

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

_____ Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« _____ » _____ 202__ р.

ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА
ДО КВАЛІФІКАЦІЙНОЇ РОБОТИ МАГІСТРА

на тему РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО
ГЕНЕРАТОРА ШЛЯХОМ ЗМІНИ СТРУМУ ПІДМАГНІЧУ-
ВАННЯ РЕАКТОРА

Виконав: студент 6 курсу, групи 6367м
спеціальності 141. Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка
освітньої-професійної програми:
Експлуатація суднових автоматизованих
систем

_____ Бачище О.С.
(прізвище та ініціали)

Керівник: _____ Бугрім Л.І.
(прізвище та ініціали)

Рецензент: _____ Новогрецький С.М.
(прізвище та ініціали)

м. Херсон – 2020 року

Національний університет кораблебудування імені адмірала Макарова

Херсонська філія

Енерготехнічний факультет

кафедра автоматики та електроустаткування

Ступень вищої освіти: магістр

Галузь знань 14. Електрична інженерія
(шифр і назва спеціальності)

Спеціальність 141. Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка
(шифр і назва спеціальності)

Освітньо-професійна програма Експлуатація суднових автоматизованих систем
(назва освітньої програми)

ЗАТВЕРДЖУЮ

зав. кафедри автоматики та
електроустаткування

Михаліченко П.Є.
(підпис) (прізвище та ініціали)

« » 202 р.

ЗАВДАННЯ

на кваліфікаційну магістерську роботу

Студенту Бачище Олексію Сергійовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Регулювання напруги асинхронного генератора шляхом
зміни струму підмагнічування реактора

науковий керівник Бугрім Леонід Іванович, канд.техн.наук, доцент

затверджено наказом вищого навчального закладу від « » 20 р. №

2. Строк подання студентом роботи « » 20 р.

3. Вихідні данні для роботи технічні показники система регулювання напруги
асинхронного генератора шляхом підключення паралельно конденсаторній
батарей керованого підмагнічуванням реактора трансформаторного типу

4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки 1. Теоретичні відомості та прин-
ципи регулювання напруги асинхронних генераторів; 2. Конструкція та матема-
тичний опис реактора трансформаторного типу для регулювання реактивної по-
тужності конденсаторної установки асинхронного генератора; 3. Розрахунок ре-
актора трансформаторного типу із проторовим магнітопроводом керований по-
перечним підмагнічуванням; 4. Вимоги положень Міжнародної конвенції
МАРПОЛ 73/78 щодо устрою таків та корпусу нафтоналивних суден

5. Перелік графічного матеріалу: принцип роботи асинхронного генератора; регулювання напруги шляхом підмагнічування спинки статора; системи регулювання напруги на базі керованих індукційних перетворювачів та керованих конденсаторних батарей; схеми стабілізації напруги керованими реакторами; схема заміщення та математична модель реактора трансформаторного типу; графічні залежності реактивної потужності та напруги на додатковій вторинній обмотці; схема керованого реактора трансформаторного типу; конструкція керованого трансформатора із просторовим магнітопроводом; запропонована конструкція реактора трансформаторного типу; математична модель запропонованого реактора; результати розрахунку системи регулювання напруги для асинхронного генератора потужністю 75 кВт; техніко-економічні показники системи асинхронний генератор – керований реактор.

6. Дата видачі завдання «__» _____ 20__ р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапу роботи	Строк виконання етапів роботи	Примітка
1	Закінчити розділ 1	березень 2020 р	
2	Закінчити розділ 2	червень 2020 р	
3	Закінчити розділ 3	вересень 2020 р	
4	Закінчити розділ 4	жовтень 2020 р	
5	Закінчити оформлення роботи	листопад 2020 р	

Студент

(підпис)

Бачище О.С.

(прізвище та ініціали)

Науковий керівник

(підпис)

Бугрім Л.І.

(прізвище та ініціали)

АНОТАЦІЯ

В магістерській роботі проведений аналіз роботи асинхронного генератора. Розглянуті конструктивні особливості різних систем регулювання напруги асинхронного генератора. В результаті запропоновано розглянути спосіб регулювання реактивної потужності конденсаторних батарей шляхом регулювання підмагнічування реактора трансформаторного типу. Запропоновано в аксіальній просторовій симетричній магнітній системі основні обмотки (мережеву і вторинну) та додаткову обмотку просторово розділити шляхом розміщення в обмотковому вікні між ними шунта, який підмагнічується поперечним магнітним полем, що утворюється обмоткою підмагнічування, розташованою на одному рівні із додатковою вторинною обмоткою. Розраховані технічні характеристики системи стабілізації напруги із запропонованою конструкцією керованого реактора. Показана ефективність розглянутої конструкції у порівнянні із синхронними генераторами при потужності установки до 75 кВт.

ABSTRACT

In the master's work the analysis of work of the asynchronous generator is carried out. The design features of different voltage control systems of an asynchronous generator are considered. As a result, it is proposed to consider a method of regulating the reactive power of capacitor banks by adjusting the magnetic bias of a transformer-type reactor. It is proposed to divide the main windings (mains and secondary) and the additional winding spatially in an axial spatial symmetric magnetic system by placing a shunt in the winding window between them, which is magnetized by a transverse magnetic field formed by a bias winding. The technical characteristics of the voltage stabilization system with the proposed design of the controlled reactor are calculated. The efficiency of the considered design in comparison with synchronous generators at power of installation to 75 kW is shown.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	7
Розділ 1. ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПРИНЦИПИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ	9
1.1. Робота асинхронних генераторів на потужну мережу та автономне навантаження	9
1.2. Самозбудження асинхронного генератора	12
1.3. Зміна ковзання асинхронних генераторів при роботі на автономне навантаження	16
1.4. Принципи регулювання і стабілізації.....	22
1.5. Схеми регулювання і стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора.....	25
1.6. Висновки до розділу 1	37
РОЗДІЛ 2. КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС РЕАКТОРА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ ІЗ ПРОСТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА.....	39
2.1. Реактор трансформаторного типу як елемент електромеханічної системи із регульованою реактивної потужності	39
2.2. Вибір конструкції реактора трансформаторного типу із просторовим магнітопроводом	47
2.3. Математична модель реактора трансформаторного типу із просторовою магнітною системою та поперечним підмагнічуванням шунта	54
2.4. Висновки до розділу 2.....	61

РОЗДІЛ 3. РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ ІЗ ПРОТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ КЕРОВАНИЙ ПОПЕРЕЧНИМ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА	63
3.1. Розрахунок параметрів системи регулювання напруги асинхронного генератора потужністю 75 кВт	63
3.2. Розрахунок трансформатора із просторовим магнітопроводом	71
3.3. Розрахунок реактора трансформаторного типу із просторовим магнітопроводом керованого поперечним підмагнічуванням	97
3.4. Висновки до розділу 3	106
РОЗДІЛ 4. ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО УСТРОЮ ТАКІВ ТА КОРПУСУ НАФТОНАЛИВНИХ СУДЕН.....	108
4.1 Танки ізольованого баласту	108
4.2. Відстійних танки	110
4.3. Вантажні такни	112
4.4. Система мийки танків сирого нафтою	113
4.5. Вимоги додатка I до МАРПОЛ 73/78 щодо подвійного корпусу нафтоналивних суден.....	113
4.6. Розподіл на відсік і остійність	115
4.7. Розрахунок умовних ушкоджень корпусу нафтоналивних суден та передбачуваного виливу нафти	116
ВИСНОВКИ	118
СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ	121

ВСТУП

В автономних електростанціях малої потужності все частіше знаходять використання асинхронні генератори, які по відношенню до синхронних генераторів мають менші малогабаритні показники, простішу конструкцію та, як наслідок, більш високу надійність роботи. Останнє зумовлено короткозамкненою обмоткою ротора і відсутністю необхідності живлення обмотки ротора від додаткового регульованого джерела живлення – збудника. Але для роботи асинхронного генератора необхідна група конденсаторів із регульованою ємністю, яка підключається паралельно обмоткам статора и дозволяє забезпечувати постійність змінної напруги на клеммах обмотки. Існує багато способів змінювати величину реактивної потужності, що генерують конденсатори, але найбільш широкий діапазон регулювання можливий за рахунок підключення паралельно конденсаторам регульованого індуктивного опору – реактора.

Реактори застосовуються в електротехнічних системах та комплексах в якості баластних і струмообмежуючих опорів, елементів електричних фільтрів, перетворювачів і регуляторів струму, а також регуляторів потоків реактивної потужності. Трансформатори встановлюються на виходах електростанцій і підвищують напругу, що дозволяє передавати електроенергію на далекі відстані і знижувати втрати. Виробництво зазначених індукційних апаратів - масове. Тому в даний час в Україні інтенсивне і зростаюче енергоспоживання вимагає вирішення комплексного завдання енергоресурсозбереження та удосконалення процесів виробництва, розподілу та перетворення електроенергії. Важливою складовою зазначеної задачі є підвищення технічного рівня силових трансформаторів і реакторів, а також надійність та низька матеріаломісткість.

Вирішення питань енергоресурсозбереження при розробці статичних індукційних пристроїв можливо шляхом вдосконалення конструктивних рішень, які більш ефективно надають якісну напругу асинхронних генераторів, а саме за рахунок її регулювання.

Об'єктом дослідження є система регулювання напруги асинхронного генератора шляхом підключення паралельно конденсаторній батареї керованого підмагнічуванням реактора трансформаторного типу.

Предметом дослідження є техніко-економічні показники системи асинхронний генератор - керований реактор трансформаторного типу.

Цілі та задачі дослідження:

- аналіз особливостей та схемної реалізації систем регулювання напруги асинхронних генераторів;
- аналіз існуючих та визначення нових конструкторсько-технологічних рішень керованого підмагнічуванням реактора;
- розрахунок та проектний аналіз системи регулювання напруги асинхронного генератора потужністю 75 кВт на базі керованого поперечним підмагнічуванням реактора просторової конструкції.

Методи дослідження. Для аналізу магнітних систем застосовувався метод еквівалентності між електричним та магнітними колами, а також метод контурних струмів для аналітичного визначення функціональної залежності між параметрами еквівалентного електричного кола.

Наукова новизна отриманих результатів:

- вперше запропоновано в аксіальній просторовій симетричній магнітній системі основні обмотки (мережеву і вторинну) та додаткову обмотку просторово розділити шляхом розміщення в обмотковому вікні між ними шунта, який підмагнічується поперечним магнітним полем, що утворюється обмоткою підмагнічування, розташованою на одному рівні із додатковою вторинною обмоткою;
- вперше отримані аналітичні залежності магнітного потоку вторинної обмотки, намагнічуючих сил первинної і вторинної обмоток від магнітного потоку первинної обмотки та ступеню намагнічування магнітного шунта.

РОЗДІЛ 1.

ТЕОРЕТИЧНІ ВІДОМОСТІ ТА ПРИНЦИПИ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННИХ ГЕНЕРАТОРІВ

1.1 Робота асинхронних генераторів на потужну мережу та автономне навантаження

Якщо ротор асинхронного двигуна прискорити за допомогою зовнішнього приводу до частоти обертання, що перевищує частоту обертання магнітного потоку, тобто здійснити умову $n > n_1$, то ковзання $s = (n_1 - n)/n_1$ стане негативним і машина перейде в режим асинхронного генератора. При цьому в первинну обмотку генерується активна потужність, що передається навантаженню, яке з'єднане з первинним ланцюгом. Спрощену роботу АГ можна пояснити наступним чином. Струм в короткозамкненій роторній обмотці, що виникає за рахунок її відносного руху в первинному магнітному полі, створює власний магнітний потік, який, в свою чергу, наводить в обмотці статора додаткову ЕРС і активний струм, що живить навантаження. Розглянемо два основні способи включення АГ: на мережу великої потужності і на автономне навантаження. При роботі паралельно з потужною мережею АГ описується схемами заміщення, показаними на рис. 1.1.

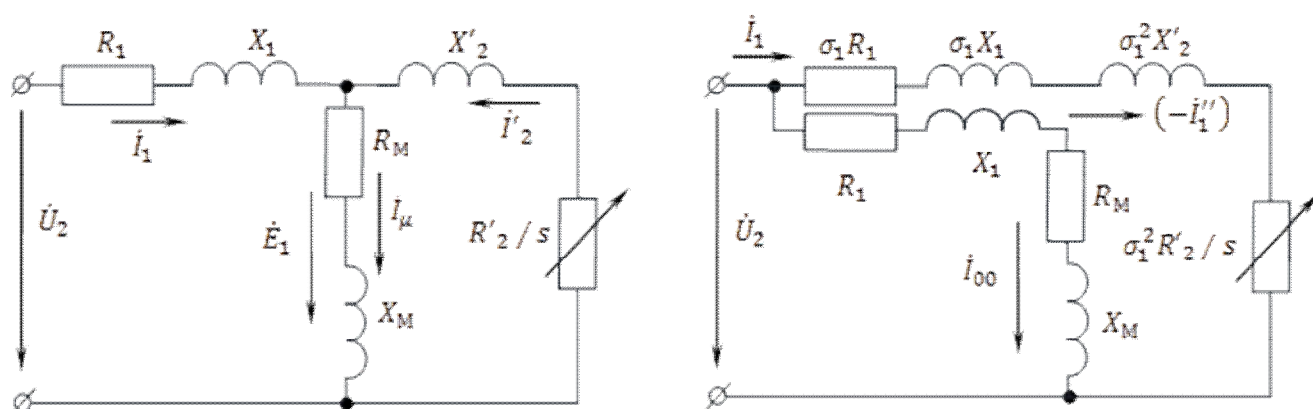


Рисунок 1.1 Т-подібна (а) та Г-подібна (б) схеми заміщення асинхронної машини

Відмінність від двигунного режиму полягає в тому, що $s < 0$ і $\cos \psi_2 < 0$. Останній умові задовольняє кут $\psi_2 > \pi/2$, тому векторна діаграма

АГ, набуває вигляду, представленого на рис. 1.1 (а). Той факт, що струм I'_2 значну частину періоду спрямований протилежно приведеній вторинній ЕРС $E'_2 = E_1$, пов'язаний з тим, що при $s < 0$ дійсна ЕРС в роторі змінює знак, так як в системі координат, пов'язаної з переміщенням потоку, провідники ротора рухаються в різні боки при $s < 0$ і $s < 0$.

Векторна діаграма для АГ будується в тій же послідовності, що і для АД. У режимі АГ маємо $\varphi > \pi/2$, $\cos \varphi < 0$ і $P = mU_1 I_1 \cos \varphi < 0$, так, як активна потужність машини змінює знак і, отже, не споживається (як в АД), а виробляється машиною. У той же час реактивна потужність машини $Q = mU_1 I_1 \sin \varphi$ має один і той же знак при $\varphi < \pi/2$ (режим АД) і при $\varphi > \pi/2$ (режим АГ), тобто, завжди споживається асинхронною машиною з мережі і забезпечує створення обертового магнітного потоку.

При роботі спільно з потужною мережею первинна напруга АГ і частота струму в його первинній обмотці задані і незмінні. Тому для збільшення потужності, що віддається генератором у мережу, його привід повинен забезпечити зростання частоти обертання ротора.

Недоліком АГ, що працює на мережу і споживає з мережі значну реактивну потужність Q , є відносно низьке значення $\cos \varphi$ в порівнянні, наприклад, з синхронними генераторами.

Робота АГ на автономне навантаження. Нехай АГ працює на активно-індуктивне навантаження з опором $Z_H = R_H + jX_H$. В даному випадку реактивна потужність, необхідна для створення змінюваного в часі магнітного поля, не може забиратися з мережі, а повинна вироблятися спеціальним джерелом. Зазвичай їм є батарея конденсаторів з фазною ємністю C , що включаються паралельно з Z_H (рис. 1.2, а).

Схема заміщення АГ з автономним навантаженням (рис. 1.2, б) відрізняється від звичайної схеми заміщення асинхронної машини тим, що вхідні затишки машини підключаються не до мережі, а до навантаження Z_H і ємкісного опору $X_C = 1/(\omega C)$.

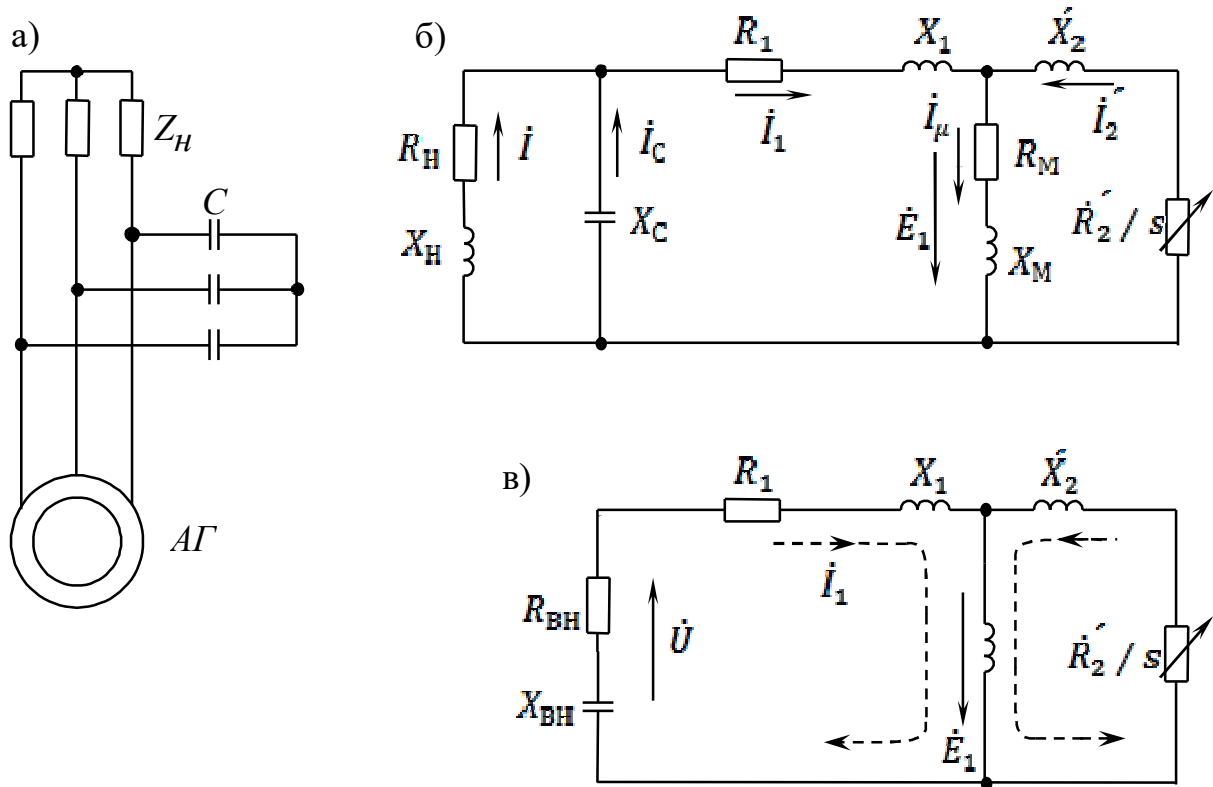


Рисунок 1.2 Асинхронний генератор, який працює на автономне навантаження (а), схема його заміщення (б) та перетворена схема заміщення (в)

Для зручності аналізу об'єднаємо Z_H і X_C в одну зовнішню гілку з активним R_{BH} і реактивним X_{BH} опорами:

$$R_{BH} = \frac{R_H X_C^2}{R_H^2 + (X_H - X_C)^2}; \quad X_{BH} = \frac{-X_C [R_H^2 + X_H(X_H - X_C)]}{[R_H^2 + (X_H - X_C)^2]}.$$

Змінена схема для випадку $R_M \ll X_M$, що зазвичай реалізується в АГ, наведена на рис. 1.2 (в). Схема заміщення дозволяє пояснити роботу АГ на автономне навантаження з загальних фізичних позицій. З рис. 1.2 можна зробити висновок, що первинний ланцюг АГ подібний коливальному LC -контурі з активним опором $R_{BH} + R_1$. В резонансному режимі струм в цьому контурі при відсутності зв'язку із вторинним ланцюгом згасав би через активний опір. Однак в схемі є негативний активний опір R'/s , яке може компенсувати позитивний опір $R_{BH} + R_1$ і схема заміщення перетворюється в ідеальний LC -контур без втрат з незатухаючим стру-

мом. Іншими словами, активна потужність, що забирається опором $R_{\text{вн}} + R_1$ компенсується потужністю, що вводиться в LC -контур із гілки з негативним опором R'_2/s . Термін «негативний опір» відноситься до розрахункового параметру схеми заміщення R'_2/s . В дійсності всі активні опори позитивні, а передача потужності з вторинного ланцюга в первинний здійснюється за рахунок електромагнітної взаємодії між статором і ротором АГ.

