в ефективному:

$$n_{\text{ел1}} = P'_{\text{еф1}} / S_{\text{ел1}} = 7,474 / 0,934 \approx 8;$$

$$n_{\text{ел21}} = P'_{\text{еф21}} / S_{\text{ел21}} = 0,108 / 0,106 \approx 1;$$

$$n_{\text{ел22}} = P'_{\text{еф22}} / S_{\text{ел22}} = 0,511 / 0,511 \approx 1.$$

Для первинної і двох вторинних обмоток обираються алюмінієві обмоткові провoda прямокутного перерізу марки АПБ. З таблиці діаметрів і площин перерізів проводів [12] обираються кількість елементарних провідників і стандартні діаметри з площинами перетинів: $P'_{\text{еф1}}$; $P'_{\text{еф21}}$; $P'_{\text{еф22}}$ найбільш близькими до розрахункових $P'_{\text{еф1}}$, $P'_{\text{еф21}}$, $P'_{\text{еф22}}$: первинна обмотка $S_{\text{ел1}} = 93,4 \text{ мм}^2$ з розмірами поводу $a = 6,5 \text{ мм}$, $b = 14,5 \text{ мм}$; вторинні обмотки: $S_{\text{ел21}} = 10,6 \text{ мм}^2$, $a = 1,35 \text{ мм}$, $b = 8,0 \text{ мм}$; $S_{\text{ел22}} = 51,1 \text{ мм}^2$, $a = 6,5 \text{ мм}$, $b = 8,0 \text{ мм}$.

Число витків обмоток:

$$W_1 = \frac{K_{U1} \cdot U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{0,995 \cdot 19,2}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 83,69} = 9;$$

$$W_{21} = \frac{K_{U21} \cdot U_{21} \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 83,69} = 104;$$

$$W_{22} = \frac{K_{U22} \cdot U_{22} \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 83,69} = 61.$$

3.2. Розрахунок розподілу індукції в технологічному зазорі та струму неробочого руху

Геометричні співвідношення елементів активної частини змінюються в радіальному напрямку. При цьому величини середніх значень індукції і насичення ярем і стрижнів відповідно зростають і зменшуються з ростом радіальної координати R_i ослаблення радіальної складової напруженості полюси в технологічному зазорі δ_m знижується в напрямку збільшення R_i [15].

Якщо враховувати зазначені вище причини, то можна сказати, що розрахунок струму, що намагнічує, і втрат у сталі розглянутого трансформатора по прийнятому на початку проектування середньому значенню індукції приведе до значних помилок. Тому для забезпечення практично коректних розрахунків, необхідно врахувати зміна насичення і знайти залежності індукції в елементах магнітного кола у функції радіуса $B_\delta(R_i)$ (рис. 3.3).

У даному випадку, розглянутий трансформатор фазового компаундування має ненасичене магнітне коло. Отже, крива намагнічування лінійна, а це у свою чергу означає, що великої різниці між зовнішньою і внутрішньою ділянкою стрижня немає.

З обліком вище сказаного, можна зробити висновок, що магнітний потік у контурі і втрати в сталі приблизно дорівнюють середньому значенню, а точніше втратам і магнітної індукції при середнім значенні B_c і середньому радіусі R_i . Тому подальший розрахунок струму, що намагнічує, і втрат у сталі виконується по прийнятому на початку проектування середньому значенню індукції B_c .

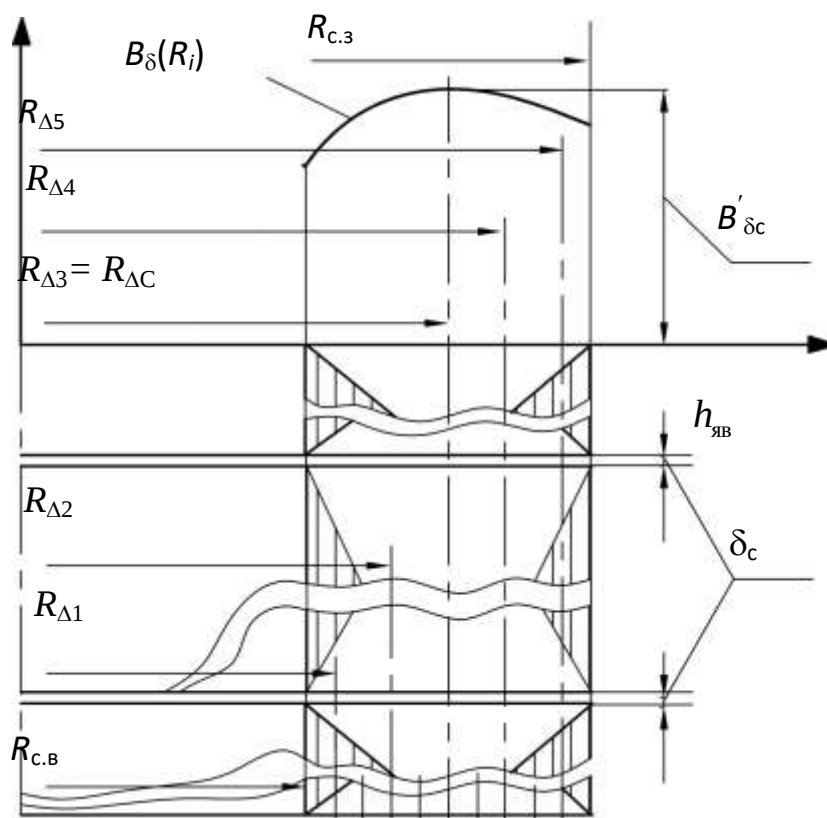


Рис. 3.3. Розподіл індукції в стиковому технологічному зазорі

Розрахунок розподілу індукції $B_{\delta}(R_i)$ уздовж осі стрижня (рис. 3.1, а) виконується на основі закону повного струму - для будь-якого замкнутого контуру магнітної силової лінії на будь-якому радіусі R_i від внутрішнього до зовнішнього контурів ярма для магніторушійної сили (МРС) однієї фази. Для цього справедливо вираз:

$$\oint H_i dl = F_{\delta i} + F_{ci} + F_{яi} = F_{\Sigma} = const ,$$

де $F_{\delta i}$, F_{ci} , $F_{яi}$ - відповідно значення МРС двох технологічних проміжків, стрижнів і ярма на координаті R_i .

Значення МРС у технологічному зазорі

$$F_{\delta c} = 2B_{\delta c}\delta'10^{-4} / \mu_0 = 2 \cdot 1,2 \cdot 0,0096 \cdot 10^{-4} / (4\pi \cdot 10^{-9}) = 200,85 \text{ А.}$$

де δ' - еквівалентний стиковий зазор на радіусі R_i .

Величина δ' при уточнених значеннях кроку обмотувального вікна і ширині розгорнення i -го кроку стрижня на координаті R_i знаходиться за виразом:

$$\delta' = \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{c.c.i}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{c.c.i}/3} =$$

$$= 0,005 \cdot \frac{10 \cdot 0,005 + 12,85 + 5,86 + 2\pi \cdot 3,8/3}{10 \cdot 0,005 + 5,86 + 2\pi \cdot 3,8/3} = 0,0096, \text{ см.}$$

де δ_m - технологічний зазор магнітопровода, що залежить від якості обробки стикових поверхонь ярем і стрижнів, $\delta_m = 0,005$;

$R_{c.c.i}$ - змінюваний від 0 до l_y потоковий радіус скруглений стрижня на координаті R_i .

В даному випадку $R_{c.c.i} = l_y/2$, тому що розрахунок ведеться з урахуванням середнього значення магнітної індукції B_c , і величина $R_{c.c.i}$ є постійною.

Значення напруженості в стрижні розраховується по величинах напруженості H_{ci} , що відповідає індукції стрижня на координаті R_i

$$F_{ci} = H_{ci} h_o = 6,3 \cdot 30,85 = 194,35 \text{ А},$$

де $H_{ci} = 6,3 \text{ А/см}^2$ – напруженість магнітного поля, яка визначається за основною кривою намагнічування сталі [12].

Індукція в ярмі на ділянці радіусу R_i

$$B_{yi} = B_{\delta i} \left[2\pi (R_{c.c.i} + b_c / \sqrt{3}) / 3 \right] / (h_y \sqrt{3}) =$$

$$= 1,2 \left[2\pi (3,8 + 5,86 / \sqrt{3}) / 3 \right] / (7,63 \cdot \sqrt{3}) = 1,49 \text{ Тл.}$$

Значення напруженості вибирається в залежності від значення магнітний індукції по кривій намагнічування для сталі 2412 [12]. При $B_{yi} = 1,49 \text{ Тл}$, $H_{yi} = 14,2 \text{ А/см}^2$.

Оскільки активна частина задовольняє умовам створення обертової МРС, магнітне поле трансформатора можна вважати обертовим і розрахувати розподіл індукції в ярмі з використанням рівнянь Лапласа для скалярного магнітного потенціалу і геометричних рядів [15]. При цьому значення МРС у ярмі розраховується по величині напруженості в ярмі, відповідної до індукції ярма на координаті стрижня

$$F_{y.i} = \zeta_y 2H_{yi} (h_y + b_o + b_c + 2\pi R_{c.c.i}/3) / \sqrt{3} =$$

$$= 1,107 \cdot 2 \cdot 14,2 \cdot (7,63 + 12,85 + 5,86 + 2\pi \cdot 3,8/3) / \sqrt{3} = 622,8 \text{ А.}$$

де $\zeta_{\text{я}}$ - коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для середньої ділянки, залежить від довжини витків сталі на координаті R_i висоти ярма.

$$\zeta_{\text{я}} = \frac{2h_{\text{я}}}{(1-k_3)\tau_c} \left[\frac{1}{\text{th}(\pi h_{\text{я}}/\tau_c)} + \frac{k_3}{3\text{th}(3\pi h_{\text{я}}/\tau_c)} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 7,63}{(1-0,3) \cdot 41,85} \left[\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 7,63/41,85)} + \frac{0,3}{3\text{th}(3\pi \cdot 7,63/41,85)} \right] = 1,107,$$

де τ_c - полюсний поділ ділянки на радіусі R_i

$$\tau_c = 1,5b_o + \pi(R_{\text{с.с}i} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 12,85 + \pi(3,8 + 5,86/\sqrt{3}) = 41,85 \text{ см;}$$

k_3 – коефіцієнт амплітуди третьої гармоніки індукції ($k_3 = 0,2 \dots 0,3$), приймається $k_3 = 0,3$.

Значення сумарної МРС середньої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma} = F_{\delta i} + F_{\text{с.с}i} + F_{\text{я.с}i} = 200,85 + 194,35 + 622,8 = 1018 \text{ А.}$$

Реактивна складова струму неробочого руху

$$I_{0p} = \frac{F_{\Sigma}}{\sqrt{2}w_1k_v} = \frac{1018}{\sqrt{2} \cdot 9 \cdot 1,35} = 65,626 \text{ А,}$$

де $k_v = 1,35$ – коефіцієнт, який урахує наявність у намагнічувальному струмі вищих гармонік.

3.3. Розрахунок втрат неробочого руху

Втрати в сталі трансформатора визначаються коефіцієнтами об'ємних втрат в елементах магнітопровода (стрижнів, прямих ділянок та кутових ділянок ярем), а також залежать від величини деформації і якості випалу електротехнічної сталі й у цілому від технічного рівня і культури виробництва.

Коефіцієнти об'ємних втрат елементів магнітопровода:

- стрижнів

$$k_{pc} = 3h_o \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{\kappa} (b_c + 2\pi R_{c.ci}/3) B_{ci}^2;$$

для даного випадку

$$k_{pc} = 3h_o l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{\kappa} (b_c + 2\pi R_{c.ci}/3) B_{ci}^2,$$

де $P_{1/50}$ - питомі втрати в електротехнічній сталі при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц;

$$k_{pc} = 3 \cdot 30,85 \cdot 7,6 \cdot 1,3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 0,85(5,86 + 2\pi \cdot 3,8/3) \cdot 1,2^2 = 15590.$$

- прямих ділянок ярем

$$k_{p\pi} = 6b_o h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{д3i} B_{яi}^2,$$

де $k_{д3i}$ - коефіцієнт додаткових втрат від третьої гармоніки поля у ярмі

$$k_{д3i} = 1 + 0,55[(k_{Bi}/1,11)^2 - 1] = 1 + 0,55[(1,28/1,11)^2 - 1] = 1,181;$$

де k_{Bi} – коефіцієнт форми кривої індукції, який для діапазону $B_{яi}$ від 0,9 до 1,2 Тл може бути прийнятим від 1,28 до 1,43 Тл.

для даного випадку

$$k_{p\pi} = 6b_o h_{я} l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{д3i} B_{яi}^2,$$

$$k_{p\pi} = 6 \cdot 12,85 \cdot 7,63 \cdot 7,6 \cdot 1,3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 1,181 \cdot 1,49^2 = 11020.$$

- кутових ділянок ярем

$$k_{pk} = 6h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{д3i} (b_c + 2\pi R_{c.ci}/3) B_{ki}^2,$$

для даного випадку

$$k_{pk} = 6h_{я} l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{д3i} (b_c + 2\pi R_{c.ci}/3) B_{ki}^2,$$

$$k_{pk} = 6 \cdot 7,63 \cdot 7,6 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} 1,181(5,86 + 2\pi 3,8/3) 1,067^2 = 8054 ,$$

де B_{ki} - розрахункова величина індукції кутових зон ярма просторового стикового магнітопроводу визначається за виразами, Тл:

$$B_{ki} = 0,87(B_{ci} + B_{яi}) / 2 = 0,87(1,2 + 1,49) / 2 = 1,067 .$$

Втрати в сталі трансформатора

$$\begin{aligned} P_c &= 1,2(k_{pc} + k_{ря} + k_{pk})k_{з.с}\gamma_c 10^{-6} = \\ &= 1,2(15590 + 11020 + 8054) \cdot 0,95 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 289,56 \text{ Вт.} \end{aligned}$$

Активна складова струму неробочого руху

$$I_{0a} = P_c / (3U_{ф1}) = 289,56 / (3 \cdot 11,1) = 8,696 \text{ А.}$$

Величина струму неробочого руху визначається виразом

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{65,626^2 + 8,696^2} = 66,2 \text{ А.}$$

3.4. Визначення втрат короткого замикання та характеристик

Сума ділянок ширини b_o обмотувального вікна, що приходяться на первинну і вторинні обмотки, см:

$$b_1 = 2\Pi_{ef1}w_1 / (k_{зо}h_o) = 2 \cdot 7,474 \cdot 9 / (0,38 \cdot 30,85) = 8,927 ;$$

$$b_2 = 2\Pi_{ef21}w_{21} / (k_{зо}h_o) = 2 \cdot 0,108 \cdot 104 / (0,38 \cdot 30,85) = 1,914 ;$$

$$b_{22} = 2\Pi_{ef22}w_{22} / (k_{зо}h_o) = 2 \cdot 0,511 \cdot 61 / (0,38 \cdot 30,85) = 2,133 .$$

Сума ділянок ширини обмоткового вікна триобмоткового трансформатора

$$b_1 + b_2 + b_3 = 8,927 + 1,914 + 2,133 = 12,974 \approx 12,85 \text{ см.}$$

У триобмотковому трансформаторі первинна обмотка звичайно розташовується між двома вторинними. Також можливий дисковий варіант обмоток (галетні обмотки). При цьому середня довжина витків обмоткових котушок однакова. Приймаємо обмотки дискового типу.

Середня довжина витка галетної обмотки

$$l_W = 2D_B [1,181(a - 1) + 1,286k_{\alpha 1} + 0,7195k_{\alpha 2}] =$$

$$= 2 \cdot 20,27 [1,181(1,75 - 1) + 1,0893 \cdot 0,289 + 0,7854 \cdot 0,634] = 69,481, \text{ см.}$$

Маси провідникового матеріалу фаз первинної і вторинних обмоток трансформатора, кг:

$$m_{o1} = \Pi_{\text{еф}1} w_1 l_w \gamma'_o = 7,474 \cdot 9 \cdot 69,481 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 12,015;$$

$$m_{o21} = \Pi_{\text{еф}21} w_{21} l_w \gamma'_o = 0,108 \cdot 104 \cdot 69,481 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 2,105;$$

$$m_{o22} = \Pi_{\text{еф}22} w_{22} l_w \gamma'_o = 0,511 \cdot 61 \cdot 69,481 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 5,863,$$

де γ'_o – питома маса провідникового матеріалу обмоток, для алюмінію $\gamma'_o = 2,7 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3$.

Маса обмотки трансформатора фазового компаундування

$$m_o = 3(m_{o1} + m_{o21} + m_{o22}) = 3 \cdot (12,015 + 2,105 + 5,863) = 59,95 \text{ кг.}$$

Втрати у фазі кожної з обмоток при 75°C, Вт:

$$P_{\text{ел}1} = P_{\text{ел.п}} \Delta_1^2 \Pi_{\text{еф}1} w_1 l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 1,5^2 \cdot 7,474 \cdot 9 \cdot 69,48 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 64,883;$$

$$P_{\text{ел}21} = P_{\text{ел.п}} \Delta_{21}^2 \Pi_{\text{еф}21} w_{21} l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 1,5^2 \cdot 0,108 \cdot 104 \cdot 69,48 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 11,366;$$

$$P_{\text{ел}22} = P_{\text{ел.п}} \Delta_{22}^2 \Pi_{\text{еф}22} w_{22} l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 1,5^2 \cdot 0,511 \cdot 61 \cdot 69,48 \cdot 2,7 \cdot 10^{-3} = 31,663,$$

де $P_{\text{ел.п}} = 2,4 \text{ Вт} \cdot \text{А}/(\text{кг} \cdot \text{мм}^2)$ – питомі втрати.