1.2. Самозбудження асинхронного генератора

Самозбудження АГ забезпечується за рахунок остаточного магнітного потоку $\Phi_{\text{ост}}$ в роторі. Розглянемо якісні процеси самозбудження АГ при холостому ході, вважаючи $Z_{\text{н}} \rightarrow \infty; s \rightarrow 0; R_1, R_{\text{м}} \ll X_1, X_{\text{м}}$. У цьому випадку на схемі (рис. 1.2, б) залишається контур, що складається з індуктивного $X_1 + X_{\text{м}}$ і ємнісного $X_{\text{с}}$ опорів. Якщо I_0 - струм холостого ходу в контурі, то залежність напруги на $X_{\text{с}}$ від I_0 описується прямою лінією $U_{\text{с}} = X_{\text{с}} I_0$, а залежність напруги на $X_1 + X_{\text{м}}$ від I_0 , тобто $U_{\text{л}}(I_0) = (X_1 + X_{\text{м}}) I_0$, нелінійною кривою (рис. 1.3, а) через насичення сталевих сердечників і збільшення коефіцієнта насичення магнітного кола $k_{\text{м}}$. Спочатку під дією ЕРС $E_{\text{ост}}$, що наводиться $\Phi_{\text{ост}}$, в контурі виникає струм $I_{0\text{ост}}$, який під дією надлишкової напруги $U_{\text{л}} - U_{\text{с}}$ наростає до тих пір, поки криві $U_{\text{с}}(I_0)$ і $U_{\text{л}}(I_0)$ не перетнуться в точці А, яка відповідає сталому режиму. Процес наростання I_0 можна пояснити за допомогою векторної діаграми (рис. 1.3, б). Під дією $\dot{E}_{\text{ост}}$ в первинному колі починає текти струм, який завдяки ємності має істотну ємнісну складову $\dot{I}_{0\text{с}}$, яка випереджає $\dot{E}_{\text{ост}}$ на $\pi/2$. Під дією $\dot{I}_{0\text{с}}$ створюється потік Φ , направлений так само, як і $\dot{\Phi}_{\text{ост}}$, тобто відбувається підмагнічування машини; ЕРС $\dot{E}$ збільшується, струм $\dot{I}_{0\text{с}}$ зростає і так до тих пір, поки не буде досягнений усталений режим (точка А на рис. 1.3, а). Відомо, що для самозбудження АГ необхідно, щоб нахил лінійної частини кривої $U_{\text{л}}(I_0)$ перевищував нахил лінії $U_{\text{с}}(I_0)$, звідки маємо умову самозбудження:

$$X_1 + X_{\text{м}} > X_{\text{с}}.$$

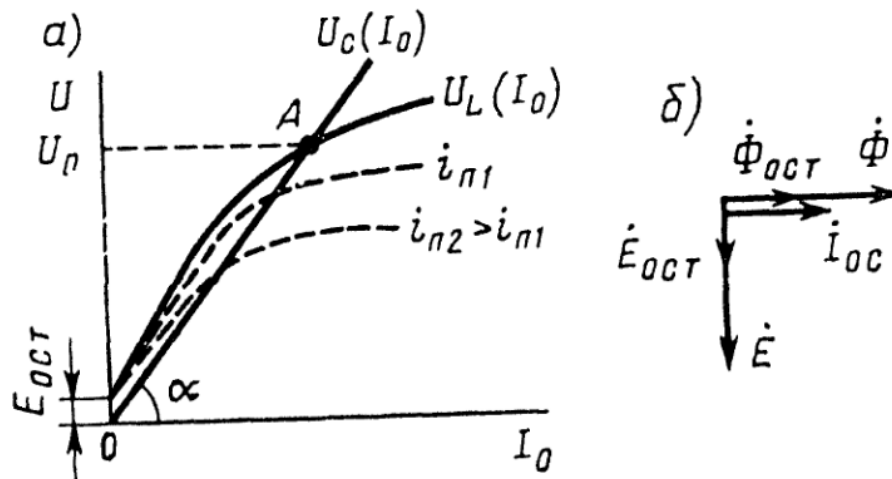


Рисунок 1.3. Вольт-амперна характеристика (а) та векторна діаграма (б), що пояснює процес самозбудження асинхронного генератора

У точці A маємо $X_C = X_1 + X_m$, де X_1 і X_m відповідають частково насиченим сталевим сердечником, звідки можна оцінити значення ємності, необхідної для самозбудження АГ:

$$C = \frac{1}{2 \pi f (X_1 + X_M)}.$$

Строгий аналіз нестационарних процесів в АГ, в тому числі процесів його самозбудження, може проводитися в координатах α и β .

Зв'язок між параметрами АГ можна знайти зі схеми заміщення на рис. 1.2, в, як це запропоновано В. А. Балагурова, А. А. Кецарісом і В. В. Лохніним. Вважаючи струм $\dot{I}_1$ контурним струмом в первинному колі, а струм $\dot{I}'_2$ контурним струмом у вторинному ланцюзі, згідно методу контурних струмів теорії ланцюгів маємо:

$$\begin{aligned} [R_{BH} + R_1 + j(X_{BH} + X_1 + X_M)]\dot{I}_1 + jX_M\dot{I}'_2 &= 0; \\ jX_M\dot{I}_1 + \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right) + j(X'_2 + X_M) \right]\dot{I}'_2 &= 0. \end{aligned} \quad (1.1)$$

Ця однорідна система має ненульовий розв'язок відносно струмів $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_2'$ за умови:

$$\det \begin{vmatrix} R_{\text{BH}} + R_1 + j(X_{\text{BH}} + X_1 + X_M) & jX_M \\ jX_M & \left[\left(\frac{R'_2}{s} \right) + j(X'_2 + X_M) \right] \end{vmatrix} = 0,$$

звідки після поділу дійсної і уявної частин слід:

$$\left. \begin{aligned} (R'_2/s)(R_{\text{BH}} + R_1) - (X'_2 + X_M)(X_{\text{BH}} + X_1 + X_M) + X_M^2 &= 0; \\ (R'_2/s)(X_{\text{BH}} + X_1 + X_M) + (R_{\text{BH}} + R_1)(X'_2 + X_M) &= 0. \end{aligned} \right\} \quad (1.2)$$

Значить, при роботі АГ із заданою частотою обертання n частота струму f у первинному ланцюзі і відповідно s встановлюються такими, що задовольняється система (1.2) і АГ стійко генерує електричну потужність в навантаження.

Систему, аналогічну (1.2), можна отримати трохи іншим шляхом відповідно до підходу, розвинутому І. М. Постниковим та іншими та який володіє кращою фізичною наочністю. Схема заміщення на рис. 1.2 (б) за допомогою нескладних перетворень приводиться до вигляду, представленому на рис. 1.4. Перетворена схема містить чотири паралельні гілки: дві з активними R'_H і $R'(s)$ та дві з реактивними X'_C і $X'_L(s)$ опорами. Для здійснення режиму незатухаючого резонансу струмів в схемі, очевидно, повинні бути виконані вимоги:

$$R'_H + R'(s) = 0; \quad X'_C + X'_L(s) = 0,$$

які і визначають співвідношення між параметрами АГ при його усталеній роботі.

З проведеного аналізу випливає, що асинхронні генератори допускають відносно просту паралельну роботу на відміну від синхронних генераторів, які потребують при паралельному включенні суворої синхронізації частоти обертання. У паралельно працюючих АГ частоти обертання можуть відрізнятися,

при цьому в загальному ланцюзі статорних обмоток створюється струм такої частоти, яка відповідає резонансу в повному еквіваленті даної схеми, яка включає крім ланцюга навантаження і конденсаторної батареї ланцюги об'єднаних статорних і роторних обмоток генераторів з відповідними активними і реактивними опорами.

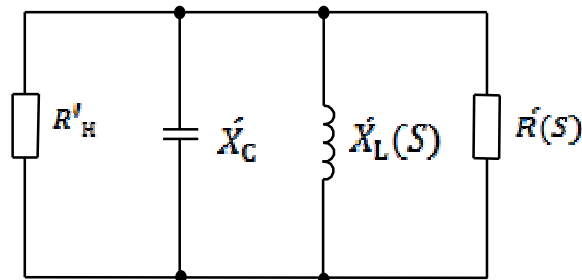


Рисунок 1.4. Модифікація схеми заміщення асинхронного генератора

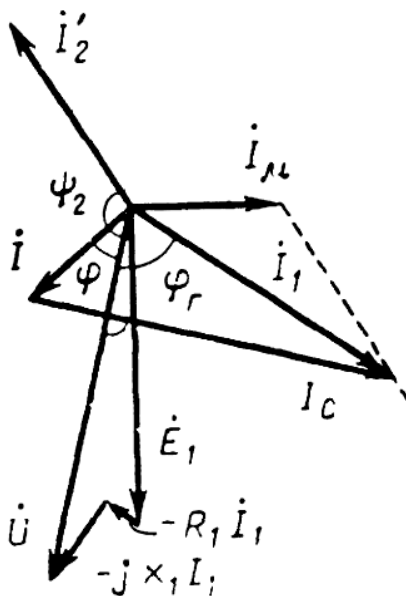


Рисунок 1.5. Векторна діаграма асинхронного генератора із автономним навантаженням

Векторна діаграма автономного АГ показана на рис. 1.5. Наближено вважається, що струм $\dot{I}_\mu$ збігається по фазі з потоком $\dot{\Phi}$ (оскільки $R_M \ll X_M$), ЕРС $\dot{E}_1$ відстає від $\dot{I}_\mu$ на $\pi/2$. Напруга на навантаженні знаходиться по очевидному співвідношенню

$$\dot{U} = \dot{E}_1 - R_1 \dot{I}_1 - jX_1 \dot{I}_1,$$

та струм у навантаженні $\dot{I} = \dot{U}/Z_H$.

Зрушення фаз для векторів $\dot{U}$ і $\dot{I}$ в ланцюзі навантаження позначається через φ , а для векторів $\dot{U}$ і $\dot{I}$ на вихідних затисках АГ - через φ_r . Струм ємності

$\dot{I}_C = \dot{I}_1 - \dot{I}$, причому вектор $\dot{I}_C$ повинен бути перпендикулярний $\dot{U}$. Згідно діаграми на рис. 1.5,

$$I_C = I \sin \varphi + I_1 \sin \varphi_r.$$

Необхідне значення ємності, що забезпечує роботу АГ,

$$C = \frac{I_c}{(2\pi f U)}.$$

Як випливає з (1.2), зміна навантаження $Z_H = R_H + jX_H$ і відповідно параметрів R_{BH} і X_{BH} призводить до зміни ковзання s . Фізично це пов'язано з тим, що збільшення потужності АГ має супроводжуватися посиленням електромагнітної взаємодії між ланцюгами статора і ротора, яке визначається відмінністю частоти обертання магнітного поля n_1 і ротора n .

1.3 Зміна ковзання асинхронних генераторів при роботі на автономне навантаження.

Характерні режими АГ, що забезпечують необхідну зміну ковзання $s = (n_1 - n)/n_1$ може реалізовуватися наступним чином: 1) частота обертання ротора n підтримується постійною, а частота обертання поля n_1 (і відповідно частота струму в ланцюзі статора $f = pn_1/60$) змінюється, зменшуючись з ростом навантаження; 2) при зміні навантаження значення n за допомогою привода змінюється таким чином, що $n_1 = \text{const}$ ($f = \text{const}$), тобто n збільшується лінійно з ростом ковзання $n = (1 - s)n_1$, $s < 0$, а частота струму залишається незмінною.

Для дослідження першого режиму, що має найбільше практичне значення, систему (1.2) потрібно записати в перетвореному вигляді, вводячи замість реактивних опорів відповідно індуктивності і ємність з урахуванням змінної частоти $\omega = 2\pi f$:

$$\begin{aligned} & \frac{R'_2}{s} \left[R_1 + \frac{R_H}{R_H^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_H C - 1)^2} \right] - \\ & - \omega^2 \left\{ (L'_2 + L_M) \left[L_M + L_1 - \frac{R_H^2 C + L_H (\omega^2 L_H C - 1)}{R_H^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_H C - 1)^2} \right] - L_M^2 \right\} = 0; \end{aligned} \quad (1.3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{R'_2}{s} \left[L_1 + L_M - \frac{R_H^2 C + L_H (\omega^2 L_H C - 1)}{R_H^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_H C - 1)^2} \right] + \\ & + (L_M + L'_2) \left[R_1 + \frac{R_H}{R_H^2 \omega^2 C^2 + (\omega^2 L_H C - 1)^2} \right] = 0. \end{aligned}$$

Оскільки $s = (\omega - p\omega_p)/\omega$ (де ω_p - кутова частота обертання ротора), система (1.3) дозволяє визначити для заданих $R_H, R_1, R'_2, L_H, L_1, L'_2, C, \omega_p$ два невідомих ω і L_M , а потім параметри схеми заміщення АГ.

В достатньо потужних АГ ($S \geq 10 \text{ кВ} \cdot \text{А}$), що працюють на активне навантаження ($L_H = 0$), параметри R_1, X_1, X'_2, R_M істотно менші (зазвичай на порядок і більше), ніж $R_H, R'_2/s, X_M$. Тому для наближеного аналізу можна скористатися спрощеною схемою заміщення АГ, отриманої зі схеми на рис. 1.2 (б) при $R_1 = 0, X_1 = 0, X'_2 = 0$. Вона містить ідеальний коливальний контур з індуктивністю намагнічуючого контуру L_M і ємністю C , паралельно якому включено два активних опори R'_2/s і R_H аналогічно схемі на рис. 1.4. При цьому система (1.5) набуває вигляду

$$\frac{R'_2}{sR_H} + \omega^2 L_M C = 0; \quad (1.4)$$

$$\frac{R'_2}{s} R_H^2 C (\omega^2 L_M C - 1) + L_M \left(\frac{R'_2}{s} + R_H \right) = 0,$$

та має рішення $s = -R'_2/R_H, \omega = 1/\sqrt{L_M C}$. Отже,

$$\omega = p\omega_p / (1 + R'_2/R_H), L_M = 1/(\omega^2 C). \quad (1.5)$$

Таким чином, активні опори в схемі заміщення взаємно компенсуються, а в ідеальному LC -контурі виникають незгасаючі коливання з циклічною частотою $\omega = 1/\sqrt{L_M C}$. При холостому ході генератора ($R_H = \infty$) маємо $s = 0$ і $\omega = p\omega_p$, тобто частота струму відповідає механічній частоті обертання ротора і

є максимальною ($\omega = \omega_{\max}$). Напруга холостого ходу U_0 легко знайти по точці А на перетині характеристики х.х. $E_1(I_\mu)$ і променя $U_C = I_C X_C = I_C / (\omega_{\max} C)$, проведеного під кутом $\alpha_{\min} = \arctg(\omega_{\max} C)^{-1}$, причому струм ємності I_C при резонансі дорівнює струму I_μ (рис. 1.6, а). Залежність $E_1(I_\mu) = 4k_B k_0 \omega_1 f \Phi_\delta(I_\mu)$ будується на підставі попереднього розрахунку магнітного кола АГ і побудови магнітної характеристики $B_\delta(I_\mu)$ (або $\Phi_\delta(I_\mu)$) відомими методами (для спрощення приймається $E_{\text{ост}} = 0$). Коли при навантаженні опір R_H зменшується і $|s|$ зростає, частота ω падає, тому крива $E_1(I_\mu)$, побудована для $f = \omega / (2\pi)$, опускається, а промінь U_C повертається до осі ординат, так як збільшується кут α (пунктирні криві $E_1(I_\mu)$ і $U_C(I_\mu)$ на рис. 1,6, а). Точка А зміщується в положення А', яке визначається описуванням графоаналітичним методом, і напруга U' знижується. У міру збільшення струму навантаження намагнічуючий струм I_μ (резонансний струм в LC-контурі) падає (рис. 1.6, а) і відповідно зростає $|\cos \varphi_r|$ (див. рис. 1.5). Очевидно, що в точці А' ступінь насичення сердечника статора зменшується і L_M збільшується, чому відповідає зниження резонансної частоти струму $(1/\sqrt{L_M C})$. При деякому критичному опорі навантаження $R_H = R_{\text{кр}}$ промінь U_C практично збігається з лінійною ділянкою характеристики холостого ходу $E_1(I_\mu)$, напруга швидко знижується і робота АГ стає нестійкою, так як точка А' перетину кривих погано фіксована і різко рухається при невеликих змінах струму. Якщо АГ працює на активно-індуктивне навантаження, характер процесів буде приблизно таким же, але для отримання необхідної напруги ємність C повинна бути збільшена, щоб компенсувати реактивну енергію, яка споживається навантаженням. Роль внутрішніх падінь напруги ($R_1 I_1$, $X_1 I_1$ та ін.) проявляється менш помітніше, чим менше потужність АГ. Як видно з векторної діаграми на рис. 1.5, через ємнісний характер струму ці падіння можуть призводити до зростання U в порівнянні з E_1 в робочих режимах.

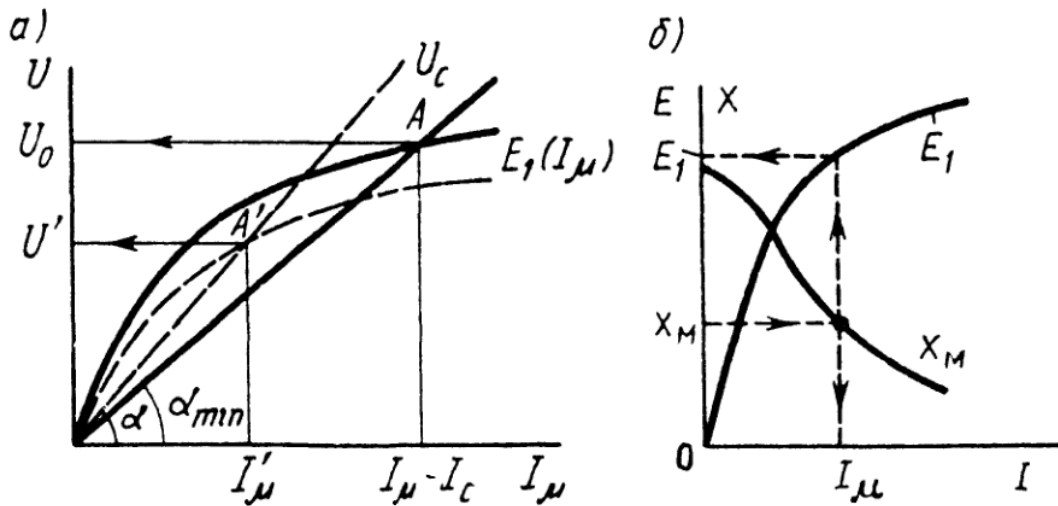


Рисунок 1.6 Характеристика холостого ходу і напруги на ємності (а), залежність $X_M(I_\mu)$ (б) для асинхронного генератора

Для даної спрощеної моделі АГ можна легко побудувати зовнішні характеристики $U(I)$ генератора за допомогою графоаналітичного методу. Задаючись рядом значень R_H для кожного з них знаходимо ω і будемо залежності $E_1(I_\mu)$ і $U_c(I_\mu)$, точка перетину яких дозволяє знайти напругу $U \approx E_1$ і відповідно струм навантаження $I = U/R_H$. Типовий вид зовнішніх характеристик АГ показаний на рис. 1.7.