Втрати короткого замикання

$$P_k = 3(P_{\text{ел}1} + P_{\text{ел}21} + P_{\text{ел}22}) = 3(64,883 + 11,366 + 31,663) = 323,735 \text{ Вт.}$$

Відносні активні падіння напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора:

$$\Delta U_{a1} \% = 100 P_{\text{ел}1} / (\sqrt{3} U_1 I_1) = 100 \cdot 64,883 / (\sqrt{3} \cdot 19,2 \cdot 1942) = 0,1;$$

$$\Delta U_{a21} \% = 100 P_{\text{ел}21} / (\sqrt{3} U_{21} I_{21}) = 100 \cdot 11,366 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 16,166) = 0,101;$$

$$\Delta U_{a22} \% = 100 P_{\text{ел}22} / (\sqrt{3} U_{22} I_{22}) = 100 \cdot 31,663 / (\sqrt{3} \cdot 235 \cdot 76,652) = 0,101.$$

Активні опори обмоток трансформатора, Ом:

$$r_1 = P_{\text{ел}1} / I_{\phi 1}^2 = 64,883 / 1121^2 = 5,162 \cdot 10^{-5};$$

$$r_{21} = P_{\text{ел}21} / I_{\phi 21}^2 = 11,366 / 16,166^2 = 0,043;$$

$$r_{22} = P_{\Sigma 22} / I_{\Phi 22}^2 = 31,663 / 76,652^2 = 5,389 \cdot 10^{-3}.$$

Активні опори короткого замикання, Ом:

$$r_{k1,21} = r_1 + r_{21} = r_1 + r_{21}(w_1/w_{21})^2 = 5,16 \cdot 10^{-5} + 0,043 \cdot (9/104)^2 = 3,463 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{k1,22} = r_1 + r_{22} = r_1 + r_{22}(w_1/w_{22})^2 = 5,16 \cdot 10^{-5} + 5,389 \cdot 10^{-3} (9/61)^2 = 1,57 \cdot 10^{-4}$$

Відносні індуктивні падіння напруги пар обмоток триобмоткового трансформатора, віднесені до потужності первинної обмотки, %:

$$\Delta U_{L1\%} = \frac{I_1 w_1 l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{1942 \cdot 9 \cdot 69,48 \cdot 12,85}{6,66 \cdot 30,85 \cdot 83,69 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 14,393;$$

$$\Delta U_{L21\%} = \frac{I_{21} w_{21} l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{16,166 \cdot 104 \cdot 69,48 \cdot 12,85}{6,66 \cdot 30,85 \cdot 83,69 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 6,123;$$

$$\Delta U_{L22\%} = \frac{I_{22} w_{22} l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{76,652 \cdot 61 \cdot 69,48 \cdot 12,85}{6,66 \cdot 30,85 \cdot 83,69 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 7,753.$$

Напруги короткого замикання пар обмоток триобмоткового трансформатора, %:

$$U_{k1,21}\% = 100 I_1 r_{k1,21} / U_1 = 100 \cdot 1942 \cdot 3,463 \cdot 10^{-4} / 19,2 = 20,812.$$

$$U_{k1,22}\% = 100 I_1 r_{k1,22} / U_1 = 100 \cdot 1924 \cdot 2,57 \cdot 10^{-4} / 19,2 = 26,025.$$

Номінальна величина ККД трансформатора

$$\eta_n = P_2 / [P_2 + (P_c + P_k) 10^{-3}] = 42,4 / [42,4 + (289,56 + 323,74) 10^{-3}] = 0,986.$$

Активна і реактивна складові струму первинної обмотки, А:

$$I_{1a} = \frac{S_{21} \cos \varphi_{21} + S_{22} \cos \varphi_{22}}{\eta_n U_1} = \frac{42,4 \cdot 10^3}{0,986 \cdot 19,2} = 1293;$$

$$I_{1p} = I_{0p} + \frac{S_{21} \sin \varphi_{21} + S_{22} \sin \varphi_{22}}{\eta_n U_1} = 1036.$$

Величина коефіцієнта потужності

$$\cos \varphi_1 = 1 / \sqrt{1 + (I_{1p} / I_{1a})^2} = 1 / \sqrt{1 + (1036 / 1293)^2} = 0,781.$$

Зміна напруги під навантаженням, %:

$$\Delta U_{1,21} = \Delta U_{a1\%} \cos \varphi_1 + \Delta U_{a21\%} \cos \varphi_{21} + \Delta U_{L21\%} \sin \varphi_1 + \Delta U_{L2\%} \sin \varphi_{21} = 12,829$$

$$\Delta U_{1,22} = \Delta U_{a1\%} \cos \varphi_1 + \Delta U_{a22\%} \cos \varphi_{22} + \Delta U_{L22\%} \sin \varphi_1 + \Delta U_{L2\%} \sin \varphi_{22} = 16,202$$

Характеристику залежності ККД від коефіцієнта навантаження побудуємо за допомогою прикладного математичного пакету Mcad 14 Professional.

Залежність ККД від навантаження ($K_H = 0,1 \dots 1,4$):

$$\eta_{1,21} = \frac{(K_{H21} P_{21H} + P_{22H}) 10^3}{(P_{22H} + K_{H22} P_{21H}) 10^3 + P_c \left(1 + \frac{\Delta U_{1,21} \%}{200} - K_{H21} \frac{\Delta U_{1,21} \%}{200} \right)^2 + K_{H21}^2 (P_K - I_{op}^2 r_1) + I_{op}^2 r_1};$$

$$\eta_{1,22} = \frac{(K_{H22} P_{22H} + P_{21H}) 10^3}{(P_{21H} + K_{H22} P_{22H}) 10^3 + P_c \left(1 + \frac{\Delta U_{1,22} \%}{200} - K_{H22} \frac{\Delta U_{1,22} \%}{200} \right)^2 + K_{H22}^2 (P_K - I_{op}^2 r_1) + I_{op}^2 r_1};$$

$$\eta = 1 - \frac{(K_H P_K + P_c) 10^3}{(K_H S_H \cos \phi_2 + K_H^2 P_K + P_c)}.$$

Характеристика залежності ККД від навантаження представлена на рис.3.4.

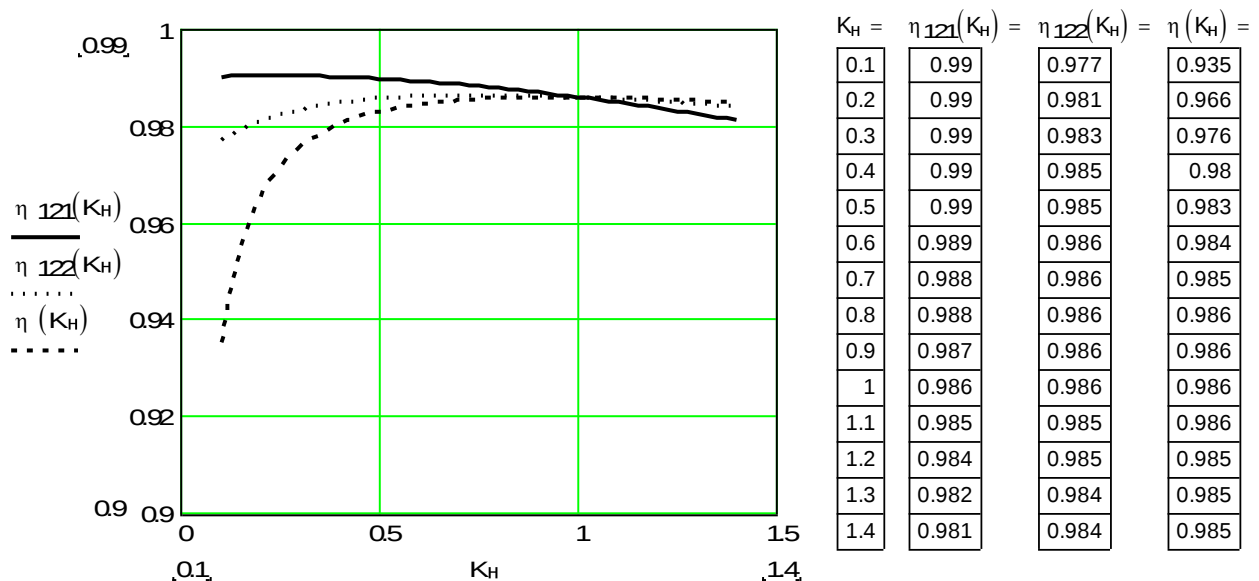


Рис. 3.4. Характеристика залежності ККД від коефіцієнта навантаження

Маса магнітопроводу трансформатора

$$m_M = \gamma'_c k_{3.c} [3 \Pi_c h_o + 6(\Pi_c + b_o l_{я}) h_{я}] = 112 \text{ кг.}$$

Маса активної частини трансформатора

$$m_{ач} = m_M + m_o = 112 + 59,95 = 172 \text{ кг.}$$

4. РОЗРАХУНОК ТРАНСФОРМАТОРА ФАЗОВОГО КОМПАУНДУВАННЯ З МІДНОЮ ОБМОТКОЮ

Задачею розрахунку трансформатора фазового компаундування з мідною обмоткою є встановлення значень масогабаритних показників, а також величини втрат у сталі і втрат короткого замикання і порівняння отриманих результатів.

При проектуванні трансформатора повинне бути забезпечено його відповідність сучасним вимогам економічності його виробництва і експлуатації, а також електричної, механічної міцності і нагрівостійкості обмоток і інших частин.

Рішення поставленої задачі досягається правильним вибором розмірів і обмоткових даних трансформатора, раціональним вибором його конструкції і матеріалів активної частини і конструктивної частини, правильно організованих технологічним процесом виготовлення.

4.1. Визначення головних розмірів і геометричних співвідношень з оптимізацією за критерієм мінімуму маси

Початкові дані і основні електричні величини:

$S_H = 53 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – розрахункова повна потужність трансформатора;

$S_{21} = 14 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – повна потужність обмотки вимірювання напруги;

$S_{22} = 39 \text{ кВ} \cdot \text{А}$ – повна потужність обмотки вимірювання струму;

$m = 3$ – число фаз;

$f = 50 \text{ Гц}$ – частота мережі;

$\cos \varphi_2 = 0,8$ – коефіцієнт потужності вторинних обмоток;

$U_{1л} = 19,2 \text{ В}$ $U_{1ф} = 11,1 \text{ В}$ – лінійна і фазна напруги первинної обмотки відповідно.

Лінійна і фазна напруги обмотки вимірювання напруги:

$$U_{21л} = 400 \text{ В}; U_{21ф} = 231 \text{ В}.$$

Лінійна і фазна напруги обмотки вимірювання струму:

$$U_{22л} = 235 \text{ В}; U_{22ф} = 136 \text{ В}.$$

Активна потужність обмотки вимірювання напруги трансформатора фазового компаундування

$$P_{21} = S_{21} \cos \varphi_{21} = 14 \cdot 0,8 = 11,2 \text{ кВт}.$$

Активна потужність обмотки вимірювання струму трансформатора фазового компаундування

$$P_{22} = S_{22} \cos \varphi_{22} = 39 \cdot 0,8 = 31,2 \text{ кВт}.$$

Активна потужність вторинних обмоток триобмоткового трансформатора:

$$P_{2H} = S_{21} \cos \varphi_{21} + S_{22} \cos \varphi_{22} = 11,2 + 31,2 = 42,4 \text{ кВт}.$$

Попередній розрахунковий лінійний струм первинної обмотки

$$I_{1H} = P_{2H} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_e \cdot \cos \varphi_1') =$$

$$I_{1H} = 42,4 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 19,2 \cdot 0,9 \cdot 0,912) = 1942 \text{ А},$$

де $\cos \varphi_1' = 1 / \sqrt{1 + 0,45^2} = 0,912$, $\eta_e = 0,9$ – попередні розрахункові енергетичні коефіцієнти трансформатора.

Номінальні лінійні струми вторинних обмоток трьохбмоткового трансформатора:

$$I_{21} = S_{21} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_{21}) = 14 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 400) = 16,166 \text{ A};$$

$$I_{22} = S_{22} \cdot 10^3 / (\sqrt{3} U_{22}) = 39 \cdot 10^3 / (\sqrt{3} \cdot 235) = 76,652 \text{ A}.$$

Попередні електромагнітні навантаження приймаються рівними: $B_c = 1,2 \text{ Тл}$;
 $\Delta_1 = 250 \text{ А/см}^2$; $\Delta_{21} = 250 \text{ А/см}^2$; $\Delta_{22} = 250 \text{ А/см}^2$.

Коефіцієнти напруг і потужностей первинної і вторинних обмоток:

$$K_{U1} = 1 - \frac{\Delta U \%}{200} = 1 - \frac{1}{200} = 0,995;$$

$$K_{U2} = 1 + \frac{\Delta U \%}{200} = 1 + \frac{1}{200} = 1,005;$$

$$K_{p21} = \frac{P_{21}}{P_2} = \frac{11,2}{42,4} = 0,264; \quad K_{p22} = \frac{P_{22}}{P_2} = \frac{31,2}{42,4} = 0,736.$$

Коефіцієнт початкових даних

$$K_{\text{пд}} = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot B_c} \cdot \left(\frac{K_{U1}}{\Delta_1 \eta_c \cos \varphi_1} + \frac{K_{U21} K_{p21}}{\Delta_{21}} + \frac{K_{U22} K_{p22}}{\Delta_{22}} \right) =$$

$$= \frac{42,4 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 1,2} \cdot \left(\frac{0,995}{250 \cdot 0,9 \cdot 0,912} + \frac{1,005 \cdot 0,264}{250} + \frac{1,005 \cdot 0,736}{250} \right) = 9411.$$

Коефіцієнти кута стержня ($\alpha_c = 15 \dots 30^\circ$, приймається $\alpha_c = 30^\circ$).

$$K_{\alpha 1} = \sin \frac{\alpha_c}{2} \left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) = \sin \frac{30^\circ}{2} \left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right) = 0,289;$$

$$K_{\alpha 2} = \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{\alpha_c}{2} \right) / \left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right) =$$

$$= \sin \left(\frac{\pi}{3} - \frac{30^\circ}{2} \right) / \left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right) = 0,634.$$

Основою конструкції трансформатора є магнітопровід (рис. 3.1, а). Його розміри і геометричні співвідношення визначають головні розміри активної частини, геометрію обмотки (рис. 3.1, б) і показники всього трансформатора.

Головними геометричними параметрами магнітопроводу і трансформатора в цілому є площа перетину стали стрижня Π_c і обмоткового вікна.

Тому самому Π_c можуть відповідати різні співвідношення середньої довжини витків l_{12} обмоток, ширини b_o , висоти h_o обмоткового вікна.

Відмітною й ускладнюючою розрахунки особливістю трансформатора з просторовим магнітопроводом є забезпечення розрахункового значення перетину стрижня Π_c при різних геометричних співвідношеннях елементів конфігурації стрижнів і ярма. Зазначені співвідношення залежать від величини зовнішнього D_3 і внутрішнього D_b діаметрів контурних окружностей магнітопроводу (відповідно зовнішнього і внутрішнього контуру магнітопроводу), а також відносини величин граней b_c і b_o контуру магнітопроводу (рис. 3.1).

Маса симетричного просторового магнітопроводу (рис. 3.1) визначається відповідно до [12] виразом

$$\begin{aligned} m_{\text{мДар}} &= \gamma_c [3h_o \Pi_c + 6(\Pi_y + \Pi_{\text{я}})h_{\text{я}}] = \gamma_c \left\{ 3\lambda_o D_b \sin(\pi/3) \pi k_k k_{3c} D_b^2 (a_m - 1)^2 / 12 \right\} + \\ &+ 6 \left[\pi D_b^2 (a_m - 1)^2 / 12 + \sqrt{3} D_b^2 (a_m - 1) / 4 \right] \cdot 3k_k k_{3c} D_b (a_m - 1) \} = \\ &= 0,68 \gamma_c k_k k_{3c} D_b^3 (a_m - 1)^2 [\lambda_o + 0,693(a_m - 1) + 1,146], \end{aligned}$$

де $a_m = D_3 / D_b$ і $\lambda_o = h_o / b_o$ – незалежні змінні координати.

При виконанні перетворень вираз маси спрощується до вигляду

$$\begin{aligned} m_{\text{мДар}} &= 0,68 \gamma_c k_k k_{3c} \left(1,5 \sqrt[4]{k_{\text{ид}} / [k_k k_{3c} k_{3o} \lambda_o (a_m - 1)^2]} \right)^3 (a_m - 1)^2 \times \\ &\times [\lambda_o + 0,693(a_m - 1) + 1,146] = \gamma_c \left(\sqrt[4]{k_{\text{ид}} / (k_{3c} k_{3o})} \right)^3 k_{\text{ммДар}}, \end{aligned}$$

де $k_{\text{ммДар}}$ – коефіцієнт зміни маси симетричного просторового магнітопроводу,

$$\begin{aligned} k_{\text{ммДар}} &= 2,295 k_k k_{3c} \left(\sqrt[4]{1 / [k_k \lambda_o (a_m - 1)^2]} \right)^3 (a_m - 1)^2 \times \\ &\times [\lambda_o + 0,693(a_m - 1) + 1,146]. \end{aligned}$$

Маса алюмінієвої обмотки відповідно до [12] визначається виразом

$$\begin{aligned} m_{o\Delta ap} &= 1,53\gamma_o k_{zo} \lambda_o (0,866 D_B)^2 1,36 D_B [1 + 1,5(a_M - 1)] = \\ &= 1,53\gamma_o k_{zo} \lambda_o [1 + 1,5(a_M - 1)] D_B^3. \end{aligned}$$

Після перетворень вираз маси обмотки спрощується до вигляду

$$\begin{aligned} m_{o\Delta ap} &= 1,53\gamma_o k_{zo} \lambda_o [1 + 1,5(a_M - 1)] \left(1,5 \sqrt[4]{k_{ид} / [k_K k_{zc} k_{zo} \lambda_o (a_M - 1)^2]} \right)^3 = \\ &= \gamma_o \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{zc} k_{zo})} \right)^3 k_{mo\Delta ap}, \end{aligned}$$

де $k_{mo\Delta ap}$ – коефіцієнт зміни маси обмотки,

$$k_{mo\Delta ap} = 5,16 k_{zo} \lambda_o \left(\sqrt[4]{1 / [k_K \lambda_o (a_M - 1)^2]} \right)^3 [1 + 1,5(a_M - 1)].$$