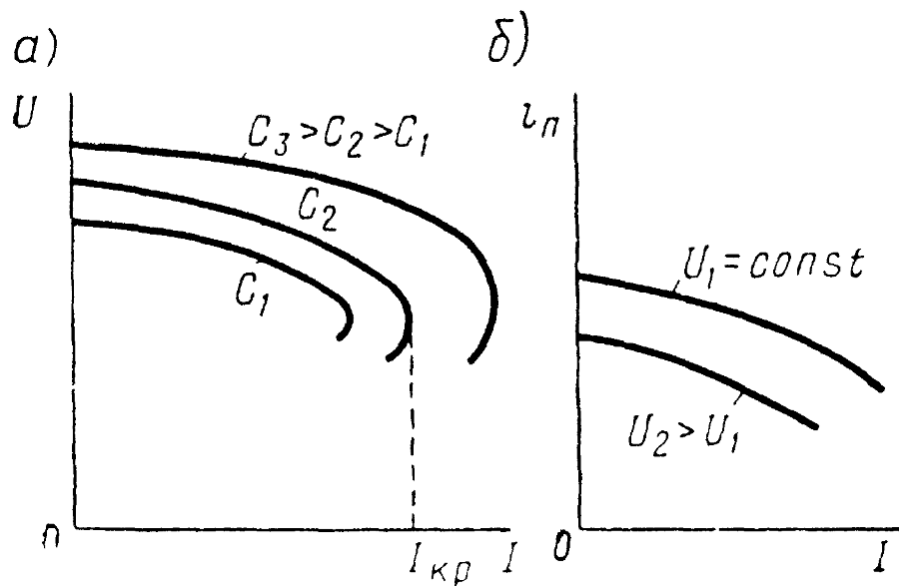


Рисунок 1.7. Зовнішні (а) та регульовальні (б) характеристики асинхронного генератора.

Спочатку з ростом струму напруга змінюється незначно, потім більш різко, а після досягнення критичного значення струму $I_{кр}$, відповідного $R_H = R_{нкр}$, відбувається опрокидування характеристики, яке супроводжується, як правило, нестійкою роботою генератора. Криві $U(I)$ розташовуються тим вище, чим більше ємність C . Зміна напруги з ростом струму якісно відбувається приблизно так само, як в генераторі постійного струму з паралельним збудженням. Нормальній роботі АГ зазвичай відповідає початкова лінійна ділянка кривої $U(I)$. Струм короткого замикання у АГ відносно малий.

При зроблених припущеннях ($R_1 = 0$, $X_1 = 0$, $X'_2 = 0$, $L_H = 0$,) зовнішні характеристики генератора можуть бути описані аналітичними виразами, якщо апроксимувати його магнітну характеристику $B_\delta(I_\mu)$, наприклад, відомою формулою Фрелиха $B_\delta = I_\mu / (a + b I_\mu)$. Тоді ЕРС (напруга) $E_1 \approx U = k \omega B_\delta$, де $k = \sqrt{2} k_0 \omega \tau l / \pi$. З іншого боку, $U = I_\mu X_C = I_\mu / (\omega C)$, звідки маємо $I_\mu = (k \omega^2 C - a) / b$. Струм навантаження $I = U / R_H = k \omega^2 (C - a) / (b \omega C R_H)$. З урахуванням $\omega = p \omega_p / (1 + R'_2 / R_H)$, де $\omega_p = \pi n / 30$, отримаємо

$$I = \frac{k p^2 \omega_p^2 C - a(1 + R'_2 / R_H)^2}{(R_H + R'_2) b p \omega_p C}. \quad (1.6)$$

Формула (1.6) з урахуванням $U = I R_H$ дає аналітичну уяву зовнішньої характеристики АГ, яка будується для ряду поставлених значень R_H . Отримані формули відносяться до достатньо потужних АГ, які працюють при невеликих ковзаннях ($|s| < 0,1$). З (1.6) випливає те, що при зменшенні R_H струм напруги спочатку зростає, а потім починає падати (при $R_H \leq R_{кр}$).

Використовуючи залежність ω від R_H , можна виразити I через ω і знайти $I_{кр}$ з умови $dI/d\omega = 0$, що приводить до кубічного рівняння $k C \omega_{кр}^3 + a \omega_{кр} - 2 a p \omega_p = 0$, де $\omega_{кр}$ відповідає $R_{нкр}$. Значення $\omega_{кр}$ знаходиться за формулою Кардана.

Зміна частоти струму в АГ, що працює з $n = \text{const}$, при зміні навантаження є недоліком, що обмежує його застосування. Для стабілізації частоти в цьому випадку може використовуватися метод під навантаження АГ, коли паралельно з основним опором навантаження $Z_{\text{осн}}$ включається додатковий регульований опір $Z_{\text{рег}}$. При зміні $Z_{\text{осн}}$ система регулювання змінює $Z_{\text{рег}}$ таким чином, що сумарний опір навантаження $Z_{\text{н}}$ в схемі заміщення залишається постійним і параметри АГ не змінюються. Цей спосіб використовується в установках короткочасної дії. Його недолік - погіршені енергетичні показники АГ через втрати в $Z_{\text{рег}}$. Деяке поліпшення регульовальних характеристик АГ з піднавантаженням забезпечується в каскадному АГ, що складається з двох асинхронних машин на одному валу, в яких роторні обмотки замкнуті одне на одну з перехреснуванням фаз (інверсні обмотки), а статорні обмотки включені одна на $Z_{\text{осн}}$, а інша - на $Z_{\text{рег}}$.

Режим роботи АГ зі змінною частотою обертання дозволяє забезпечити сталу частоту струму в напрузі ($n = \text{var}$, $n_1 = \text{const}$, $f = \text{const}$). Такий режим, однак, потребує ускладненого регульованого приводу, а швидкодія регулювання отримується невеликою через великий кінетичний момент ротора АГ і приводу. Побудова зовнішніх характеристик в цьому випадку може проводитися за методом проф. В. А. Балагурова наступним чином. Для заданих параметрів $X_{\text{вн}}$, $R_{\text{вн}}$, X_1 , R_1 , X'_2 , R'_2 з системи (1.2) знаходяться s і $X_{\text{м}}$, які виражаються в явному вигляді

$$s = \frac{R'_2 c}{ab + (a + b)X_{\text{м}}};$$

$$X_{\text{м}} = \frac{-(a^2 + c^2 + 2ab) - \sqrt{(a^2 + c^2)^2 - 4b^2 c^2}}{2(a + b)},$$

де $a = X_{\text{вн}} + X_1$, $b = X'_2$, $c = R_{\text{вн}} + R_1$.

За значенням s знаходиться частота обертання ротора n при заданій частоті струму в опорі. Потім будуються характеристика х. х. $E_1(I_\mu)$ і залежність $X_m(I_\mu) = E_1/I_\mu$ (рис. 1.7, б). Параметр X_m наближено дорівнює головному індуктивному опору X_Γ , визначеного при відповідному коефіцієнті k_μ , який враховує насичення сердечників. За X_m графічним способом знаходяться E_1 і I_μ , після чого будується векторна діаграма і визначаються значення U , I , I_1 , I_c . Ця процедура повторюється для ряду значень R_H і X_H (із збереженням $\cos \varphi = R_H / \sqrt{R_H^2 + X_H^2} = \text{const}$), після чого будується зовнішня характеристика генератора $U(I)$.

1.4 Принципи регулювання і стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора

Регулювання і стабілізація вихідної напруги АГ можуть здійснюватися декількома способами. Один із шляхів вирішення цього завдання пов'язаний з використанням регульованих ємностей для збудження АГ, що дозволяє змінити кут нахилу $\alpha = \arctg(\omega C)^{-1}$ променя $U(I_0)$ (рис. 1.6), змістити точку A та змінювати напругу х. х. U_0 . Коли кут α близький до кута нахилу лінійної частини кривої $U_L(I_0)$, регулювання напруги таким способом стає нестійким, так, як точка A перетину кривих з близькими кутами нахилу погано фіксована.

Більш ефективний спосіб регулювання і стабілізації на-напруги АГ шляхом підмагнічування сталевих сердечників аналогічне тому, як це робиться в машинах з постійними магнітами, що містять на статорі додаткову тороїдальну підмагнічувану обмотку ПО. При зміні постійного струму підмагнічування i_Π змінюється ступінь насичення сердечника статора і відповідно положення кривої $U_L(I_0)$ (рис. 1.6), яка показана пунктиром. Це призводить до зміни положення точки A , тобто напруги холостого ходу і робочої напруги АГ. Зазвичай струм i_Π максимальний при холостому ході і зменшується з ростом струму навантаження I , як впливає з

регулювальної характеристики АГ (див. рис. 1.7, б). Слід зауважити, що при інших рівних умовах необхідна потужність ПО (потужність регулювання) в АГ значно менша, ніж у генераторів з постійними магнітами.

Для регулювання ступеня насичення сталевих сердечників не тільки статора, а й ротора АГ може застосовуватися ПО, активна сторона якої розміщена на валу, як і у генераторів з постійними магнітами. Необхідна МРС підмагнічування в цьому випадку зменшується, а швидкодію регулювання збільшується в порівнянні з випадком, коли використовується тороїдальна ПО на осерді статора. Однак конструкція АГ з ПО на валу ускладнюється.

Питома маса АГ, призначеного для роботи з автономним навантаженням, повинна враховувати масу як власне генератора, так і конденсаторної батареї. Для збудження АГ і компенсації індуктивного коефіцієнта потужності навантаження повна реактивна потужність батареї

$$Q = P_H (\operatorname{tg} \varphi_r + \operatorname{tg} \varphi), \quad (1.7)$$

де P_H - активна потужність навантаження; φ_r і φ показані на рис. 1.5.

Значення реактивної потужності, що витрачається на створення магнітного поля, можна оцінити таким чином. Якщо задана амплітуда B_m індукції в зазорі, то відповідна питома енергія магнітного поля $\omega_m = [1/(2\mu_0)] B_m^2$.

Для повного обсягу зазору V_δ реактивна потужність приблизно буде

$$Q \approx \omega W_m = 2\pi f W_m = (\pi f \mu_0) B_m^2 V_\delta. \quad (1.8)$$

Формула (1.8) не враховує реактивної потужності, витраченої на створення поля в сталевих сердечниках, яка буде мала при ненасиченій сталі. Для АГ потужністю порядку декількох кіловат грубо можна вважати $Q \approx P_H$. Використовувані зазвичай для збудження АГ конденсатори (наприклад, типу К75-10) мають питому масу $m^*_c \approx 0,4 \dots 0,8$ кг / (кВА), причому мінімальні m^*_c реалізуються при частотах $f \approx 1000 \dots 3000$ Гц. Питома маса генератора при поту-

жності від сотень ватів до декількох кіловат $n \geq 12\,000$ об /хв становить $m^*_c \approx 1$ кг / кВт. Таким чином, повна питома маса АГ має порядок $m^*_c = 1,5 \dots 2$ кг / кВт, тобто приблизно така ж, як у БСГ з кігтеподібними полюсами.

Якщо АГ працює на активно-ємнісне навантаження, то окрема батарея конденсаторів для збудження генератора при певних умовах може бути відсутнім, що дозволяє помітно поліпшити масо-габаритні показники установок з АГ. Для створення реактивної потужності, що забезпечує збудження АГ, замість конденсаторів можуть використовуватися керуючі напівпровідникові перетворювачі. Нехай, наприклад, обмотки фаз A, B, C генератора підключені до керованого випрямляча і навантаження (див. Рис. 1.2, б). Якщо за допомогою схеми управління включати вентиля не з відставанням, а з випередженням щодо моменту перетину кривих фазних ЕРС комутуючих вентилів (щоб забезпечити $\alpha < 0$ в порівнянні з режимом, якому відповідав би за умови збереження тривалості періоду включення вентиля (шляхом штучної комутації) струм в кожній фазі зрушиться вперед по відношенню до фазної ЕРС. Для його першої гармоніки, очевидно, $\cos \varphi < 1$ ($\varphi < 0$), тобто виникає той же ефект, що і при використуванні конденсаторів: за рахунок випереджаючого струму створюється реактивна потужність, необхідна для збудження АГ. Такі вентильні АГ мають добрі масо-габаритні показники і регулюючи якості, проте їх електрична схема ускладнюється через необхідність забезпечити штучну комутацію вентилів (їх відключення при прямій напрузі фазних ЕРС).

Інша можливість збудження АГ - підключення його статорної обмотки до інвертору з відповідним кутом $\beta < 0$ і реактивною потужністю $Q \approx mUI \sin(\beta - 0,5\gamma)$. Одна зі схем такого АГ з трифазним мостовим інвертором на тиристорах T , живиться від акумуляторної батареї AB , наведена на рис. 1.8. Можливий режим без AB , коли енергія, необхідна для роботи інвертора, безперервно запасється в ємності C , заряджається через діоди D . Така ємність буде істотно менше, ніж ємність трифазної батареї самозбудження АГ, яка підключається паралельно навантаженням, проте електрична схема АГ при цьому ускладнюється.

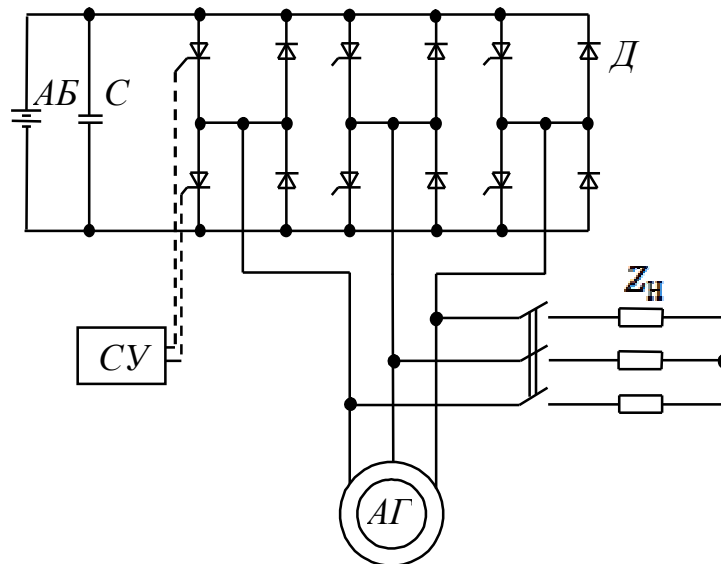


Рисунок 1.8 Схема асинхронного генератора с інвертором

Асинхронні генератори знаходять обмежене застосування в якості відносно малопотужних джерел струму в автономних енергоустановках. Зазвичай вони виконуються як стартер-генератори. При деяких умовах можлива робота в режимі АГ потужних турбогенераторів. Перспективи вдосконалення АГ і їх більш широкого впровадження пов'язані з відзначенням в дійсний час розробкою високоефективних легких конденсаторів.

1.5 Схеми регулювання і стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора

1.5.1 Загальні проблеми регулювання асинхронного генератора

При оцінці загальних показників автономного асинхронного генератора необхідно враховувати суттєві зміни напруги, тобто такі експлуатаційні фактори, як зміна частоти генерованої напруги, яка варіює зі зміною навантаження і ковзання, якщо частота обертання ротора підтримується постійною, а також коливання амплітуди вихідної напруги U , що з'являються внаслідок електричної і магнітної асиметрії ротора.

Пульсації напруги, обумовлені електричною асиметрією, зростають при збільшенні навантаження і можуть бути зведені до мінімуму при якісній залив-

ці короткозамкненою клітки і вибракуванні роторів з дефектами обмотки. Магнітна несиметричність, пов'язана з можливою овальністю пакетів ротора і статора, ексцентриситетом, магнітною анізотропією сердечників, призводить до періодичних змін магнітного опору на шляху основного магнітного ротора і, як наслідок, до коливань вихідної напруги. Усунення овальності і віялова збірка пакета ротора практично повністю виключають цю причину коливань напруги.

При оцінці техніко-економічних показників автономного асинхронного генератора враховується також необхідність в конденсаторній батареї як джерела реактивної потужності для створення магнітного поля і компенсації реактивності навантаження.

Значення реактивної потужності, що витрачається на створення магнітного поля асинхронного генератора з магнітною індукцією в зазорі B_δ , визначається зі співвідношення та може регулюватися або зміною ємності конденсаторів C_k , або ж величиною напруги мережі U_m .

В даний час практичне застосування знаходять конденсатори типу К-71 з поліпшеними масо-габаритними показниками, які мають питому масу 0,3...0,6 кг / кВА. Якщо врахувати, що $\cos\phi$ автономного асинхронного генератора малої і середньої потужності не перевищує 0,7...0,75, то на 1 кВт його активної потужності може припадати приблизно 1 кВА реактивної потужності конденсаторної батареї. Однак величина необхідної ємності залежить також і від частоти f .

Стабілізувати і регулювати вихідну напругу АГ можливо в основному зміною магнітного потоку, що може бути досягнуто:

- - зміною ємності конденсаторів, підключених до обмоток статора або фазного ротора;
- - застосуванням керованих реакторів або нелінійних конденсаторів;
- - зміною напруги на конденсаторах;
- - підмагнічуванням сердечника статора.

При цьому у всіх випадках або за рахунок зміни кута нахилу вольтамперної характеристики ланцюга збудження, або за рахунок зміни насичення магні-

тного кола змінюється положення робочої точки на характеристиці холостого ходу, а значить, і робоча напруга АГ.

1.5.2 Стабілізація напруги підмагнічуванням спинки статора.

Ефект плавного регулювання напруги в асинхронних генераторах при незмінній ємності конденсаторів може бути досягнутий підмагнічуванням спинки статора генератора. Для цієї мети використовується постійний або змінний струм.

Потік підмагнічування замикається по сердечнику статора. Потужність підмагнічування незначна, якщо сталь сердечника не насичена. При роботі генератора з насиченням магнітного ланцюга ця потужність істотно зростає і може досягати 10 відсотків потужності, що розвивається генератором.

Розглянутий спосіб регулювання напруги ґрунтується на зміні ступеня насичення спинки статора. Із зростанням навантаження струм підмагнічування обмотки необхідно зменшувати. Зменшення реактивної провідності намагнічуючого контуру при цьому обмежується настільки, що напруга генератора в певних межах зміни навантаження залишається практично постійною. Принципова схема розташування обмотки підмагнічування постійним струмом наведена на рис. 1.9.

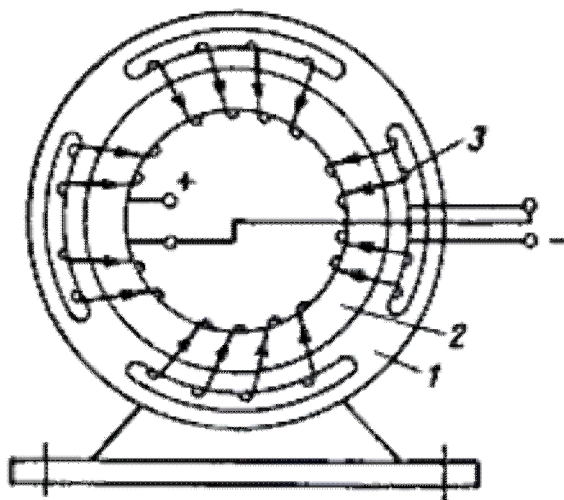


Рисунок 1.9. Принципова схема розташування обмотки підмагнічування спинки статора (1 – корпус машини, 2 – сердечник статора; 3 – обмотка підмагнічування)

Її секції з'єднані між собою так, що результуюча змінна ЕРС обмотки, наведена обертовим магнітним полем, дорівнює нулю.

Для живлення обмотки підмагнічування можливе використання частини трифазного обмотки статора, як показано на рис. 1.10.

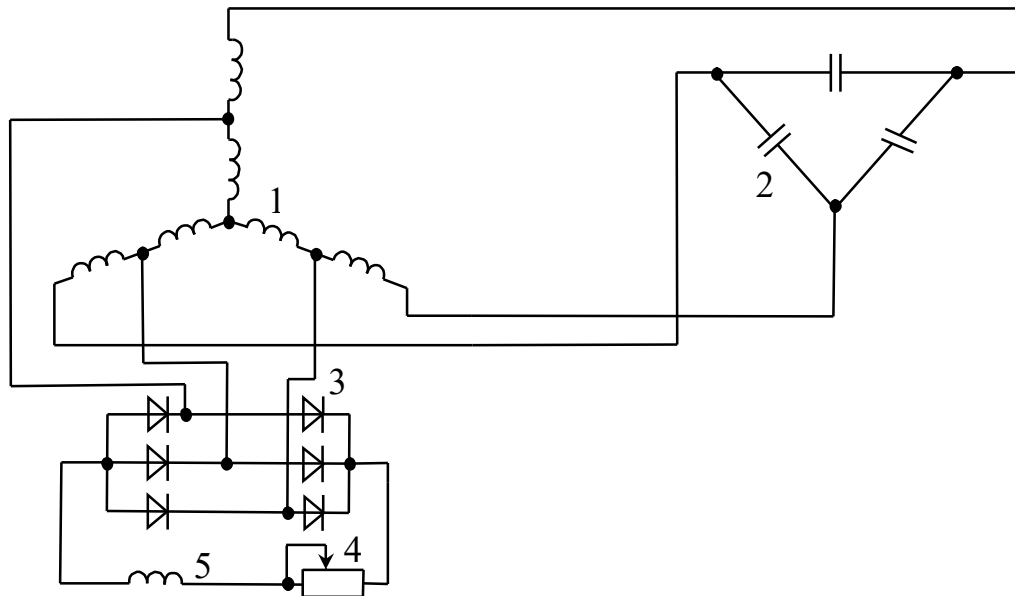


Рисунок 1.10. Схема генератора із обмоткою підмагнічування

(1 – трифазна обмотка статора; 2 – шунтуючі конденсатори; 3 – випрямний міст; 4 – регульований реостат; 5 – обмотка підмагнічування)

Обмотка підмагнічування 5 з'єднана з трифазною обмоткою статора 1 за допомогою мостового випрямляча 3. В її ланцюг включений регульовальний реостат 4. Можливо також застосування декількох обмоток підмагнічування. За однією із запропонованих в Великобританії схем зміна ступеня насичення спинки статора досягається за допомогою двох диференційно діючих обмоток. Струм однією з них пропорційний напрузі, струм іншої дорівнює струму навантаження. Тому зі збільшенням навантаження насичення спинки статора зменшується автоматично.

До недоліків способу відносяться наступні:

- генератор повинен мати спеціальне виконання з додатковими статорними обмотками для підмагнічування;

- стабілізація напруги в широкому діапазоні зміни навантаження не забезпечується.

Надалі будемо розглядати регулювання основного магнітного потоку з метою стабілізації напруги при $n_2 = \text{const}$.

1.5.3. Спосіб стабілізації зміною напруги на конденсаторах.

Якщо в ланцюг конденсаторів, включених на лінійну або фазну напругу, ввести реостат і змінювати його опір, то напруга на конденсаторах стане регульованою (рис. 1.11, а). Очевидно, що з введенням реостата вона зменшується.

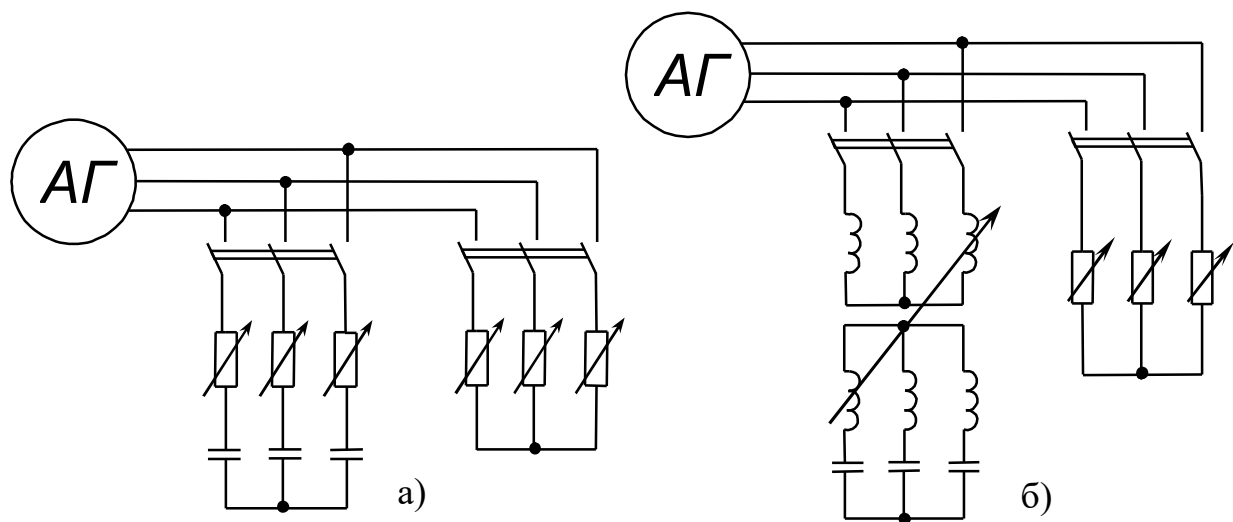


Рисунок. 1.11. Схеми асинхронного генератора з регулюванням напруги на конденсаторах за допомогою:

а) активних опорів; б) трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації.

Регулювання реактивної потужності конденсаторів в необхідних межах за умови підтримки сталості напруги $U_1 = \text{const}$ при $C = \text{const}$ забезпечується відповідним підбором параметрів схеми.

Цього ж результату можна досягти за допомогою трансформатора з регульованим коефіцієнтом трансформації, первинна обмотка якого включена на напругу генератора, а вторинна замкнута на конденсатори (рис. 1.11, б).

До недоліків способу відносяться:

- неекономічність, обумовлена в першому випадку втратами в регулювальних реостатах, у другому - установкою трансформатора, потужність якого порівнянна з потужністю генератора;

- наявність комутаційної апаратури, що ускладнює експлуатацію генераторної установки;

- збільшена ємність при використанні в схемі трансформатора; вона повинна бути достатньою для компенсації реактивної потужності генератора, навантаження (при $\cos \varphi$ більше нуля) і трансформатора.

1.5.4. Стабілізація зміною ємності шунтуючих конденсаторів.

Регулювання основного магнітного потоку зміною ємності шунтуючих конденсаторів в найбільш простому випадку здійснюється за допомогою використання в схемі двох конденсаторних батарей (двоступеневе регулювання).

Схема асинхронного генератора з двоступеневим регулюванням ємності шунтуючих конденсаторів приведена на рис. 17.

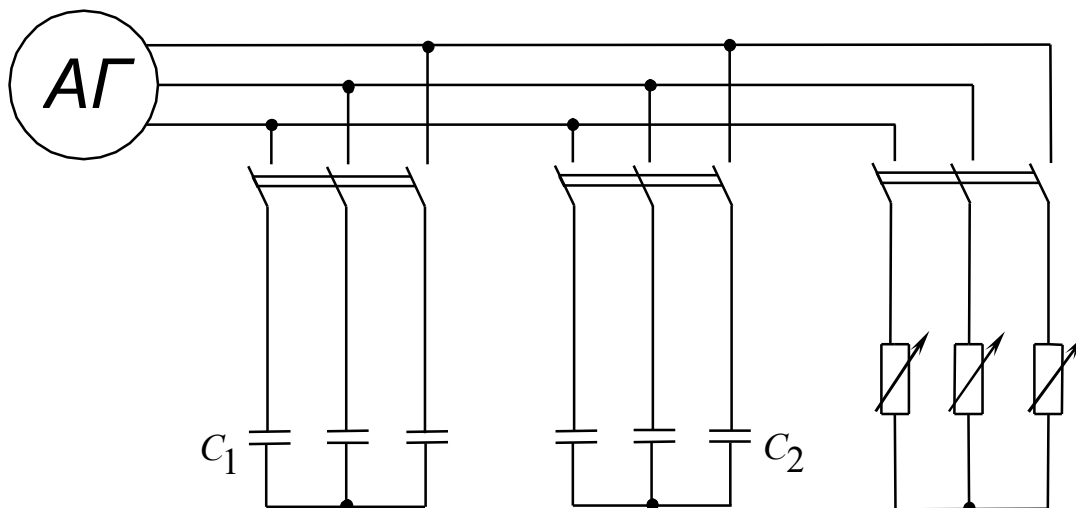


Рисунок 1.12. Схема асинхронного генератора із двоступеневим регулюванням ємності шунтуючих конденсаторів

Батарея конденсаторів з ємністю C_1 включена постійно. Додаткова батарея з ємністю C_2 включається при досягненні певного навантаження. Управління додатковою батареєю конденсаторів може бути автоматизовано.

До недоліків способу відносяться:

- ступінчасте регулювання напруги, що не задовільняє вимозі $U_1 = \text{const}$ при змінному навантаженні;
- наявність комутаційної апаратури, що ускладнює експлуатацію генераторної установки.

1.5.5. Стабілізація напруги в асинхронних генераторах ферорезонансним способом.

Простим автоматично діючим безконтактним пристроєм є ферорезонансний стабілізатор напруги, що представляє собою реактор змінної індуктивності. У поєднанні з батареєю шунтуючих конденсаторів постійної ємності він може забезпечити стабілізацію напруги при зміні навантаження в невеликих межах.

Автономна система генерування трифазного струму з асинхронним генератором, в якій використовується ферорезонансний стабілізатор напруги, наведена на рис. 1.13. Схема налаштовується на резонанс струмів при номінальній напрузі в режимі холостого ходу. Магнітна система стабілізатора напруги знаходиться в стані насичення.

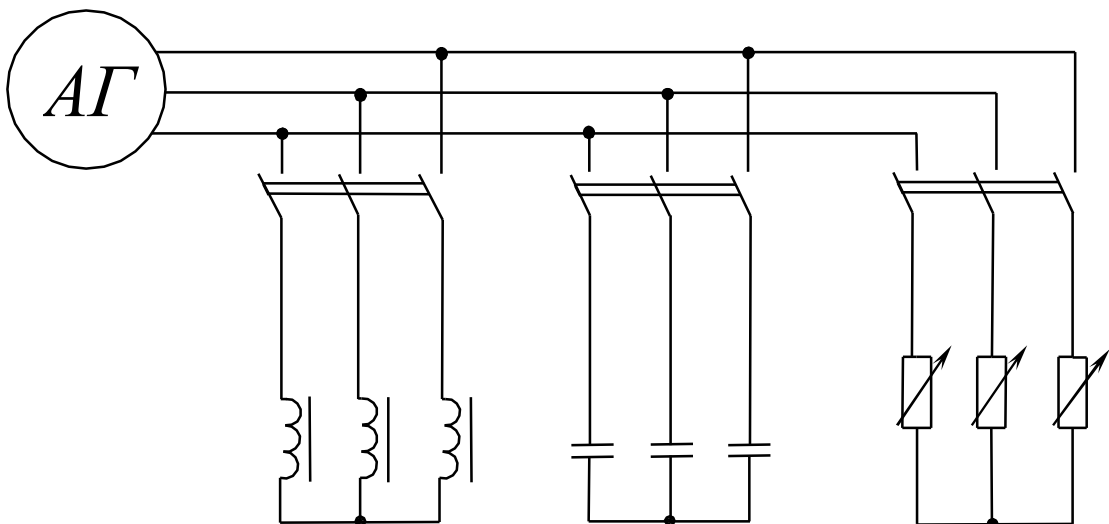


Рисунок 1.13 Схема асинхронного генератора з ферорезонансним стабілізатором напруги

Зменшення напруги на затискачах машини викликає збільшення індуктивного опору реактора внаслідок зменшення насичення його сердечника. Струм реактора обмежується, що призводить до відповідного перерозподілу реактивної потужності конденсаторів в системі. В цьому і полягає ідея застосування ферорезонансного стабілізатора напруги.

До недоліків способу відносяться:

- незначний діапазон регулювання;
- наявність ферорезонансного стабілізатора напруги, що збільшує масу, габарити і вартість генераторної установки.

1.5.6. Спосіб стабілізації керованим реактором.

Безконтактні регулюючі пристрої, що складаються з батареї шунтуючих конденсаторів постійної ємності та керованого реактора, дозволяють здійснити стабілізацію напруги в усьому діапазоні зміни навантаження.

Наведена на рис. 1.14 схема асинхронного генератора з керованим реактором є подальшим розвитком схеми з Ферорезонансним стабілізатором напруги.

У схемі паралельно конденсаторам включені обмотки змінного струму реактора. Для підмагнічування реактора використовуються дві диференційно включені обмотки управління. Струм однією з них (намагнічуючої) пропорційний напрузі на затискачах машини, струм іншої (розмагнічуючий) пропорційний струму навантаження.

При холостому ході генератора, сердечники реактора знаходяться в стані насичення, тому по обмоткам змінного струму реактора протікає максимальний струм. Струм на виході паралельної ланки, утвореної обмотками змінного струму реактора і конденсаторами, має ємнісний характер, і його значення є достатнім для збудження генератора до практично номінальної напруги.

З появою навантаження насичення сердечника реактора обмежується і індуктивний опір обмоток змінного струму зростає. Струм на виході паралельної ланки при цьому збільшується. В результаті напруга генератора підтримується постійною.

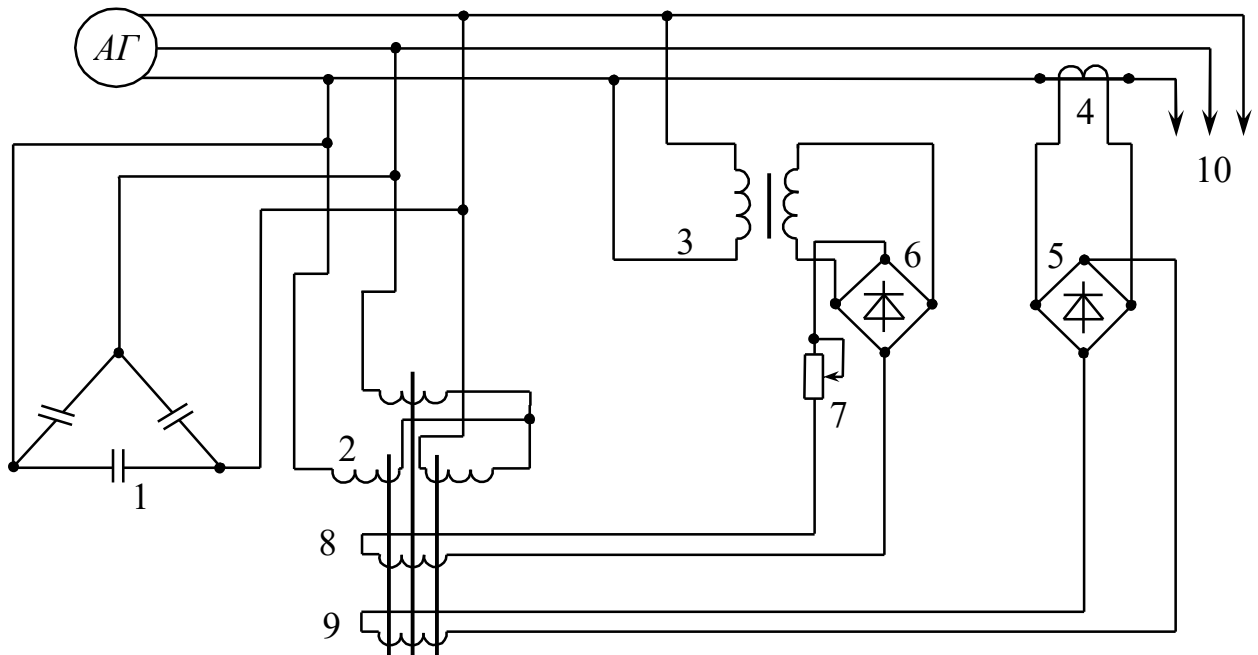


Рисунок 1.14. Схема асинхронного генератора з керованим реактором:

(1 - статичні конденсатори; 2 - обмотки змінного струму реактора;
3 - трансформатор напруги; 4 - трансформатор струму; 5, 6 - випрямлячі;
7 - регулювальний реостат; 8, 9 - обмотки керування; 10 – навантаження).

При деякому певному навантаженні магніторухійні сили (МРС) обмоток управління врівноважуються і по обмоткам змінного струму реактора протікає струм холостого ходу. Струм на виході паралельної ланки (яка має ємнісний характер) досягає свого найбільшого значення.

Для забезпечення можливого короткочасного перевантаження значення струму навантаження, при якому МРС обмоток управління врівноважуються, приймається більшим за номінальний. Необхідна ємність конденсаторів при цьому відповідно збільшується.

Розглянутий пристрій забезпечує плавне, діюче автоматично регулювання еквівалентної ємності конденсаторів в усьому заданому діапазоні зміни навантаження. До її недоліку слід віднести ту обставину, що вона реагує тільки на значення струму навантаження, тобто не є фазочутливою. Більш досконалою є схема, наведена на рис. 1.15. В ній, крім елементів розглянутої вище схеми, використовуються нелінійний вимірювальний елемент (насичений реактор із замкнутим магнітопроводом) і фазочутливий вимірювальний прилад.

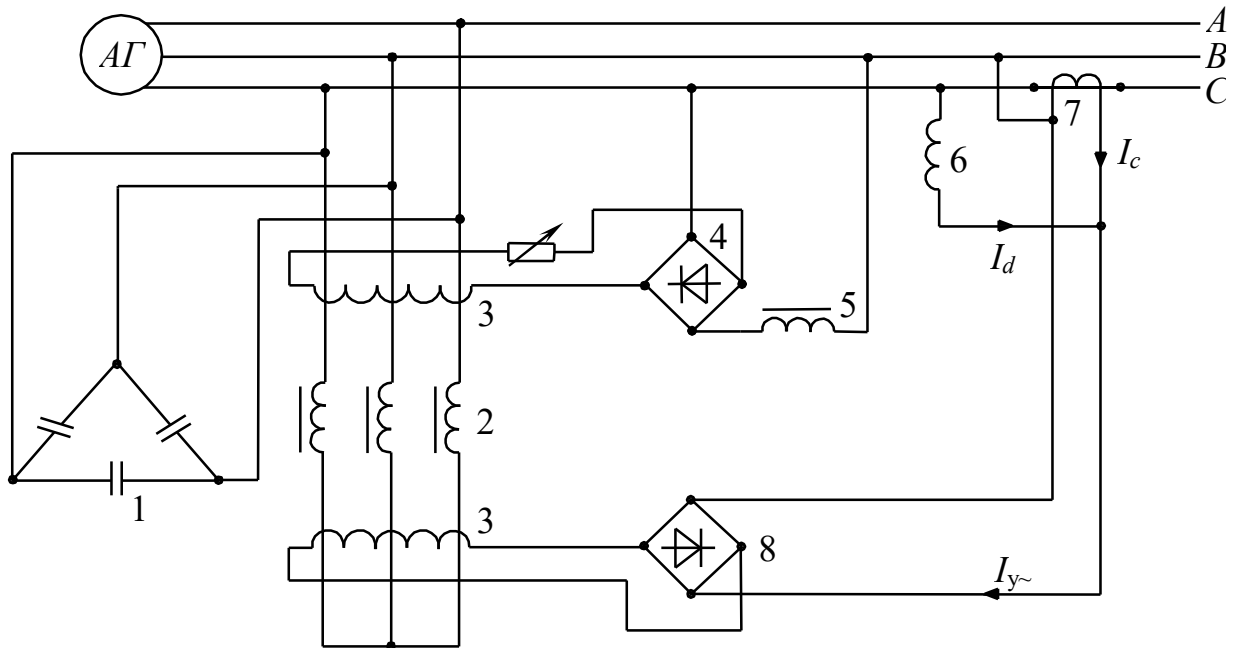


Рисунок 1.15. Схема асинхронного генератора з керованим реактором і фазочутливим вимірювальним приладом:

(1 - статичні конденсатори; 2 - обмотки змінного струму реактора;
3 - обмотки управління; 4, 8 - випрямлячі; 5 - нелінійний вимірювальний
елемент; 6 - лінійний реактор; 7 - трансформатор струму).