Маса активних матеріалів

$$\begin{aligned} m_{\Delta ap} &= m_{m\Delta ap} + m_{o\Delta ap} = \gamma_c \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{zc} k_{zo})} \right)^3 k_{mm\Delta ap} + \gamma_o \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{zc} k_{zo})} \right)^3 k_{mo\Delta ap} = \\ &= \gamma_c \left(\sqrt[4]{k_{ид} / (k_{zc} k_{zo})} \right)^3 k_{m\Delta ap}, \end{aligned}$$

де $k_{m\Delta ap}$ – коефіцієнт зміни маси активних матеріалів,

$$\begin{aligned} k_{m\Delta ap} &= k_{mm\Delta ap} + \gamma_o k_{mo\Delta ap} / \gamma_c = 2,295 \left(\sqrt[4]{1 / (k_K \lambda_o (a_M - 1)^2)} \right)^3 \times \\ &\times \{ k_K k_{zc} (a_M - 1)^2 [\lambda_o + 0,693(a_M - 1) + 1,146] + \\ &+ 2,248 k_{zo} \lambda_o [1 + 1,5(a_M - 1)] \gamma_o / \gamma_c \}. \end{aligned}$$

Залежності коефіцієнту зміни маси активних матеріалів від незалежних координат при використанні мідної обмотки приведені на рис. 4.1.

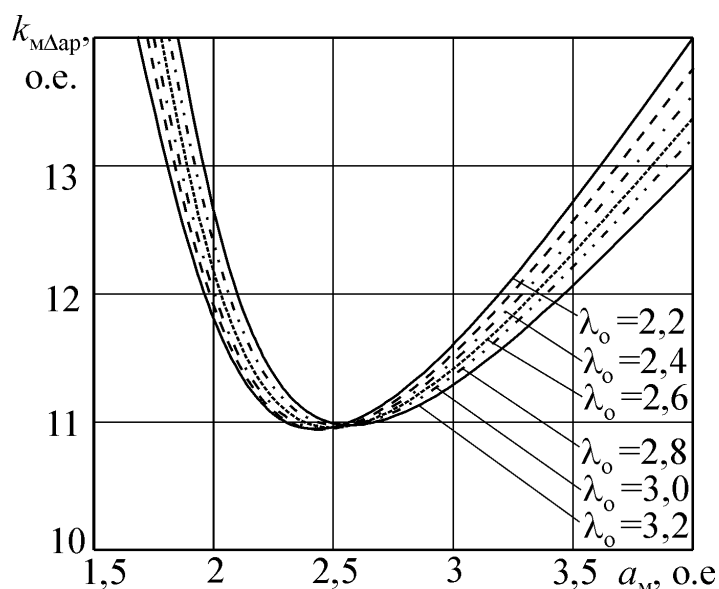


Рис. 4.1. Залежності коефіцієнту зміни маси активних матеріалів від незалежних змінних координат

Розрахунок трансформатора в цілому є математично нездійсненним завданням з великим числом рішень, тому що кількість невідомих конструктивних і електромагнітних параметрів перевищує кількість рівнянь. У зв'язку з цим, частина параметрів (задається згідно історично сформованому досвіду проектування і виробництва трансформаторів згідно з рекомендаціями технічної літератури. Для розглянутого трансформатора з активною частиною (рис. 3.1) такими параметрами є електромагнітні навантаження: індукція в стрижні B_c , а також щільності струмів первинної і вторинної обмоток Δ_1 , Δ_{21} , Δ_{22} .

Обмотки трансформатора ізолюються друг від друга, інших струмоведучих частин, елементів магнітопроводу і конструктивних деталей. При робочих напругах вище 6000 В між обмотками, струмоведучими частинами і деталями трансформатора виконуються ізоляційні проміжки, величини яких знаходяться за допомогою досвідченої напруги (вибіркового) і при розрахунку враховуються відповідними коефіцієнтами заповнення [5]. Для обмоток із круглого проводу, що має емалеву ізоляцію на напругу до 660 В величина k_{30} складає 0,3...0,38; приймається $k_{30} = 0,38$.

На масогабаритні показники трансформатора також впливає величини k_{3c} і k_k , які відповідно залежать від типу ізоляції і товщини листів сталі і типу констру-

кції стрижнів. У даному випадку для сталі товщиною 0,5; 0,35 і 0,28 мм k_{zc} при оксидній ізоляції складає 0,95; 0,93 і 0,91; приймається $k_{zc} = 0,91$. Величина $k_k = 0,7 \dots 0,9$ для розглянутої конструкції.

Величина коефіцієнта заповнення контуру стрижня сталлю:

$$k_k = \frac{\Sigma \text{Площі пакетів сталі, що образують контур}}{\text{Площа контуру}}$$

$$k_k = 0,85.$$

У якості головного незалежного розрахункового параметра геометричного параметра трансформатора приймається відношення a_m . При цьому маса, вартість активної частини, а також ККД, що визначає основні втрати трансформатора, при заданих початкових даних і електромагнітних навантаженнях є функцією трьох геометричних перемінних параметрів a_m , λ_o і α_c .

Як видно з рис. 4.1 оптимальним геометричним співвідношенням активної частини відповідають наступні значення геометричних параметрів:

$$a_m = 2,5; \lambda_o = 2,8.$$

Внутрішні діаметри описаного кола магнітопроводу:

$$\begin{aligned} D_B &= \sqrt[4]{\frac{3K_{пд}}{\pi K_{zo} K_{zc} \lambda_o (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) K_{\alpha 2}^2}} = \\ &= \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 9411}{\pi \cdot 0,38 \cdot 0,91 \cdot 2,8(2,5-1) \cdot \left[\frac{0,289}{\sqrt{3}} + \frac{(2,5-1)}{3} \right] \cdot 0,634^2}} = 12,98 \text{ см}; \\ D'_B &= \frac{D_B}{\left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)} = \frac{12,98}{\left(\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2} \right)} = 11,64 \text{ см}. \end{aligned}$$

Зовнішній діаметр описаного кола магнітопроводу

$$D_z = a \cdot D_B = 2,5 \cdot 12,98 = 32,46 \text{ , см.}$$

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу

$$b_0 = D_B \cdot K_{\alpha 2} = 12,98 \cdot 0,634 = 8,23, \text{ см.}$$

Ширина стержня

$$b_c = D_B \cdot K_{\alpha 1} = 12,98 \cdot 0,289 = 3,75, \text{ см.}$$

Висота обмоткового вікна магнітопроводу

$$h_0 = \lambda_0 \cdot b_0 = 2,8 \cdot 8,23 = 23,05, \text{ см.}$$

Площа перерізу стрижня

$$\begin{aligned} P_c &= \frac{\pi}{3} K_{3c} D_B^2 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) = \\ &= \frac{\pi}{3} \cdot 0,91 \cdot 12,98^2 (2,5-1) \left(\frac{2,5-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 104,95, \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Висота ярма трансформатора

$$\begin{aligned} h_{\text{я}} &= \frac{P_c}{\sqrt{3} K_{3c} l_{\text{я}}} = \frac{2\pi D_B}{3\sqrt{3}} \left(\frac{a-1}{4} + \frac{K_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) = \\ &= \frac{2\pi \cdot 12,98}{3\sqrt{3}} \left(\frac{2,5-1}{4} + \frac{0,289}{\sqrt{3}} \right) = 7,83, \text{ см.} \end{aligned}$$

Довжина ярма трансформатора

$$l_{\text{я}} = \frac{(D_H - D_B)}{2} = \frac{(32,46 - 12,98)}{2} = 9,74, \text{ см.}$$

Площини перетину витків первинної і вторинних обмоток, см²:

$$P'_{\text{еф}1} = \frac{I_{1H}}{\sqrt{3} \cdot \Delta_1} = \frac{1924}{\sqrt{3} \cdot 250} = 3,588;$$

$$P'_{\text{еф}21} = \frac{I_{21}}{\Delta_{21}} = \frac{16,166}{250} = 0,081;$$

$$P'_{\text{еф}22} = \frac{I_{22}}{\Delta_{22}} = \frac{76,652}{250} = 0,383.$$

Діаметри та кількість елементарних провідників в ефективному:

$$n_{\text{ел}1} = P'_{\text{еф}1} / S_{\text{ел}1} = 3,588 / 0,596 \approx 6;$$

$$n_{\text{ел}21} = P'_{\text{еф}21} / S_{\text{ел}21} = 0,081 / 0,081 \approx 1;$$

$$n_{\text{ел}22} = P'_{\text{еф}22} / S_{\text{ел}22} = 0,383 / 0,381 \approx 1.$$

Для первинної і двох вторинних обмоток обираються мідні обмоткові про-
вода прямокутного перерізу марки ПБ. З таблиці діаметрів і площин перетинів
[12] названих проводів обираються кількість елементарних провідників і стандар-
тні діаметри з площинами перетинів: Π_{ef1} ; Π_{ef21} ; Π_{ef22} найбільш близькими
до розрахункових Π'_{ef1} , Π'_{ef21} , Π'_{ef22} : первинна обмотка $S_{\text{ел1}} = 59,6 \text{ мм}^2$ з ро-
змірами поводу $a = 6,5 \text{ мм}$, $b = 9,3 \text{ мм}$; вторинні обмотки: $S_{\text{ел21}} = 8,11 \text{ мм}^2$, $a =$
 $2,44 \text{ мм}$, $b = 3,8 \text{ мм}$; $S_{\text{ел22}} = 38,1 \text{ мм}^2$, $a = 3,53 \text{ мм}$, $b = 10,8 \text{ мм}$.