Нелінійний вимірювальний елемент 5 включається в ланцюг намагнічуючої обмотки управління. Він збільшує чутливість пристрою до відхилень напруги на затискачах генератора від номінального. Якщо, наприклад, напруга дещо зменшилася, то напруга реактора 5 також зменшиться, а його індуктивний опір зросте. Струм управління намагнічуючої обмотки обмежується тепер з двох причин: внаслідок зниження напруги і збільшення опору кола обмотки. Насичення сердечників реактора 2 зменшується в більшій мірі, ніж без нелінійного елемента 5, що призводить до відповідного зростання ємнісного струму на виході пристрою.

Таким же чином, з перевищенням напруги над номінальним, збільшення струму управління намагнічуючої обмотки викликає не тільки збільшення напруги, але і зменшення опору ланцюга обмотки внаслідок насичення реактора 5.

Фазочутливий прилад виконаний у вигляді поєднання лінійного реактора 6 і трансформатора струму 7. Він реагує на зміну значення і характеру струму навантаження. Зі зміною тільки значення струму навантаження ($\varphi = \text{const}$) дія обох схем (див. рис. 1.14 і рис. 1.15) залишаються аналогічними.

Розглянемо дію фазочутливого приладу при зміні кута зрушення фаз між струмом і напругою навантаження. Вважатимемо, що діючі значення фазних струмів і напруг приймачів залишаються постійними, тобто виконуються умови:

$$I_A = I_B = I_C = \text{const}; U_A = U_B = U_C = \text{const}; \cos \varphi = \text{var},$$

де $I_A, I_B, I_C, U_A, U_B, U_C$ – ток і напруга фаз; φ - кут зсуву між струмом та напругою фази.

Для струму на виході фазочутливого елемента справедливий вираз:

$$I_{\sim} = I_d + I_c,$$

де I_d – струм лінійного реактора; I_c - струм вторинної обмотки трансформатора струму 7. При прийнятих умовах $I_d = \text{const}, I_c = \text{const}$.

У разі активного навантаження (рис. 1.16, а) векторна діаграма струмів фазочутливого приладу приймає вид, наведений на рис. 1.16, г. Струм I_d відстає від напруги U_{BC} по фазі на кут φ_d . Струм I_c знаходиться в протифазі зі струмом первинної обмотки трансформатора струму. Геометрична сума цих струмів визначає струм на виході фазочутливого приладу. Зміна характеру навантаження викликає зміну значення струму $I_{\sim}$. На рис. 1.16, б наведена векторна діаграма струмів і напруг при активно-індуктивному навантаженні з коефіцієнтом потужності $\cos \varphi = 0,8$, а на рис. 1.16, д - векторна діаграма струмів фазочутливого приладу. Як бачимо, зі збільшенням кута зсуву фаз (при φ більше нуля) струм $I_{\sim}$ зростає і при чисто індуктивному навантаженні (рис. 1.16, е) досягає максимального значення. Аналогічним чином можна показати, що при активно-ємнісному навантаженні (φ менше нуля) струм $I_{\sim}$ зменшується.

Розглянута схема відрізняється від попередньої здатністю реагувати на зміну характеру навантаження при більш високій чутливості по напрузі. Заува-

жимо, що спільними недоліками схем асинхронного генератора з керованими реакторами є значна маса і відносно великі габарити реакторів.

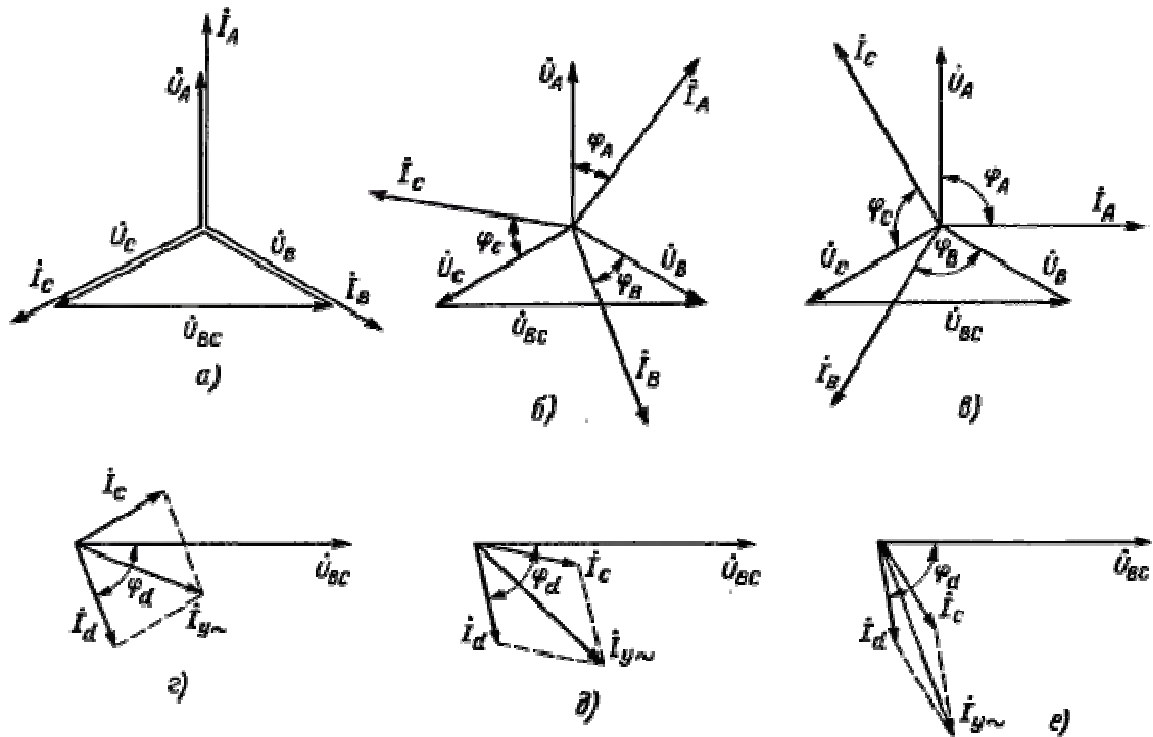


Рисунок 1.16 Векторні діаграми струмів і напруг, що пояснюють принцип дії фазочутливого пристрою:

(а, г - при активному навантаженні; б, д - при активно індуктивному навантаженні; в, е - при індуктивному навантаженні).

1.5.7. Збудження асинхронного генератора від тиристорного джерела реактивної потужності

Схема зі збудженням АГ від тиристорного джерела реактивної потужності, представлена на рис. 1.17. При роботі генератора на трифазний мостовий випрямляч з керованим кутом включення тиристорів останній може бути джерелом реактивного струму збудження асинхронного генератора. Перевагою тиристорного збудження АГ є широкий діапазон частоти обертання генератора, при якому можливе його збудження. Однак форма кривої генеруючої напруги містить великий відсоток вищих гармонік, тому генераторний комплекс має потребу у фільтрах вихідної напруги.

Існує кілька технічних варіантів виконання тиристорного комутатора ємнісного струму. Однак найбільш раціональним є варіант, представлений на рис. 1.17. Така схема характеризується найбільш простими процесами керування і комутації, тому що наявність нульового проводу забезпечує незалежність комутації кожної з фаз АГ. Даний момент можна використовувати в автономних системах електропостачання на базі асинхронного генератора при підключенні різко-перемінного навантаження, зокрема, асинхронних двигунів, для створення умов «сприятливої» комутації.

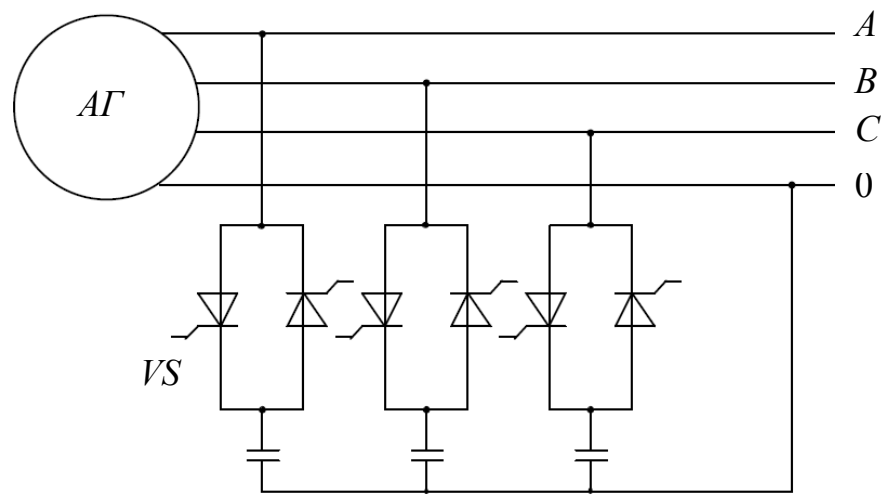


Рисунок 1.17. Асинхронний генератор із тиристорним джерелом реактивної енергії

1.6 Висновки до розділу 1

1.1 Розглянуто роботу асинхронного генератора на мережу великої потужності і на автономне навантаження. Аналіз схем заміщення дозволив визначити, що у генераторному режимі асинхронна машина працює із від'ємним ковзанням та споживає реактивну потужність.

1.2 Від'ємне ковзання створює негативний активний опір у вторинному колі, втрати активної потужності на якому компенсують втрати на активному опорі навантаження.

1.3. Для роботи у режимі генератора асинхронна машина має працювати паралельно із джерелом реактивної потужності, в якості якого може виступати синхронний генератор або конденсаторна батарея. В останньому випадку разом із навантаженням утворюється паралельний резонансний LC -контур, резонансна частота якого і визначає частоту напруги живлення.

1.4. Показано, що при зміні навантаження змінюється індуктивна потужність, що споживається асинхронним генератором та навантаженням. при незмінній реактивній потужності конденсаторних установок це призводить до зміни напруги статора як по амплітуді так і по частоті. С цього зроблений висновок про необхідність регулювати потужність, що генерується ємнісною установкою.

1.5. Для регулювання і стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора розглянуті схеми: з інвертором; із підмагнічування постійним струмом спинки статора генератора; із конденсаторною установкою, що підключена до генератора через трансформатор зі змінним коефіцієнтом трансформації; із двоступеневим регулюванням ємності шунтуючих конденсаторів; із ферорезонансним стабілізатором напруги, яка налаштовується на резонанс струмів при номінальній напрузі в режимі холостого ходу; із керованим реактором; із тиристорним джерелом реактивної потужності.

1.6. Аналіз технічних показників схем дозволяє говорити про доцільність використання у схемі стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора регульованого реактору, який має менші викривлення у струмі статора генератора по відношенню до тиристорних систем та плавне регулювання напруги у широкому діапазоні по відношенню до інших систем.

РОЗДІЛ 2.

КОНСТРУКЦІЯ ТА МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС РЕАКТОРА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ ІЗ ПРОСТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ РЕАКТИВНОЇ ПОТУЖНОСТІ КОНДЕНСАТОРНОЇ УСТАНОВКИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1. Реактор трансформаторного типу як елемент електромеханічної системи із регульованою реактивної потужності

В енергосистемах знаходять застосування шунтуючі реактори для компенсації зарядної потужності ліній, реактори у складі фільтрів для зменшення амплітуд вищих гармонік, реактори для регулювання ємнісної потужності конденсаторних батарей з метою ємнісного збудження і стабілізації напруги асинхронних генераторів. При зміні режимів роботи і конфігурації енергосистеми відповідним чином повинні змінюватися і індуктивні опору реакторів.

Перші спроби створення реакторів зі змінними параметрами були зроблені ще в 30-ті роки [24]. Для зміни індуктивності реактора використовувалося переміщення сталевго сердечника реактора. При його наявності всередині котушки (обмотки) індуктивність реактора велика. При відсутності сердечника індуктивність реактора значно менше.

Тому, пересуваючи сталевий стрижень щодо обмотки, можна забезпечити зміну індуктивності реактора в широких межах. Однак механічне переміщення сердечника займає багато часу. Тому такого типу реактори застосовуються практично тільки в спеціальних випробувальних установках.

Значним проривом на шляху створення керованих реакторів було створено фірмою BBC в 1979 році керованого реактора трансформаторного типу на 750 кВ, 450 МВАр по-фазного виконання (по 150 МВАр в кожній фазі). Кожна фаза реактора містить замкнутий магнітопровід з зазорами в стрижні і три обмотки: мережеву (зовнішню), постійно підключену до мережі вищої напруги, обмотку управління (внутрішню), замкнуту тиристорним блоком, і компенсаційну обмо-

тку, призначену для компенсації третьої гармоніки в струмі реактора. З цією метою компенсаційні обмотки трьох фаз з'єднані в трикутник (см. рис.2.1).

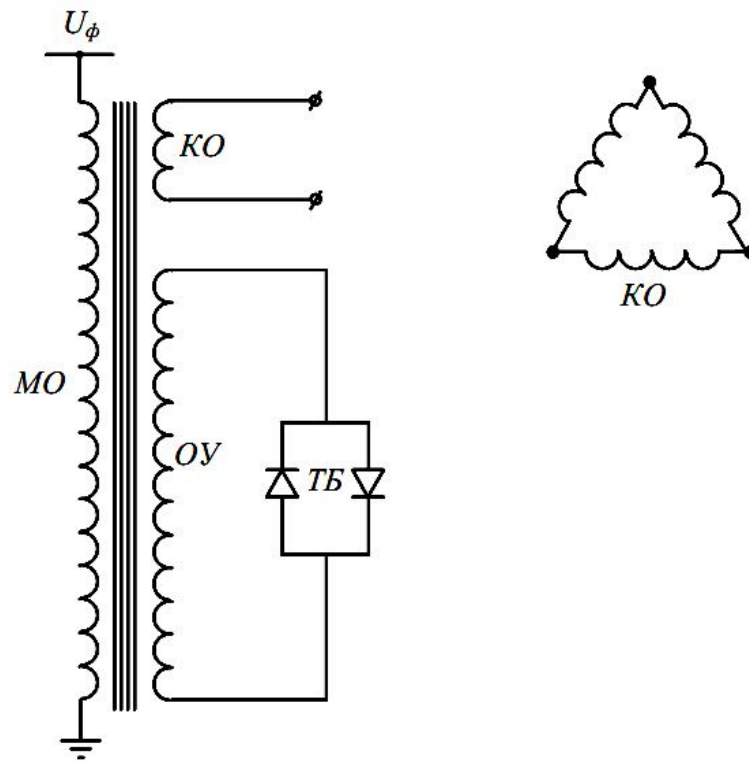


Рис.2.1. Принципова схема керованого реактора трансформаторного типу виробництва ВВС.

Цей реактор був встановлений в системі Гідро-Квебек (Канада) і експлуатується до теперішнього часу. Його перевагою є великий діапазон і простота регулювання струму, а також і безінерційне регулювання.

На жаль, реактор був створений без належної теоретичної підготовки. Його конструкція повторювала звичайну конструкцію трансформатора без будь-яких принципових змін. Це призвело до підвищених втрат в реакторі, які приблизно в 5 разів перевищували втрати в обмотках (2% від номінальної потужності в номінальному режимі). Не були прийняті заходи і для придушення вищих гармонік в струмі реактора, викликані роботою тиристорів. В результаті вміст вищих гармонік в струмі реактора склав 6% від номінального струму. Останній недолік вдалося подолати установкою фільтрів на стороні високої напруги, що значно знижує надійність роботи реактора і ускладнює його експлуатацію (тому що конденсатори фільтрів періодично пошкоджуються).

По викладеним причин фірма (BBC) припинила подальші поставки керованих реакторів і більш того повністю припинила всі розробки в цьому напрямі.

Невдача фірми BBC створення керованого реактора трансформаторного типу підштовхнула розвиток іншого напрямку - так званих насичувальних реакторів, де зміна індуктивності реактора відбувається через насичення сталі сердечника і відповідно витіснення магнітного потоку з сердечника. Принцип управління характеристиками реактора шляхом штучного підмагнічування сталі (принцип магнітного підсилювача) був реалізований в ряді проектів керованих реакторів. Конструкція цих реакторів значно складніше і дорожче реакторів трансформаторного типу, але система управління таких реакторів дешевше. В результаті вартість цих двох типів реакторів виявляється приблизно однаковою. Втрати потужності в три-чотири рази менше, ніж у реактора фірми BBC, а вміст вищих гармонійних у насичувальних реакторів таке ж, як у реактора фірми BBC. Великим недоліком реактора, керованого підмагнічуванням, є надзвичайно великий час відгуку - кілька секунд без прийняття спеціальних заходів. Ці заходи (форсування потужності реактора) вимагають додаткових витрат. З усіх цих причин керовані підмагнічуванням реактори не отримали широкого застосування, незважаючи на інтенсивну рекламу.

Подальший розвиток конструкції керованого реактора трансформаторного типу став можливий на основі ретельного аналізу фізичних процесів в них. В результаті такого аналізу вдалося встановити причини недоліків реакторів BBC і знайти способи їх подолання.

Перша модель керованого реактора трансформаторного типу УШРТ вдосконаленої конструкції була створена на кафедрі електричних і електронних апаратів Санкт-Петербурзького Державного Політехнічного Університету (СПбДПУ). Незважаючи на малу потужність (10 кВ, 100 кВАр) вона дозволила підтвердити можливість створення реакторів з прийнятними характеристиками, а також внести необхідні поправки в розрахункові формули.

Наступний етап нового напрямку розвитку УШРТ відбувся в Індії в компанії BHEL з ініціативи великого фахівця в області трансформаторобудування

V.K.Lakhiani. В результаті співпраці СПбДПУ і ВHEL був створений трифазний реактор 11 кВ, 2 МВАр. Випробування цього реактора повністю підтвердили справедливості теоретичних розробок. Втрати потужності в ньому трохи перевищують втрати в обмотках, а зміст вищих гармонійних не перевищує 2% від номінального струму.

Успішний результат цього етапу розвитку УШРТ дозволив перейти до наступного етапу: створення промислового зразка УШРТ 400 кВ, 50 МВАр. Виробництво цього реактора було завершено в середині 2001 року, а його офіційний пуск в експлуатацію відбувся на початку листопада того ж року. З тих пір реактор успішно експлуатується на проміжній підстанції лінії 400 кВ поблизу м.Ітарсі в Центральній Індії.

Розглянемо можливість використання статичного індукційного перетворювача трансреакторного типу для регулювання реактивної потужності індуктивного характеру. У загальному випадку конструкція такого перетворювача складається з первинної і вторинної обмотки, розташованих на одному сердечнику, а також додаткової вторинної обмотки, відділеної від основних обмоток магнітним шунтом, що регулює частину магнітного потоку, що протікає через неї. Додаткові й основна вторинні обмотки з'єднуються послідовно, що дозволяє при зміні магнітних характеристик шунта (наприклад, шляхом підмагнічування) регулювати вихідну напругу. При цьому міняється і реактивний опір трансреактора за рахунок збільшення потоків розсіювання і зменшення коефіцієнта взаємоіндукції між обмотками. Таким чином, якщо послідовно з'єднані вторинні обмотки замкнути, одержимо регульоване джерело реактивної потужності.