Число витків обмоток:

$$W_1 = \frac{K_{U1} \cdot U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{0,995 \cdot 19,2}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 104,95} = 7;$$

$$W_{21} = \frac{K_{U21} \cdot U_{21} \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 400}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 105,95} = 83;$$

$$W_{22} = \frac{K_{U22} \cdot U_{22} \cdot 10^4}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = \frac{1,005 \cdot 235}{\sqrt{3} \cdot 4,44 \cdot 50 \cdot 1,2 \cdot 105,95} = 49.$$

4.2. Розрахунок магнітного кола трансформатора

Геометричні співвідношення елементів активної частини змінюються в ра-
діальному напрямку. При цьому величини середніх значень індукції і насичення
ярем і стрижнів відповідно зростають і зменшуються з ростом радіальної коорди-
нати R_i ослаблення радіальної складової напруженості полюси в технологічному
зазорі δ_m знижується в напрямку збільшення R_i [15].

Якщо враховувати зазначені вище причини, то можна сказати, що розраху-
нок струму, що намагнічує, і втрат у сталі розглянутого трансформатора по при-
йнятому на початку проектування середньому значенню індукції приведе до зна-
чних помилок. Тому для забезпечення практично коректних розрахунків, необхід-

но врахувати зміна насичення і знайти залежності індукції в елементах магнітного кола у функції радіуса $B_{\delta}(R_i)$.

У даному випадку, трансформатор фазового компаундування, який розглядається, має ненасичене магнітне коло. Отже, крива намагнічування лінійна, а це у свою чергу означає, що великої різниці між зовнішньою і внутрішньою ділянкою стрижня немає.

З обліком вище сказаного, можна зробити висновок, що магнітний потік у контурі і втрати в сталі приблизно дорівнюють середньому значенню, а точніше втратам і магнітної індукції при середнім значенні B_c і середньому радіусі R_i . Тому подальший розрахунок струму, що намагнічує, і втрат у сталі виконується по прийнятому на початку проектування середньому значенню індукції B_c .

Розрахунок розподілу індукції $B_{\delta}(R_i)$ уздовж осі стрижня (рис. 3.1, а) виконується на основі закону повного струму - для будь-якого замкнутого контуру магнітної силової лінії на будь-якому радіусі R_i від внутрішнього до зовнішнього контурів ярма для магніторушійної сили (МРС) однієї фази. Для цього справедливо вираз:

$$\oint H_i dl = F_{\delta i} + F_{ci} + F_{yi} = F_{\Sigma} = const ,$$

де $F_{\delta i}$, F_{ci} , F_{yi} - відповідно значення МРС двох технологічних проміжків, стрижнів і ярма на координаті R_i .

Значення МРС у технологічному зазорі

$$F_{\delta c} = 2B_{\delta c}\delta'10^{-4}/\mu_0 = 2 \cdot 1,2 \cdot 0,00794 \cdot 10^{-4}/(4\pi \cdot 10^{-9}) = 165,54 \text{ А.}$$

де δ' - еквівалентний стиковий зазор на радіусі R_i .

Величина δ' при уточнених значеннях кроку обмотувального вікна і ширині розгорнення i -го кроку стрижня на координаті R_i знаходиться за виразом:

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_o + b_c + 2\pi R_{c.c.i}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{c.c.i}/3} = \\ &= 0,005 \cdot \frac{10 \cdot 0,005 + 8,23 + 3,75 + 2\pi \cdot 4,87/3}{10 \cdot 0,005 + 3,75 + 2\pi \cdot 4,87/3} = 0,00794 \text{ , см.} \end{aligned}$$

де δ_m - технологічний зазор магнітопровода, що залежить від якості обробки стикових поверхонь ярм і стрижнів, $\delta_m = 0,005$;

$R_{c.c.i}$ - змінюваний від 0 до l_y потоковий радіус скруглений стрижня на координаті R_i .

В даному випадку $R_{c.c.i} = l_y/2$, тому що розрахунок ведеться з урахуванням середнього значення магнітної індукції B_c , і величина $R_{c.c.i}$ є постійною.

Значення напруженості в стрижні розраховується по величинах напруженості H_{ci} , що відповідає індукції стрижня на координаті R_i

$$F_{ci} = H_{ci} h_o = 6,3 \cdot 23,05 = 145,2 \text{ А},$$

де $H_{ci} = 6,3 \text{ А/см}^2$ – напруженість магнітного поля, яка визначається за основною кривою намагнічування сталі [6].

Індукція в ярмі на ділянці радіусу R_i

$$\begin{aligned} B_{yi} &= B_{\delta i} \left[2\pi (R_{c.c.i} + b_c / \sqrt{3}) / 3 \right] / (h_y \sqrt{3}) = \\ &= 1,2 \left[2\pi (4,87 + 3,75 / \sqrt{3}) / 3 \right] / (7,83 \cdot \sqrt{3}) = 1,42 \text{ Тл}. \end{aligned}$$

Значення напруженості вибирається в залежності від значення магнітний індукції по кривій намагнічування для сталі 2412 [12]. При $B_{yi} = 1,42 \text{ Тл}$,

$$H_{yi} = 14,2 \text{ А/см}^2.$$

Оскільки активна частина задовольняє умовам створення обертової МРС, магнітне поле трансформатора можна вважати обертовим і розрахувати розподіл індукції в ярмі з використанням рівнянь Лапласа для скалярного магнітного потенціалу і геометричних рядів [15]. При цьому значення МРС у ярмі розраховується по величині напруженості в ярмі, відповідної до індукції ярма на координаті стрижня

$$\begin{aligned} F_{yi} &= \zeta_y 2 H_{yi} (h_y + b_o + b_c + 2\pi R_{c.c.i} / 3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,165 \cdot 2 \cdot 14,2 \cdot (7,83 + 8,23 + 3,75 + 2\pi \cdot 4,87 / 3) / \sqrt{3} = 573,11 \text{ А}. \end{aligned}$$

де ζ_y - коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для середньої ділянки, залежить від довжини витків сталі на координаті R_i висоти ярма.

$$\zeta_{\text{я}} = \frac{2h_{\text{я}}}{(1-k_3)\tau_c} \left[\frac{1}{\text{th}(\pi h_{\text{я}}/\tau_c)} + \frac{k_3}{3\text{th}(3\pi h_{\text{я}}/\tau_c)} \right] =$$

$$= \frac{2 \cdot 7,83}{(1-0,3) \cdot 43,45} \left[\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 7,83/34,45)} + \frac{0,3}{3\text{th}(3\pi \cdot 7,83/34,45)} \right] = 1,165,$$

де τ_c - полюсний поділ ділянки на радіусі R_i

$$\tau_c = 1,5b_o + \pi(R_{c.ci} + b_c/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 8,23 + \pi(4,87 + 3,75/\sqrt{3}) = 34,45 \text{ см};$$

k_3 – коефіцієнт амплітуди третьої гармоніки індукції ($k_3 = 0,2 \dots 0,3$), приймається $k_3 = 0,3$.

Значення сумарної МРС середньої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\Sigma} = F_{\delta i} + F_{c.i} + F_{я.i} = 165,54 + 573,11 + 145,2 = 883,84 \text{ А}.$$

Реактивна складова струму неробочого руху

$$I_{0p} = \frac{F_{\Sigma}}{\sqrt{2}w_1k_v} = \frac{883,84}{\sqrt{2} \cdot 7 \cdot 1,35} = 71,46 \text{ А},$$

де $k_v = 1,35$ – коефіцієнт, який ураховує наявність у намагнічувальному струмі вищих гармонік.

4.3. Розрахунок втрат неробочого руху

Втрати в сталі трансформатора визначаються коефіцієнтами об'ємних втрат в елементах магнітопровода (стрижнів, прямих ділянок та кутових ділянок ярем), а також залежать від величини деформації і якості випалу електротехнічної сталі й у цілому від технічного рівня і культури виробництва.

Коефіцієнти об'ємних втрат елементів магнітопровода:

- стрижнів

$$k_{pc} = 3h_o \Delta l_{\text{я}} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{\kappa} (b_c + 2\pi R_{c.ci}/3) B_{ci}^2;$$

для даного випадку

$$k_{pc} = 3h_o l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_k (b_c + 2\pi R_{c.ci} / 3) B_{ci}^2,$$

де $P_{1/50}$ - питомі втрати в електротехнічній сталі при індукції 1 Тл і частоті перемагнічування 50 Гц;

$$k_{pc} = 3 \cdot 23,05 \cdot 9,74 \cdot 1,3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 0,85 (3,75 + 2\pi \cdot 4,87 / 3) \cdot 1,2^2 = 14540.$$

- прямих ділянок ярем

$$k_{ря} = 6b_o h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{д3i} B_{яi}^2,$$

де $k_{д3i}$ - коефіцієнт додаткових втрат від третьої гармоніки поля у ярмі

$$k_{д3i} = 1 + 0,55 \left[(k_{Bi} / 1,11)^2 - 1 \right] = 1 + 0,55 \left[(1,28 / 1,11)^2 - 1 \right] = 1,181;$$

де k_{Bi} - коефіцієнт форми кривої індукції, який для діапазону $B_{яi}$ від 0,9 до 1,2 Тл може бути прийнятим від 1,28 до 1,43 Тл.