Для аналізу в першому наближенні електричних властивостей конструкції, приймемо наступні положення:

а) активні опори обмоток вважаємо зневажливо малими в порівнянні з індуктивними і приймаємо їх рівними нулеві;

б) коефіцієнт взаємоіндукції між основними обмотками вважаємо величиною постійною і не залежною від магнітного стану шунта;

в) коефіцієнти взаємоіндукцій між додатковою обмоткою й основними обмотками залежать тільки від магнітного опору шунта;

г) повні індуктивні опори обмоток при зміні магнітного опору шунта залишаються постійними.

Тоді для схеми заміщення, представленій на рис 2.2, можна записати наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= j\omega L_1 \dot{I}_1 - j\omega(M_{12} + M_{13})\dot{I}_2; \\ 0 &= j\omega L_2 \dot{I}_2 + j\omega L_3 \dot{I}_2 + 2j\omega M_{23} \dot{I}_2 - j\omega(M_{12} + M_{13})\dot{I}_1, \end{aligned} \right\}$$

де L_1, L_2, L_3 – повні індуктивності основної первинної, основної і додаткової вторинних обмоток відповідно; M_{12}, M_{13}, M_{22} – взаємні індуктивності обмоток; C – ємність конденсаторної установки; I_1, I_2 – струми в первинній і вторинній обмотках відповідно; U_1 – фазна напруга на первинній обмотці; $\omega = 2\pi f$; f – частота напруги.

Розв'яжемо систему рівнянь щодо струмів:

$$\begin{aligned} \dot{I}_1 &= \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1 - \frac{j\omega^2(M_{12} + M_{13})^2}{\omega L_2 + \omega L_3 + 2\omega M_{23}}} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} k_{1i}; \\ k_{1i} &= \frac{1}{1 - \frac{(M_{12} + M_{13})^2}{(L_2 + L_3 + 2M_{23})L_1}}; \\ \dot{I}_2 &= \frac{\dot{U}_1 \omega(M_{12} + M_{13})}{j\omega L_1 \left(\omega L_2 + \omega L_3 + 2\omega M_{23} - \frac{1}{\omega C} \right) - j\omega^2(M_{12} + M_{13})^2} = \frac{\dot{U}_1}{j\omega L_1} k_{2i}; \\ k_{2i} &= \frac{(M_{12} + M_{13})}{(L_2 + L_3 + 2M_{23}) - \frac{(M_{12} + M_{13})^2}{L_1}}, \end{aligned}$$

де k_{1i} і k_{2i} – безрозмірні коефіцієнти зміни струмів у первинному і вторинному ланцюзі відповідно.

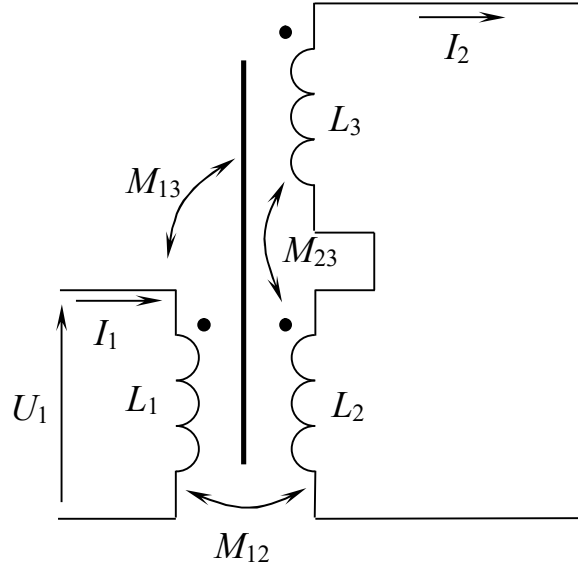


Рисунок 2.2 Схема заміщення трансреактора

Тоді реактивна потужність установки і напруга на додатковій вторинній обмотці:

$$Q_1 = \frac{3j\dot{U}_1^2}{\omega L_1} k_{1Q}; \quad k_{1Q} = k_{1i} = \frac{1}{1 - \frac{(M_{12} + M_{13})^2}{(L_2 + L_3 + 2M_{23})L_1}} \quad (2.1)$$

$$\dot{U}_2 = \frac{\dot{U}_1}{\omega L_1} k_{2i} (\omega L_3 + \omega M_{23}) - \frac{\dot{U}_1}{\omega L_1} k_{1i} \omega M_{13} = \dot{U}_1 k_{3u}; \quad (2.2)$$

$$k_{3u} = k_{2i} \frac{(L_3 + M_{23})}{L_1} - k_{1i} \frac{M_{13}}{L_1}, \quad (2.3)$$

де k_{1Q} і k_{3u} – безрозмірні коефіцієнти зміни реактивної потужності, споживаної з мережі, і зміни напруги на додатковій вторинній обмотці.

Введемо наступні позначення

$$L_1 = L_{2\Sigma} (w_1/w_{2\Sigma})^2 = L_{2\Sigma} k_{\text{тр}}^2; \quad L_3 = L_{2\Sigma} \cdot x^2; \quad L_2 = L_{2\Sigma} \cdot (1-x)^2;$$

$$M_{12} = \sqrt{(1-\sigma_{12})L_1L_2} = \sqrt{(1-\sigma_{12})L_1L_{2\Sigma}} \cdot (1-x);$$

$$M_{13} = \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})L_1L_3} = \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})L_1L_{2\Sigma}} \cdot x;$$

$$M_{23} = \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{\text{ш}})L_2L_3} = \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{\text{ш}})L_{2\Sigma}} x(1-x),$$

де w_1 і $w_{2\Sigma}$ – кількість витків у первинній і сумарно у вторинних обмотках відповідно; $k_{\text{тр}}$ – коефіцієнт трансформації без урахування впливу магнітного шунта; $L_{2\Sigma}$ – сумарна індуктивність основної і додаткової вторинних обмоток при відсутності шунта; x – співвідношення витків додаткової вторинної обмотки і сумарних витків вторинних обмоток; σ_{12} , σ_{13} , σ_{23} – коефіцієнти електромагнітного розсіювання між відповідними парами обмоток при відсутності шунта; $\sigma_{\text{ш}}$ – коефіцієнт електромагнітного розсіювання, обумовлений дією магнітного шунта.

Виходячи з представлених виразів, напруга на додатковій вторинній обмотці, як і реактивна потужність, споживана з мережі, є функціями двох перемінних: співвідношення витків x і коефіцієнта розсіювання $\sigma_{\text{ш}}$:

$$k_{1Q} = k_{1i} = \frac{1}{1 - \frac{(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) + \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})} \cdot x)^2}{((1-x)^2 + x^2 + 2\sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{\text{ш}})} x(1-x))}}; \quad (2.4)$$

$$k_{2i} = \frac{(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) + \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})} \cdot x) k_{\text{тр}}}{\left(((1-x)^2 + x^2 + 2\sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{\text{ш}})} x(1-x)) - \left(\sqrt{(1-\sigma_{12})} \cdot (1-x) + \sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})} \cdot x \right)^2 \right)};$$

$$k_{3u} = k_{2i} \frac{(x^2 + \sqrt{(1-\sigma_{23}-\sigma_{\text{ш}})} x(1-x))}{k_{\text{тр}}^2} - k_{1i} \frac{\sqrt{(1-\sigma_{13}-\sigma_{\text{ш}})} \cdot x}{k_{\text{тр}}}. \quad (2.5)$$

Для проведення чисельного аналізу прийmemo наступні параметри:

$$\sigma_{12} = \sigma_{13} = \sigma_{23} = 0,001; k_{\text{тр}} = 1.$$

Графіки залежностей, розрахованих по формулах (2.4) і (2.5), представлені на рис.2.3.

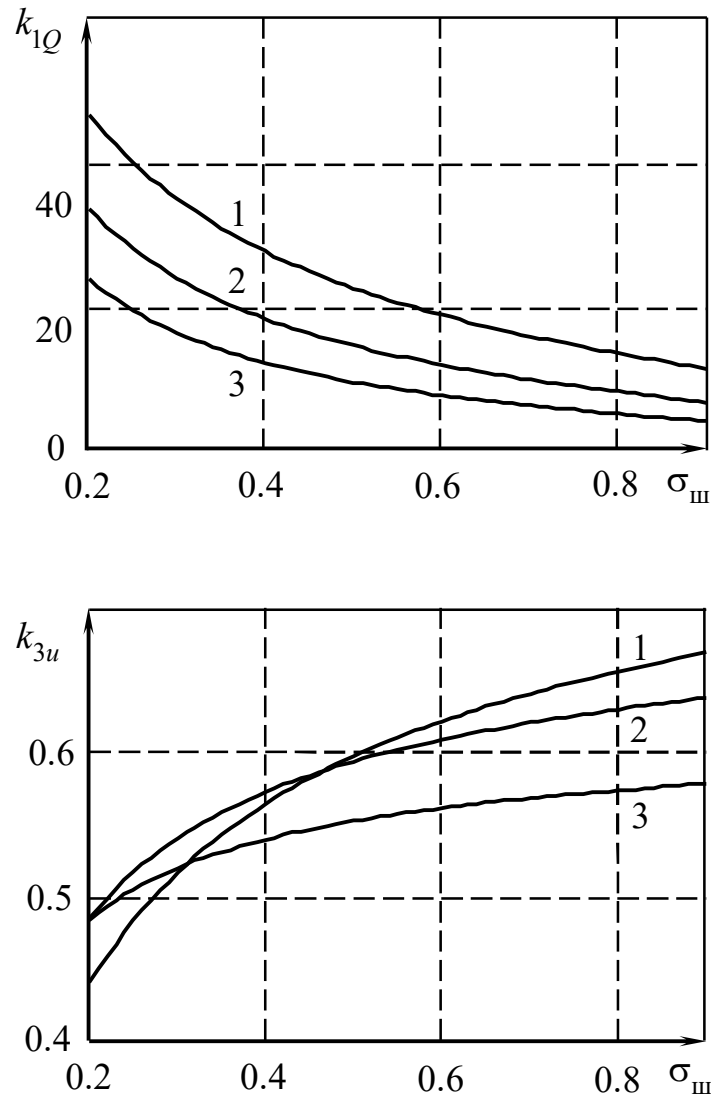


Рисунок 2.3 Залежність безрозмірних коефіцієнтів зміни реактивної потужності k_{1Q} і напруги на додатковій вторинній обмотці k_{3u} від коефіцієнта розсіювання σ_{III} ($1 - x = 0,25$; $2 - x = 0,32$; $3 - x = 0,4$).

З формули (2.1) видно, що для визначення споживаної реактивної потужності коефіцієнт k_{1Q} помножується на реактивну потужність, що споживає трансреактор у режимі холостого ходу, тобто при розімкненому вторинному ланцюзі. Для трансформаторів струм холостого ходу, а значить і з достатнім ступенем точності споживана реактивна потужність, зазвичай складає 2,5...4,5% від номінальних параметрів. Таким чином, граничне значення коефіцієнта $k_{1Q} = 40 \dots 22,5$. З рис. 2.3 видно, що при $x = 0,4$ параметр k_{1Q} змінюється в

межах 4,4...24, а при $x = 0,32$ – у межах 7...34. Тобто кратність регулювання складає 4,8...5,4 рази, що є задовільним для задач регулювання реактивної потужності.

2.2. Вибір конструкції реактора трансформаторного типу із просторовим магнітопроводом

Розглянута у пункті 2.1 конструкція керованого реактора трансформаторного типу є планарною. Але більш кращі масогабаритні та енергетичні показники мають просторові магнітні системи. Крім того, наша конструкція має містити шунт, що розділяє вторинну обмотку на дві частини та регулює величину магнітного потоку через додаткову вторинну обмотку. Таким чином, вторинна обмотка завжди замкнута накоротко і не комутується тиристорним блоком, що значно зменшує величину вищих гармонік у струмі реактора. Розглянемо декілька конструкцій регульованих трансформаторів просторової конструкції, які відповідають нашим уявленням про реактор трансформаторного типу.

Відома конструкція [38], в якій сердечники керованих ярем, що мають форму замкнутого багатокутника, виконані розщепленими, а на кожній розщепленій частині розташовані котушки обмоток підмагнічування. Котушки обмоток підмагнічування з'єднані так, що магнітні поля створюються постійним струмом в розщеплених частинах, спрямовані зустрічно.

Таке виконання сердечників керованих ярем та послідовно зустрічну з'єднання котушок обмоток підмагнічування розщеплених частин повністю придушує парні гармоніки на виході трансформатора, регульованого магнітною комутацією. Отже, коефіцієнт не лінійних спотворень вторинної напруги знижується до мінімуму. Так, коефіцієнт нелінійних спотворень у пропонованого трансформатора не перевищує 2,5-3%.

На рис.2.4 показаний пропонований трифазний симетричний регульований магнітною комутацією трансформатор; на рис.2.5 - електрична схема описуваного трансформатора.

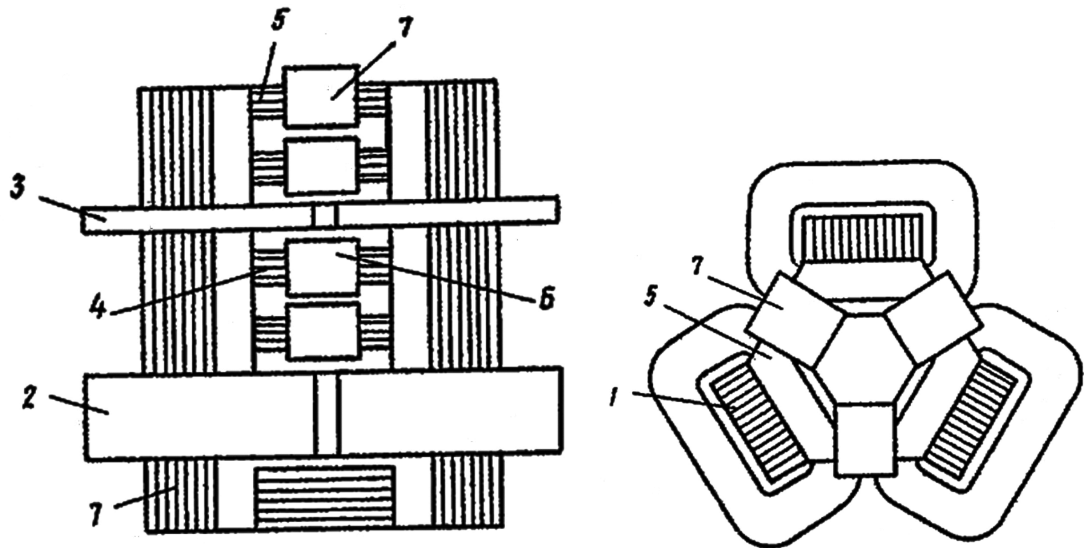


Рисунок 2.4 Трифазний симетричний регульований магнітною комутацією трансформатор

Трансформатор має три симетрично розташованих стрижня 1 з обмотками. Первинна обмотка розташована в нижньому вікні, Вторинна обмотка розділена на дві частини. Основна частина 2 (60-70%) вторинної обмотки розташована в нижньому вікні, а інша частина 3 вторинної обмотки (30-40%) розташована в верхньому вікні, утвореному середнім 4 і верхнім 5 керованими ярами. Нижня частина 2 вторинної обмотки включена послідовно з верхньою частиною 3.

Середнє і верхнє керовані яра утворюють окремо замкнуті магнітні ланцюги.

Сердечники керованих ярів 4 і 5 виконані розщепленими на дві частини. На кожному керованому ярмі розташовані обмотки підмагнічування: 6-обмотка підмагнічування середнього яра, 7-обмотка підмагнічування верхнього яра. Кожна обмотка підмагнічування складається з шести котушок по три котушки на одній розщепленій частині яра. Котушки обмотки підмагнічування керованого яра з'єднані між собою послідовно-зустрічно так, що магнітні поля, що створюється постійним струмом в розщеплених частинах, орієнтовані зустрічно, як показано на рис.2.5. Симетричне розташування котушок обмоток підмагнічування і їх послідовно-зустрічне з'єднання повністю компенсує наводимо в них ЕРС основної частоти.

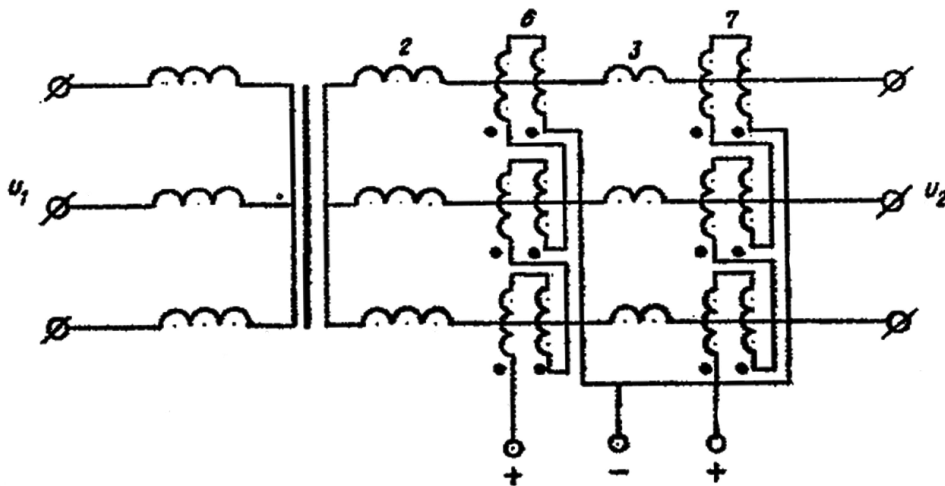


Рисунок 2.5 Електрична схема трифазного симетричного регульованого магнітною комутацією трансформатора

Процес регулювання трансформатора полягає в поступовому плавному введенні або виключенні з контуру потоку холостого ходу витків частини 3 вторинної обмотки верхнього вікна. Введення або виключення витків верхнього вікна здійснюється зміною магнітної провідності ярем шляхом підмагнічуванням їх постійним струмом. Підмагнічуючи, наприклад, середнє ядро 4, потік холостого ходу витісняється з нього в верхнє ядро 5, збільшується потокозчеплення витків верхнього вікна, вихідна напруга при згодному включенні витків верхнього вікна з витками нижньої вікна збільшується. При підмагнічуванні верхнього ядра 5 потік холостого ходу витісняється в середнє ядро 4, потокозчеплення витків верхнього вікна зменшується, напруга на виході трансформатора відповідно зменшується.

Умови намагнічування обох частин сердечника керованого ядра відрізняються тільки полярністю (знаком) постійної складової магнітного поля, при цьому змінюється фаза парних гармонік на 180° . Розщеплені частини керованого ядра тут обтікають змінними і зустрічно спрямованими постійними магнітними потоками, а сума миттєвих значень індукції не містить парних гармонік.

Звідси випливає, що ЕРС, що наводиться в витках верхнього вікна, при відсутності парних гармонік в змінному магнітному потоці, створюваному первинною обмоткою, що знаходиться в нижній частині, не може містити парних гармонік.

Форма кривої вторинної напруги в запропонованій конструкції трансформатора при синусоїдальній напрузі мережі синусоїдальна. Коефіцієнт нелінійних спотворень практично рівний коефіцієнту нелінійних спотворень мережі. Пропонований трансформатор може бути виконаний за автотрансформаторною схемою.

Відома конструкція трансформатора [37], яка відрізняється тим, що вона забезпечена обмотками підмагнічування, розташованими по осі симетрії трансформатора (рис. 2.6).