для даного випадку

$$k_{ря} = 6b_o h_{я} l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{д3i} B_{яi}^2,$$

$$k_{ря} = 6 \cdot 8,23 \cdot 7,83 \cdot 9,74 \cdot 1,3 \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 1,181 \cdot 1,42^2 = 8388.$$

- кутових ділянок ярем

$$k_{рк} = 6h_{я} \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} \sum_{i=1}^{i=n\Delta} k_{д3i} (b_c + 2\pi R_{c.ci} / 3) B_{ki}^2,$$

для даного випадку

$$k_{рк} = 6h_{я} l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1,5} k_{д3i} (b_c + 2\pi R_{c.ci} / 3) B_{ki}^2,$$

$$k_{рк} = 6 \cdot 7,83 \cdot 9,74 \cdot 1,3 \cdot \left(\frac{50}{50} \right)^{1,5} 1,181 (3,75 + 2\pi \cdot 4,87 / 3) 1,189^2 = 10260,$$

де B_{ki} - розрахункова величина індукції кутових зон ярма просторового стикового магнітопроводу визначається за виразами, Тл:

$$B_{\kappa i} = 0,87(B_{ci} + B_{яi}) / 2 = 0,87(1,2 + 1,42) / 2 = 1,189.$$

Втрати в сталі трансформатора

$$P_c = 1,2(k_{pc} + k_{ря} + k_{рк})k_{з.с}\gamma_c 10^{-6} =$$

$$= 1,2(14540 + 8388 + 10260) \cdot 0,95 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 277,25 \text{ Вт.}$$

Активна складова струму неробочого руху

$$I_{0a} = P_c / (3U_{\phi 1}) = 277,25 / (3 \cdot 11,1) = 8,326 \text{ А.}$$

Величина струму неробочого руху визначається виразом

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{71,46^2 + 8,326^2} = 71,94 \text{ А.}$$

4.4. Визначення втрат короткого замикання та характеристик

Сума ділянок ширини b_o обмотувального вікна, що приходяться на первинну і вторинні обмотки, см:

$$b_1 = 2\Pi_{\text{еф}1}w_1 / (k_{zo}h_o) = 2 \cdot 3,588 \cdot 7 / (0,38 \cdot 23,05) = 5,598;$$

$$b_2 = 2\Pi_{\text{еф}21}w_{21} / (k_{zo}h_o) = 2 \cdot 0,081 \cdot 83 / (0,38 \cdot 23,05) = 1,53;$$

$$b_{22} = 2\Pi_{\text{еф}22}w_{22} / (k_{zo}h_o) = 2 \cdot 0,383 \cdot 49 / (0,38 \cdot 23,05) = 4,27.$$

У триобмотковому трансформаторі первинна обмотка звичайно розташовується між двома вторинними. Також можливий дисковий варіант обмоток (галетні обмотки). При цьому середня довжина витків обмоткових котушок однакова. Приймаємо обмотки дискового типу.

Середня довжина витка галетної обмотки

$$l_W = 2D_B [1,181(a-1) + 1,286k_{\alpha 1} + 0,7195k_{\alpha 2}] =$$

$$= 2 \cdot 12,98 [1,181(2,5-1) + 1,0893 \cdot 0,289 + 0,7854 \cdot 0,634] = 67,49, \text{ см.}$$

Маси провідникового матеріалу фаз первинної і вторинних обмоток трансформатора, кг:

$$m_{o1} = \Pi_{\text{еф}1}w_1l_w\gamma'_o = 3,588 \cdot 7 \cdot 67,49 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 14,73;$$

$$m_{o21} = \Pi_{\text{еф}21} w_{21} l_w \gamma'_o = 0,081 \cdot 83 \cdot 67,49 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 4,03;$$

$$m_{o22} = \Pi_{\text{еф}22} w_{22} l_w \gamma'_o = 0,383 \cdot 49 \cdot 67,49 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 11,23,$$

де γ'_o – питома маса провідникового матеріалу обмоток, для міді $\gamma'_o = 8,9 \cdot 10^{-3}$ кг/см³.

Маса обмотки трансформатора фазового компаундування

$$m_o = 3(m_{o1} + m_{o21} + m_{o22}) = 3 \cdot (12,015 + 2,105 + 5,863) = 89,95 \text{ кг.}$$

Втрати у фазі кожної з обмоток при 75°C, Вт:

$$P_{\text{ел}1} = P_{\text{ел.п}} \Delta_1^2 \Pi_{\text{еф}1} w_1 l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 3,588 \cdot 7 \cdot 67,47 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 220,87;$$

$$P_{\text{ел}21} = P_{\text{ел.п}} \Delta_{21}^2 \Pi_{\text{еф}21} w_{21} l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,081 \cdot 83 \cdot 67,47 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 60,457;$$

$$P_{\text{ел}22} = P_{\text{ел.п}} \Delta_{22}^2 \Pi_{\text{еф}22} w_{22} l_w \gamma'_o = 2,4 \cdot 2,5^2 \cdot 0,383 \cdot 49 \cdot 67,47 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 168,42,$$

де $P_{\text{ел.п}} = 2,4 \text{ Вт} \cdot \text{А}/(\text{кг} \cdot \text{мм}^2)$ – питомі втрати.

Втрати короткого замикання

$$P_k = 3(P_{\text{ел}1} + P_{\text{ел}21} + P_{\text{ел}22}) = 3(220,87 + 60,457 + 168,42) = 1349 \text{ Вт.}$$

Відносні активні падіння напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора:

$$\Delta U_{a1} \% = 100 P_{\text{ел}1} / (\sqrt{3} U_1 I_1) = 100 \cdot 220,87 / (\sqrt{3} \cdot 19,2 \cdot 1942) = 0,428;$$

$$\Delta U_{a21} \% = 100 P_{\text{ел}21} / (\sqrt{3} U_{21} I_{21}) = 100 \cdot 60,457 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 16,166) = 0,432;$$

$$\Delta U_{a22} \% = 100 P_{\text{ел}22} / (\sqrt{3} U_{22} I_{22}) = 100 \cdot 168,42 / (\sqrt{3} \cdot 235 \cdot 76,652) = 0,43.$$

Активні опори обмоток трансформатора, Ом:

$$r_1 = P_{\text{ел}1} / I_{\text{ф}1}^2 = 220,87 / 1121^2 = 2,75 \cdot 10^{-4};$$

$$r_{21} = P_{\text{ел}21} / I_{\text{ф}21}^2 = 60,457 / 16,166^2 = 0,148;$$

$$r_{22} = P_{\text{ел}22} / I_{\text{ф}22}^2 = 168,42 / 76,652^2 = 0,018.$$

Активні опори короткого замикання, Ом:

$$r_{k1,21} = r_1 + r_{21} = r_1 + r_{21} (w_1 / w_{21})^2 = 2,75 \cdot 10^{-4} + 0,148 \cdot (7/83)^2 = 1,278 \cdot 10^{-3};$$

$$r_{k1,22} = r_1 + r_{22} = r_1 + r_{22}(w_1/w_{22})^2 = 2,75 \cdot 10^{-4} + 0,018 \cdot (7/49)^2 = 6,35 \cdot 10^{-4}.$$

Відносні індуктивні падіння напруги пар обмоток триобмоткового трансформатора, віднесені до потужності первинної обмотки, %:

$$\Delta U_{L1\%} = \frac{I_1 w_1 l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{1942 \cdot 7 \cdot 67,49 \cdot 8,23}{6,66 \cdot 23,05 \cdot 104,95 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 5,28;$$

$$\Delta U_{L21\%} = \frac{I_{21} w_{21} l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{16,166 \cdot 83 \cdot 67,49 \cdot 8,23}{6,66 \cdot 23,05 \cdot 104,95 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 3,51;$$

$$\Delta U_{L22\%} = \frac{I_{22} w_{22} l_w b_o}{6,66 h_o \Pi_c B_c} \cdot 10^{-2} = \frac{76,652 \cdot 49 \cdot 67,49 \cdot 8,25}{6,66 \cdot 23,05 \cdot 104,95 \cdot 1,2} \cdot 10^{-2} = 4,86.$$

Напруги короткого замикання пар обмоток триобмоткового трансформатора, %:

$$U_{k1,21}\% = 100 I_1 r_{k1,21} / U_1 = 100 \cdot 1942 \cdot 1,278 \cdot 10^{-3} / 19,2 = 13,57 ;$$

$$U_{k1,22}\% = 100 I_1 r_{k1,22} / U_1 = 100 \cdot 1924 \cdot 6,347 \cdot 10^{-4} / 19,2 = 13,213 .$$

Номінальна величина ККД трансформатора

$$\eta_n = P_2 / [P_2 + (P_c + P_k) 10^{-3}] = 42,4 / [42,4 + (277,245 + 1349) 10^{-3}] = 0,963 .$$

Активна і реактивна складові струму первинної обмотки, А:

$$I_{1a} = \frac{S_{21} \cos \varphi_{21} + S_{22} \cos \varphi_{22}}{\eta_n U_1} = \frac{42,4 \cdot 10^3}{0,963 \cdot 19,2} = 1324 ;$$

$$I_{1p} = I_{0p} + \frac{S_{21} \sin \varphi_{21} + S_{22} \sin \varphi_{22}}{\eta_n U_1} = 1064 .$$

Величина коефіцієнта потужності

$$\cos \varphi_1 = 1 / \sqrt{1 + (I_{1p} / I_{1a})^2} = 1 / \sqrt{1 + (1064 / 1324)^2} = 0,779 .$$

Зміна напруги під навантаженням, %:

$$\Delta U_{1,21} = \Delta U_{a1\%} \cos \varphi_1 + \Delta U_{a21\%} \cos \varphi_{21} + \Delta U_{L21\%} \sin \varphi_1 + \Delta U_{L2\%} \sin \varphi_{21} = 6,098$$

$$\Delta U_{1,22} = \Delta U_{a1\%} \cos \varphi_1 + \Delta U_{a22\%} \cos \varphi_{22} + \Delta U_{L22\%} \sin \varphi_1 + \Delta U_{L2\%} \sin \varphi_{22} = 8,178$$

Характеристику залежності ККД від коефіцієнта навантаження побудуємо за допомогою прикладного математичного пакету Mcad 14 Professional.

Залежність ККД від навантаження ($K_H = 0,1 \dots 1,4$):

$$\eta_{1,21} = \frac{(K_{H21} P_{21H} + P_{22H}) 10^3}{(P_{22H} + K_{H22} P_{21H}) 10^3 + P_c \left(1 + \frac{\Delta U_{1,21} \%}{200} - K_{H21} \frac{\Delta U_{1,21} \%}{200} \right)^2 + K_{H21}^2 (P_K - I_{op}^2 r_1) + I_{op}^2 r_1} ;$$

$$\eta_{1,22} = \frac{(K_{H22} P_{22H} + P_{21H}) 10^3}{(P_{21H} + K_{H22} P_{22H}) 10^3 + P_c \left(1 + \frac{\Delta U_{1,22} \%}{200} - K_{H22} \frac{\Delta U_{1,22} \%}{200} \right)^2 + K_{H22}^2 (P_K - I_{op}^2 r_1) + I_{op}^2 r_1} ;$$

$$\eta = 1 - \frac{(K_H P_K + P_c) 10^3}{(K_H S_H \cos \phi_2 + K_H^2 P_K + P_c)}.$$

Характеристика залежності ККД від навантаження представлена на рис.4.2.

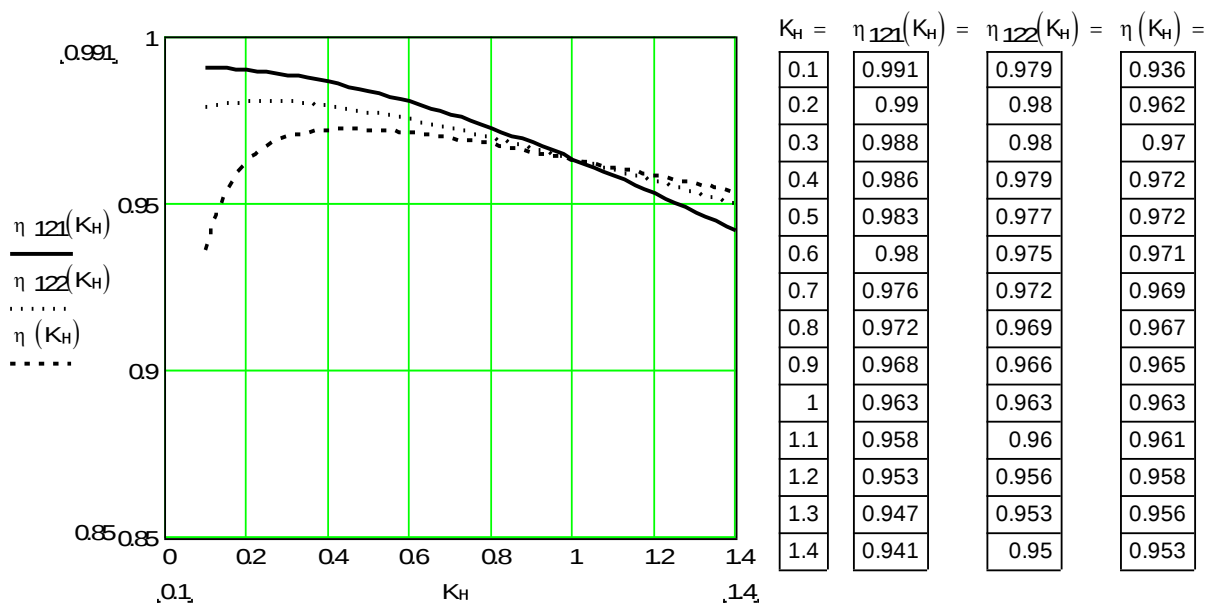


Рис. 4.2. Залежність ККД від коефіцієнта навантаження

Маса магнітопроводу трансформатора

$$m_M = \gamma_c k_{з.с} [3 \Pi_c h_o + 6(\Pi_c + b_o l_{я}) h_{я}] = 111 \text{ кг.}$$

Маса активної частини трансформатора

$$m_{ач} = m_M + m_o = 111 + 89,95 = 201 \text{ кг.}$$

ЛІТЕРАТУРА

1. Мещанинов П.А. Автоматизация судовых электроэнергетических систем [Текст] / П.А. Мещанинов. – Л: Судостроение, 1977. – 512 с.
2. Краснов В.В. Основы теории и расчета судовых электроэнергетических систем [Текст] / В.В. Краснов, П.А. Мещанинов, А.П. Мещанинов. – Л: Судостроение, 1989. – 328 с.
3. Захаров О.Г. Настройка аппаратуры и систем судовой электроавтоматики [Текст] / О.Г. Захаров. – Л.: Судостроение, 1988. – 88 с.
4. Михайлов В.А. Автоматизированные электроэнергетические системы судов [Текст] / В.А. Михайлов. – Л: Судостроение, 1977. – 512с.
5. Ермолин Н.П. Расчет трансформаторов малой мощности [Текст] / Н.П. Ермолин. – Л.: Энергия, 1970. – 190 с.
6. Гусев С.А. Очерки по истории развития электрических машин [Текст] / С.А. Гусев. – М.: Госэнергоиздат, 1955. – 216с.

7. Бальян Р.Х. Трансформаторы малой мощности [Текст] / Р.Х. Бальян. – Л.: Судпромиз, 1961. – 368с.
8. Костенко М.П. Электрические машины. В 2-х ч., Ч.1 – Машины постоянного тока и трансформаторы. Учебник для вузов [Текст] / М.П. Костенко, Л.М. Пиотровский. – Л.: Энергия, 1972. – 544с.
9. Майорец А.И. Магнитопроводы силовых трансформаторов (технология и оборудование) [Текст] / А.И. Майорец, Г.И. Пшеничный, Я.З. Чечелюк. – М.: Энергия, 1973. – 272с.
10. Ставинский А.А. Генезис структур и предпосылки усовершенствования трансформаторов и реакторов преобразованием контуров электромагнитных систем (электродинамическая устойчивость и системы со стыковыми магнитопроводами) [Текст] / А.А. Ставинский // Електротехніка і електромеханіка. –2011.–№ 5. – с. 43-47.
11. Кондратенко Ю.П., Ставинский Р.А., Плахтырь О.О. Выбор технических решений трехфазных трансформаторов для судовых систем автоматического управления // Автоматизация судовых технических средств: Науч.-техн. сб. – Одесса: ОМА. – 2002. – Вип. 7. – С. 67–73.
12. Ставинський А.А., Розрахунок трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом: Навчальний посібник. [Текст] / А.А. Ставинський, Р.А. Ставинський, О.О. Плахтир. – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.
13. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов: Учебное пособие для вузов. – 5-е издание. перераб. и доп. [Текст] / П.М. Тихомиров. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528с.
14. Ставинский А.А. Способы энергоресурсосбережения в судовой силовой электротехнике на основе встроенной принудительной вентиляции [Текст]/ Ставинский А.А., Чекунов В.К., Плахтырь О.О., Ставинский Р.А., Боднар О.Г. // Автоматика. Автоматизация. Электротехнические комплексы и системы. – 2002. – №1(10). – С. 133–137.
15. Ставинский Р.А. Особенности распределения магнитного поля в пространственном магнитопроводе трехфазного трансформатора малой мощности

[Текст]// Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. наук.-техн. зб.
– 2000. – Вип. 54. – С. 63–67.