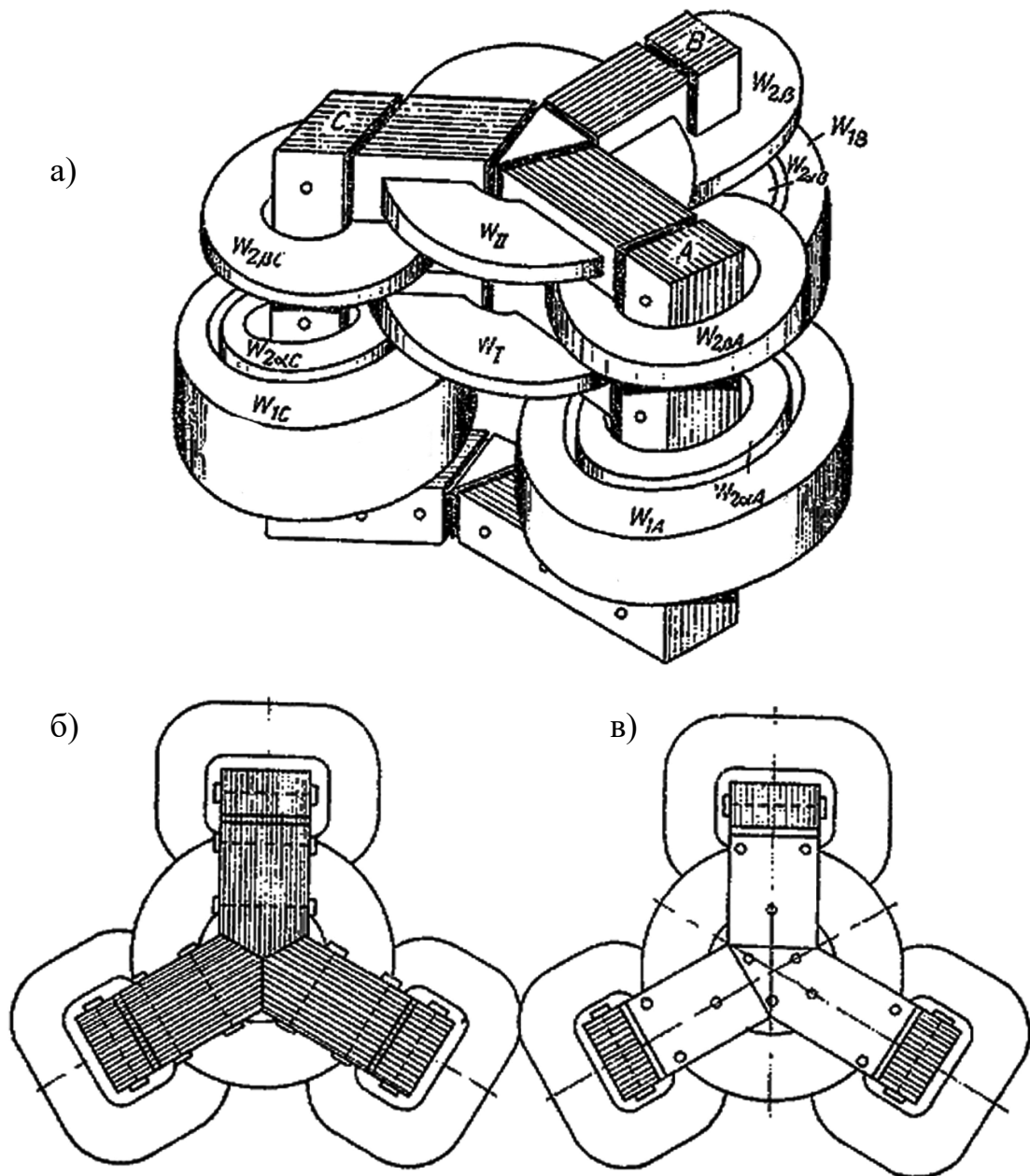


Рисунок 2.6. Конструкція регульованого трансформатора із обмотками підмагнічування, розташованими по осі симетрії.

Таке виконання пристрою дозволяє спростити конструкцію трансформатора.

На рисунку 2.6 зображений пропонований трансформатор, що складається з трьох симетрично розташованих стрижнів, загальний вигляд і вид зверху; на рисунку 2.7 - розташування обмоток.

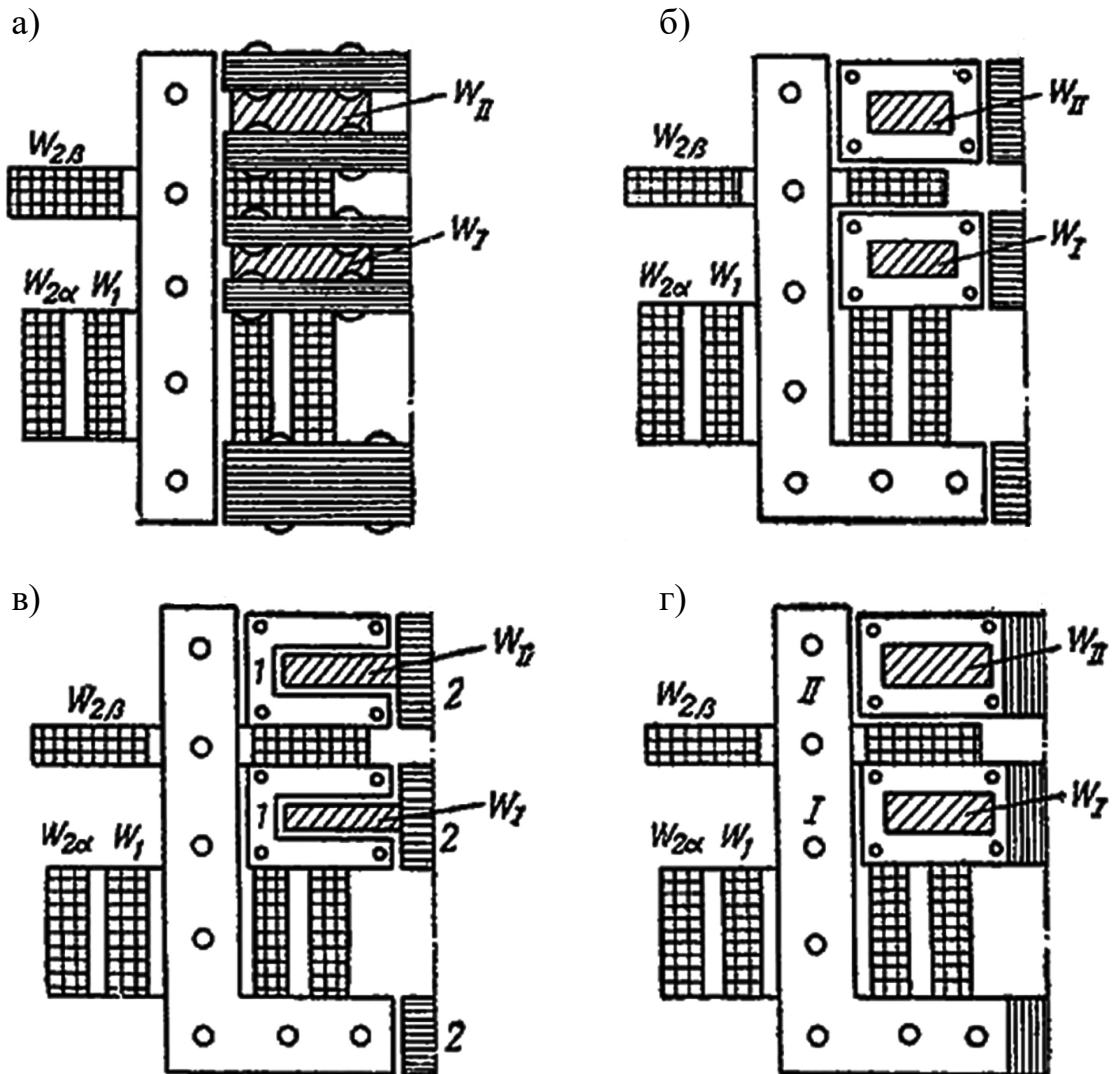


Рисунок 2.7. Розташування обмоток регульованого трансформатора.

Вся первинна обмотка w_1 трансформатора знаходиться в нижній частині, а вторинна обмотка w_2 розділена на дві частини: $w_2 = w_{2\alpha} + w_{2\beta}$. Частина $w_{2\alpha}$ знаходиться в нижній частині, а частина $w_{2\beta}$ у верхній.

Трансформатор виконаний з двома підмагнічуваними ярами, що утворюють зірку: w_I - обмотка підмагнічування фаз верхнього яра; w_{II} - обмотка підмагнічування фаз нижнього яра (середнього яра).

Обмотки підмагнічування розташовуються по осі симетрії трансформатора. Кожна з обмоток намагнічує тільки одне ярмо, що представляє зірку. Змінюючи в цих обмотках підмагнічування w_I і w_{II} струми таким чином, щоб у всіх положеннях сума струмів була б постійна, виконуємо плавне регулювання вторинної напруги. Трансформатор в широких межах змінює реактивний опір, якщо підмагнічує тільки середнє ярмо, в цьому випадку верхнє ярмо виконується некерованим (або без обмотки керування).

На рис. 2.7 показана частина ярма, що відноситься до однієї фази і представляє собою горизонтально шихтований сердечник. На рис.2.6, в, зображений вид зверху на трансформатор з таким ярмом. Тут обмотка підмагнічування зашихтована горизонтально розташованими в зірку пластинами.

На рис. 2.7, в, зображений стержень з ярмами, зібраними з П-подібних розімкнутих сердечників 1, підтискаючих до тригранної призми 2. Близьким до цього є рішення по рис. 2.7, б, де до призм притискаються замкнуті П-подібні сердечники. Такі ярма зображені на рис.2.6, а. В варіанті по рис. 2.7, г, обмотки підмагнічування зашихтовуються в замкнуті П-подібні сердечники, одна зі сторін яких обробляється під кутом 180° ; рис.2.6, б, вид зверху на трансформатор з такими ярмами.

Загальним недоліком розглянутих конструкцій регульованих трансформаторів є необхідність для забезпечення подовжнього підмагнічування використання розщепленого ярма із розташуванням поміж них обмотки підмагнічування. За рахунок цього значно збільшується висота стрижня на висоту ярм та обмоток підмагнічування. Це збільшує потік розсіювання додаткової вторинної обмотки та зменшує діапазон регулювання. Крім того, у другій конструкції (рис. 2.6) при відсутності підмагнічування магнітний потік має подолати на фазу мінімум 4 повітряних стики, що збільшує струм холостого ходу та погіршує енергетичні показники трансформатора. Ще одним негативним моментом є наявність подовжнього підмагнічування, яке в ярмах створює у режимах підмагнічування постійним струмом парні гармоніки потоку, що у свою чергу збільшує сумарні магнітні втрати трансформатору.

Підвищити енергетичні показники і поліпшити масогабаритними показниками регульованого трансформатора (який надалі у режимі короткого замикання буде використаний у вигляді реактора) можна шляхом заміни поздовжнього підмагнічування ярма на поперечне. Виходячи з вищесказаного, запропоновано в аксіальній просторовій симетричній магнітній системі на стрижні розмістити основні мережеву та вторинну обмотку і додаткову вторинну обмотку. Основні та додаткову обмотки пропонується просторово розділити шляхом розміщення в обмотковому вікні між ними шунта, який підмагнічується поперечним магнітним полем.

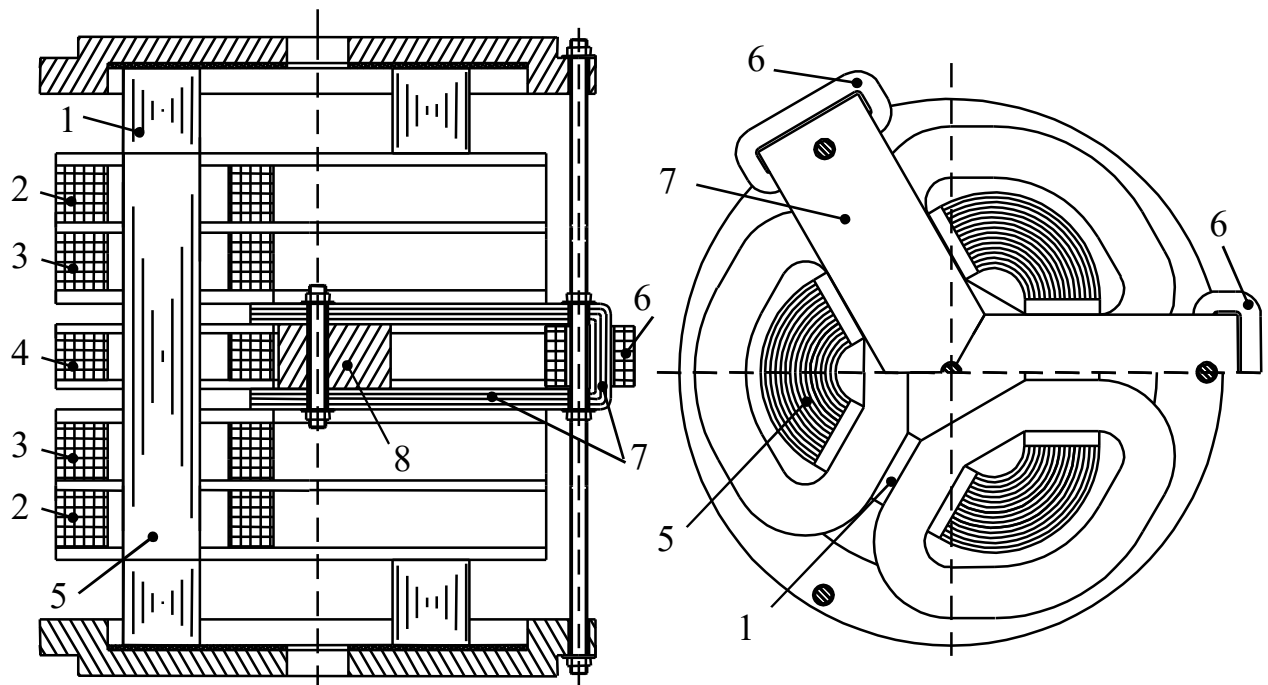


Рисунок 2.8. Конструкція трифазного трансформатора із просторовим магнітопроводом, що регулюється поперечним підмагнічуванням: а) – вид збоку; б) – вид зверху. (1 – ярмо; 2 – основна вторинна обмотка; 3 – первинна обмотка; 4 – додаткова вторинна обмотка; 5 – стрижень; 6 – обмотка підмагнічування; 7 – магнітний шунт, суміщений із індуктором обмотки підмагнічування; 8 – призма із феромагнітного матеріалу для замикання магнітних ланцюгів обмоток підмагнічування).

Для роботи у режимі реактора основна і додаткова вторинні обмотки з'єднуються послідовно та замикаються накоротко. При відсутності підмагнічування додаткову вторинну обмотку буде пронизувати лише незначна частина магнітного потоку мережевої обмотки, більша частина якого буде відгалужуватися в шунт. В результаті струм в мережевій обмотці буде мінімальний. При збільшенні струму підмагнічування магнітний опір шунта буде збільшуватися, що призведе до зростання частки магнітного потоку, яка буде пронизувати додаткову вторинну обмотку, а значить, і до збільшення струму мережевої обмотки реактора.

2.3. Математична модель реактора трансформаторного типу із просторовою магнітною системою та поперечним підмагнічуванням шунта.

Для складання та аналізу математичної моделі пристрою реальна магнітна система була замінена еквівалентною електричною, в якій реальні магнітні потоки представляються у вигляді електричних струмів, а намагнічуючі сили обмоток - у вигляді джерел ЕРС. На рис. 2.9 представлена структурна схема магнітної системи, що розглядається (стрілками вказані частини магнітопроводу, які будуть підмагнічуватися під час роботи пристрою), а також відповідна електрична схема заміщення магнітного ланцюга.

На структурній схемі (рис.2.9, а) позначено цифрами: 1 – основна первинна обмотка; 2 – основна вторинна обмотка; 3 – додаткова вторинна обмотка; 4 – магнітний шунт, на який діє поперечне магнітне поле підмагнічування.

Схема заміщення просторового трансформатора представлена на рис. 2.9, б. На цьому рисунку прийняті наступні позначення: R_1 – опір, еквівалентний магнітному опору стрижня, на якому знаходиться додаткова вторинна обмотка; R_2 – опір, еквівалентний магнітному опору стрижня, на якому знаходиться основні первинна та вторинна обмотка; R_3 – опір, еквівалентний магнітному опору ділянки ярма між двома сусідніми стрижнями; R_4 – опір, еквівалентний магнітному опору ділянки ярма між двома сусідніми стрижнями, який пе-

редбачається підмагнічувати; E_{1A}, E_{1B}, E_{1C} – ЕРС, еквівалентні намагнічувальним силам первинних обмоток; $E_{21A}, E_{21B}, E_{21C}$ – ЕРС, еквівалентні намагнічувальним силам основних вторинних обмоток; $E_{22A}, E_{22B}, E_{22C}$ – ЕРС, еквівалентні намагнічувальним силам додаткових вторинних обмоток; I_{1A}, I_{1C} – струми, еквівалентні магнітним потокам в стрижнях первинних обмоток; I_{2A}, I_{2C} – струми, еквівалентні магнітним потокам в стрижнях додаткових вторинних обмоток.

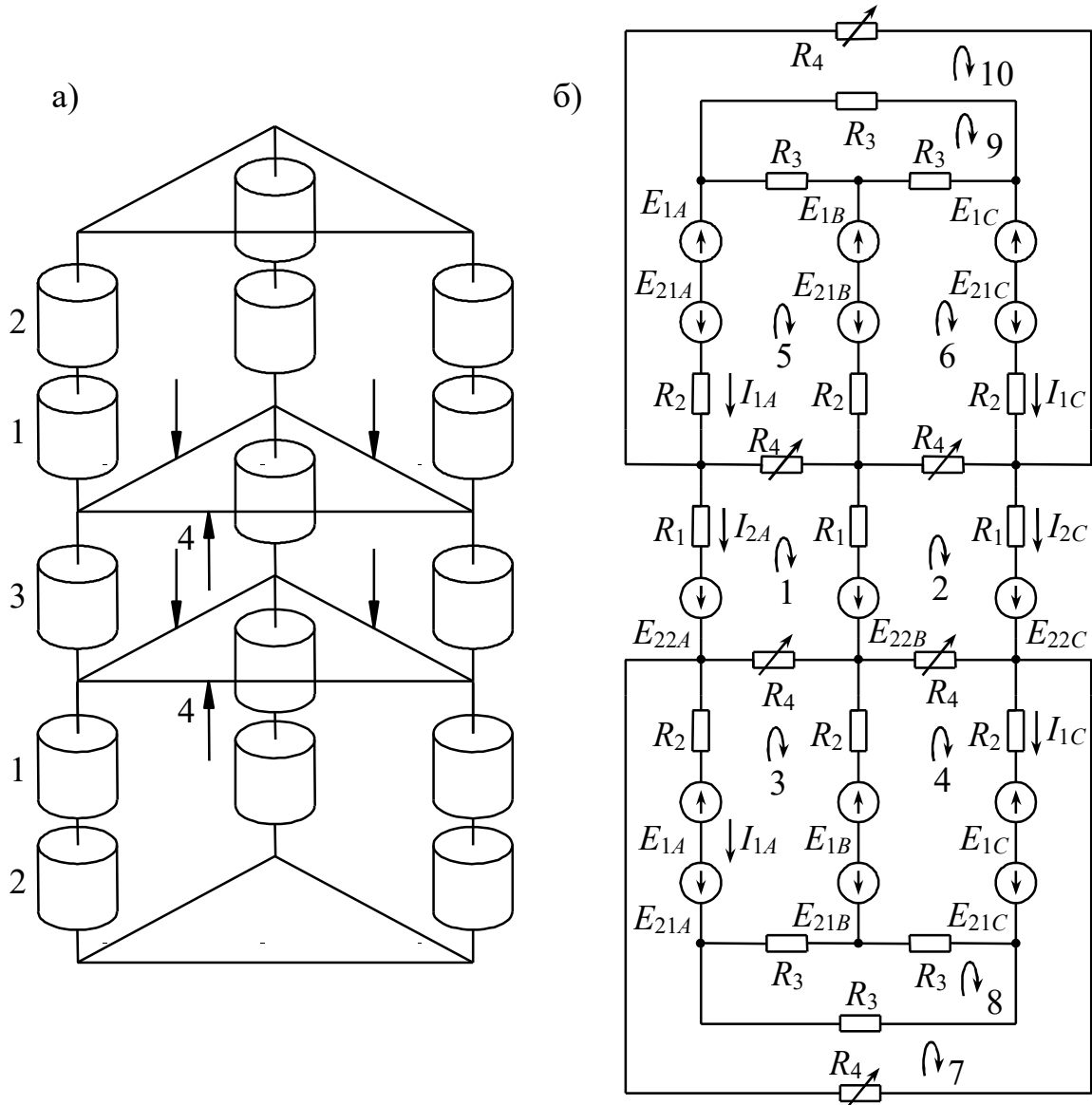


Рисунок 2.9. Структурна схема (а) та схема заміщення (б) магнітного ланцюга

На підставі схеми заміщення, представленої на рис.2.9, була складена система рівнянь на основі методу контурних струмів та законів Кірхгофа:

$$(2R_4 + 2R_1)I_{k1} - R_1I_{k2} - R_4(I_{k3} + I_{k5} + I_{k7} + I_{k10}) = E_{22B} - E_{22A}; \quad (2.6)$$

$$-R_1I_{k1} + (2R_4 + 2R_1)I_{k2} - R_4(I_{k4} + I_{k6} + I_{k7} + I_{k10}) = E_{22C} - E_{22B}; \quad (2.7)$$

$$\begin{aligned} -R_4I_{k1} + (2R_2 + R_4 + R_3)I_{k3} - R_2I_{k4} + R_4I_{k7} - R_3I_{k8} = \\ = E_{1A} - E_{21A} + E_{21B} - E_{1B}; \end{aligned} \quad (2.8)$$

$$\begin{aligned} -R_4I_{k2} + (2R_2 + R_4 + R_3)I_{k4} - R_2I_{k3} + R_4I_{k7} - R_3I_{k8} = \\ = E_{1B} - E_{21B} + E_{21C} - E_{1C}; \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\begin{aligned} -R_4I_{k1} + (2R_2 + R_4 + R_3)I_{k5} - R_2I_{k6} - R_3I_{k9} + R_4I_{k10} = \\ = E_{1A} - E_{21A} + E_{21B} - E_{1B}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} -R_4I_{k2} + (2R_2 + R_4 + R_3)I_{k6} - R_2I_{k5} - R_3I_{k9} + R_4I_{k10} = \\ = E_{1B} - E_{21B} + E_{21C} - E_{1C}; \end{aligned}$$

$$-I_{k1} - I_{k2} + I_{k3} + I_{k4} + 3I_{k7} = 0; \quad (2.10)$$

$$-I_{k3} - I_{k4} + 3I_{k8} = 0;$$

$$-I_{k5} - I_{k6} + 3I_{k9} = 0;$$

$$-I_{k1} - I_{k2} + I_{k5} + I_{k6} + 3I_{k10} = 0.$$

Як бачимо із схеми заміщення магнітної системи, контурні струми та струми у деяких гілках схеми пов'язані простими рівняннями:

$$I_{k3} = I_{k5} = -I_{1A}, \quad I_{k4} = I_{k6} = I_{1C}, \quad I_{k3} - I_{k4} = I_{k5} - I_{k6} = I_{1B},$$

$$I_{k1} = -I_{2A}, \quad I_{k2} = I_{2C}, \quad I_{k1} - I_{k2} = I_{2B}.$$

Якщо з рівняння (2.6) відняти рівняння (2.7), то, приймаючи до уваги симетричність системи та вважаючи суму струмів фаз вторинної обмотки такою, що дорівнює нулеві ($E_{22A} + E_{22B} + E_{22C} = 0$), отримаємо залежність потоку через додаткову вторинну обмотку від основного потоку та струму у вторинній обмотці:

$$I_{2B} = \frac{2/3 R_4 I_{1B} + E_{22B}}{2/3 R_4 + R_1}; I_{2A} = \frac{2/3 R_4 I_{1A} + E_{22A}}{2/3 R_4 + R_1}; I_{2C} = \frac{2/3 R_4 I_{1C} + E_{22C}}{2/3 R_4 + R_1}. \quad (2.11)$$

Магнітний потік, який протікає через шунт (через магнітний опір R_4), легко можна знайти із рівняння 2.10:

$$I_{k7} = I_{R_4} = \frac{I_{k1} - I_{k3} + I_{k2} - I_{k4}}{3} = \frac{I_{1A} - I_{2A} + I_{2C} - I_{1C}}{3}. \quad (2.12)$$

В пункті 2.1 був введений коефіцієнт x , який дорівнює співвідношенню витків додаткової вторинної обмотки і сумарних витків вторинних обмоток. У зв'язку із тим, що намагнічуючі сили визначаються як добуток кількості витків на струм, що протікає по обмотці, а також враховуючи послідовне з'єднання основної та додаткової вторинних обмоток, справедливі наступні тотожності:

$$E_{22B} = x E_{2B}; E_{21B} = (1-x) E_{2B} / 2, \quad (2.13)$$

де $E_{2B} = E_{21B} + E_{22B}$ – сумарна ЕРС, що відповідає сумарній намагнічуючій силі вторинних обмоток.

Якщо з рівняння (2.8) відняти рівняння (2.9), то отримаємо залежність для намагнічуючої сили первинної обмотки:

$$E_{1B} = E_{21B} + \frac{I_{2B} R_4 - I_{1B} (3 R_2 + R_3 + R_4)}{3}. \quad (2.14)$$

Скориставшись рівняннями (2.11) та (2.13) з тотожності (2.14) можна виключити ЕРС E_{21B}

$$E_{1B} = I_{2B} \left[\frac{R_4}{3} + \frac{1-x}{2x} \left(\frac{2}{3} R_4 + R_1 \right) \right] - I_{1B} \left[\frac{3R_2 + R_3 + R_4}{3} + \frac{1-x}{2x} R_4 \right]. \quad (2.15)$$

Рівняння (2.15) для E_{1B} визначає залежність намагнічуючої сили первинної обмотки від магнітних потоків первинної та додаткової вторинної обмоток.

При певному навантаженні на вторинній обмотці магнітні потоки, що пронизують основну та додаткову вторинну обмотку, визначають струм, а значить і намагнічуючу силу вторинної обмотки. Визначимо взаємозв'язок між магнітним потоком в осерді і намагнічувальною силою обмотки через електричний опір зовнішнього ланцюга обмотки.

Змінний магнітний потік наводить в обмотці ЕРС:

$$E = -w \frac{d\Phi}{dt} = -\sqrt{2} \pi f w \Phi e^{j\pi/2},$$

де w – кількість витків обмотки; f – частота зміни синусоїдального потоку; Φ – діюче значення магнітного потоку в осерді.

У зв'язку з тим, що основну та додаткову вторинні обмотки пронизують різні магнітні потоки, справедливе наступне рівняння для визначення ЕРС у вторинній обмотці:

$$E_2 = -\sqrt{2} \pi f (w_{21} \Phi_1 + w_{22} \Phi_2) e^{j\pi/2} = -\sqrt{2} \pi f w_2 [(1-x) \Phi_1 + x \Phi_2] e^{j\pi/2},$$

де Φ_1 та Φ_2 – діючі значення магнітних потоків, що пронизують відповідно основну та додаткову вторинні обмотки.

ЕРС наводить струм в ланцюзі обмотки

$$I_2 = E_2 / (z e^{j\varphi}) = -\sqrt{2} \pi f w_2 [(1-x) \Phi_1 + x \Phi_2] e^{j\pi/2} / (z e^{j\varphi}),$$

де z – модуль повного електричного опору кола обмотки; φ – кут зсуву фаз між струмом та ЕРС в колі обмотки.

Намагнічуюча сила обмотки

$$F_2 = I_2 w_2 = -\sqrt{2} \pi f w_2^2 [(1-x) \Phi_1 + x \Phi_2] e^{j\pi/2} / (z e^{j\varphi}).$$

Прийmemo за базисний опір таке дійсне значення, при якому у відносних одиницях модулі намагнічуючої сили та магнітного потоку первинної обмотки у режимі холостого ходу дорівнюють одиниці

$$z_6 = \sqrt{2} \pi f w_2^2 \Phi_6 / F_6,$$

де Φ_6 – базисний магнітний потік, що дорівнює потоку первинної обмотки при номінальній напрузі; F_6 – базисна намагнічуюча сила, що дорівнює намагнічуючій силі первинної обмотки у режимі холостого ходу.

Тоді у відносних одиницях зв'язок між магнітним потоком та намагнічуювальною силою

$$F_2^* = -[(1-x) \Phi_1^* + x \Phi_2^*] e^{j\pi/2} / (z^* e^{j\varphi});$$

де Φ^* , F^* , z^* , – відповідні параметри у відносних одиницях.

Для схеми заміщення (рис.2.9, б) рівняння переписеться наступним чином

$$E_{2B} = -[(1-x) I_{1B} + x I_{2B}] e^{j\pi/2} / (z^* e^{j\varphi}). \quad (2.16)$$

Тепер знайдемо через параметри магнітного кола повну потужність S , яка передається в електричне коло обмотки:

$$\begin{aligned} S_2 = E_2 I_2 &= \sqrt{2} \pi f w_2 [(1-x) \Phi_1 + x \Phi_2] F_2 / w_2 = \\ &= \sqrt{2} \pi f [(1-x) \Phi_1 + x \Phi_2] F_2. \end{aligned}$$

Прийmemo за базисну потужність таке дійсне значення, при якому у відносних одиницях модулі намагнічувальної сили і магнітного потоку рівні одиниці

$$S_6 = \sqrt{2} \pi f \Phi_6 F_6.$$

Тоді повна потужність у відносних одиницях

$$S_2^* = [(1-x)\Phi_1^* + x\Phi_2^*]F_2^* = E_{2B} \cdot [(1-x)I_{1B} + xI_{2B}]. \quad (2.17)$$

Виходячи з отриманих співвідношень (2.11), (2.13) та (2.16), маємо:

$$I_{2B} = \frac{I_{1B} [2R_4 z^* e^{j\varphi} - 3(1-x)x e^{j\pi/2}]}{(2R_4 + 3R_1) \cdot z^* \cdot e^{j\varphi} + 3x^2 e^{j\pi/2}}. \quad (2.18)$$

Для визначення опорів схеми заміщення магнітного ланцюга достатньо визначити падіння магнітного потенціалу на даній ділянці F_x та поділити його на базисне значення F_6

$$R_x^* = F_x / F_6. \quad (2.19)$$

Залишилося визначити алгоритм визначення опору навантаження вторинної обмотки. По перше, будемо вважати навантаження чисто індуктивним, тобто $\varphi = \pi/2$. По друге, більш детально розглянемо базисний електричний опір:

$$z_6 = \sqrt{2} \pi f w_2^2 \frac{\Phi_6}{F_6} = \sqrt{2} \pi f \frac{w_2^2}{w_1^2} \frac{E_{1xx}}{I_{1xx} \sqrt{2} \pi f} = \frac{L_1 \omega}{k_{тр}^2}, \quad (2.20)$$

де E_{1xx} – відповідно напруга та струм первинної обмотки в режимі холостого ходу.

Таким чином модуль опору навантаження можна визначити за наступним рівнянням:

$$z^* = \frac{\omega L_{3\sigma}}{z_0} = \frac{\omega L_3 \sigma_3}{L_1 \omega} k_{\text{тр}}^2 = \frac{L_{2\Sigma} x^2 \sigma_3}{L_1} k_{\text{тр}}^2 = x^2 \sigma_3; \quad (2.21)$$

де σ_3 – коефіцієнт електромагнітного розсіювання додаткової вторинної обмотки.

Коефіцієнт σ_3 можна знайти із наступного співвідношення

$$\sigma_3 = |(I_{2B} - I_{1B})/I_{1B}|. \quad (2.22)$$

2.4 Висновки до розділу 2

2.1 Наведено аналіз конструкції та графіки зміни режимних параметрів керованих реакторів трансформаторного типу у залежності від ступеня підмагнічування елементу магнітопроводу, що поділяє вторинну обмотку на основну частину та додаткову.

2.2 Показано, що при короткозамкненій вторинній обмотці кратність регулювання реактора трансформаторного типу складає 4,8...5,4 рази, що є достатнім для регулювання реактивної потужності конденсаторних батарей при регулюванні напруги асинхронного генератора.

2.3. Розглянуто принципи роботи і конструктивні особливості регульованих трансформаторів, які можуть бути використані у якості ректорів трансформаторного типу.

2.4. Недоліком розглянутих конструкцій є необхідність для забезпечення подовжнього підмагнічування використання розщепленого ярма із розташуванням поміж них обмоток підмагнічування, що збільшує масогабаритні показник, збільшує потік розсіювання додаткової вторинної обмотки та зменшує діапазон регулювання.

2.5 Ще одним недоліком розглянутих конструкцій є наявність подовжнього підмагнічування, яке в ярмах створює у режимах підмагнічування постійним струмом парні гармоніки потоку, що у свою чергу збільшує сумарні магнітні втрати трансформатору та погіршує енергетичні показники.

2.6. Для підвищення енергетичних і поліпшення масогабаритних показників регульованого трансформатора (який надалі у режимі короткого замикання використаний у вигляді реактора) можна шляхом заміни подовжнього підмагнічування ярма на поперечне.

2.7. Запропоновано в аксіальній просторовій симетричній магнітній системі на стрижні розмістити основні мережеву та вторинну обмотку і додаткову вторинну обмотку. Основні та додаткову обмотки пропонується просторово розділити шляхом розміщення в обмотковому вікні між ними шунта, який підмагнічується поперечним магнітним полем.

2.8. Складена математична модель магнітного ланцюга запропонованої конструкції реактора та отримані залежності параметрів магнітного кола від параметрів навантаження та ступеня підмагнічування магнітного шунта.

2.9. Визначений алгоритм розрахунку індуктивного опору розсіювання вторинної обмотки, що є навантаженням для короткозамкненої вторинної обмотки. Це дозволяє визначити намагнічувальну силу вторинної обмотки через магнітні потоки, що пронизують її частини.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРАХУНОК РЕАКТОРА ТРАНСФОРМАТОРНОГО ТИПУ ІЗ ПРОТОРОВИМ МАГНІТОПРОВОДОМ КЕРОВАНИЙ ПОПЕРЕЧНИМ ПІДМАГНІЧУВАННЯМ ДЛЯ РЕГУЛЮВАННЯ НАПРУГИ АСИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

3.1. Розрахунок параметрів системи регулювання напруги асинхронного генератора потужністю 75 кВт

Проведемо розрахунок асинхронного генератора, потужністю 75 кВт. Для цього із довідника [36] обираємо асинхронний двигун потужністю 75 кВт із наступним маркуванням: 4A250S4Y3 (4-й серії захищеного виконання з короткозамкненим ротором, сталевими станинами і щитами, висотою осі обертання 250 мм, із середнім (S) інсталяційний розміром, чотири-полюсний, кліматичного виконання (Y) і категорії розміщення 3).

Виходячи із довідникових даних, маємо наступні номінальні параметри двигуна: лінійна напруга $U_1 = 400$ В для з'єднання в зірку; номінальна потужність двигуна $P_n = 75$ кВт; номінальний коефіцієнт корисної дії $\eta_1 = 0,93$; номінальний коефіцієнт потужності $\cos\varphi_{\text{ном}} = 0,9$; ковзання в номінальному режимі $s_{\text{ном}} = 0,012$ в.о.

Із довідника для асинхронних двигунів серії 4A [36] маємо наступні параметри для Г-подібної схеми заміщення (рис. 1.1, б) у відносних одиницях:

- індуктивний опір ланцюга намагнічування $x_\mu = 4,4$ в.о.;
- 1. активний опір статорної і роторної обмоток:

$$r'_1 = 0,025 \text{ в.о.}; r''_2 = 0,014 \text{ в.о.};$$
- 2. індуктивний опір розсіювання статорної і роторної обмоток:

$$x'_1 = 0,089 \text{ в.о.}; x''_2 = 0,14 \text{ в.о.}$$

Фазні напруга і струм машини:

$$U_\phi = \frac{U_1}{\sqrt{3}} = \frac{400}{\sqrt{3}} = 231 \text{ В};$$

$$I_{\phi} = \frac{P_H}{3 \cdot U_{\phi} \cdot \cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{75 \cdot 10^3}{3 \cdot 231 \cdot 0,9 \cdot 0,93} = 129 \text{ А.}$$

Номінальна повна потужність асинхронної машини:

$$S_H = \frac{P_H}{\cos \varphi_{\text{НОМ}} \cdot \eta_{\text{НОМ}}} = \frac{75 \cdot 10^3}{0,9 \cdot 0,93} = 89,6 \text{ кВА.}$$

Визначимо базисний опір:

$$Z_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{I_{\phi}} = \frac{231}{129} = 1,786 \text{ Ом.}$$

Тоді опори для Г-подібної схеми заміщення у іменованих одиницях визначаються наступним чином:

3. індуктивний опір розсіювання та активний опір статорної обмотки

$$r'_{1a} = r'_1 \cdot Z_{\phi} = 0,025 \cdot 1,786 = 0,045 \text{ Ом;}$$

$$x'_{1a} = x'_1 \cdot Z_{\phi} = 0,089 \cdot 1,786 = 0,159 \text{ Ом;}$$

4. індуктивний опір розсіювання та активний опір роторної обмотки:

$$r''_{2a} = r''_2 \cdot Z_{\phi} = 0,014 \cdot 1,786 = 0,025 \text{ Ом;}$$

$$x''_{2a} = x''_2 \cdot Z_{\phi} = 0,14 \cdot 1,786 = 0,25 \text{ Ом;}$$

5. індуктивний опір ланцюга намагнічування:

$$x_{\mu a} = x_{\mu} \cdot Z_{\phi} = 4,4 \cdot 1,786 = 7,857 \text{ Ом.}$$

Для більш точного розрахунку реактивної потужності, необхідної для асинхронного генератора у режимі холостого ходу та у номінальному перейдемо від Г-подібної до Т-подібної схеми заміщення (рис. 1.1, а):

6. індуктивний опір розсіювання статорної обмотки:

$$x_1 = \frac{2 \cdot x'_{1a} \cdot x_{\mu a}}{x_{\mu a} + \sqrt{x_{\mu a}^2 + 4 \cdot x_{\mu a} \cdot x'_{1a}}} = \frac{2 \cdot 0,159 \cdot 7,857}{7,857 + \sqrt{7,857^2 + 4 \cdot 7,857 \cdot 0,159}} = 0,156 \text{ Ом};$$

7. коефіцієнт приведення від Г-подібної схеми до Т-подібної:

$$C_1 = \frac{x'_{1a}}{x_1} = \frac{0,159}{0,156} = 1,02 ;$$

8. -активний опір статорної обмотки:

$$r_1 = \frac{r'_{1a}}{c_1} = \frac{0,045}{1,02} = 0,044 \text{ Ом};$$

9. індуктивний опір розсіювання та активний опір роторної обмотки:

$$x'_2 = \frac{x''_{2a}}{c_1^2} = \frac{0,25}{1,02^2} = 0,24 \text{ Ом}; \quad r'_2 = \frac{r''_{2a}}{c_1^2} = \frac{0,025}{1,02^2} = 0,024 \text{ Ом}.$$

Повний опір гілок Т-подібної схеми заміщення:

10. статорної обмотки:

$$Z_1 = r_1 + i \cdot x_1 = (0,044 + i \cdot 0,156) \text{ Ом};$$

11. роторної обмотки:

$$Z'_2(s) = (r'_2/s) + i \cdot x'_2 = (0,024/s) + i \cdot 0,24 \text{ Ом};$$

12. ланцюга намагнічування без урахування активних втрат:

$$Z_M = i \cdot x_{\mu a} = i \cdot 7,857 \text{ Ом.}$$

Повний опір асинхронної машини в залежності від ковзання:

$$Z_{\text{общ}}(s) = Z_1 + \frac{Z'_2(s) \cdot Z_M}{Z'_2(s) + Z_M}.$$

Звідки струм статора асинхронної машини в залежності від ковзання:

$$I_1(s) = U_{\phi} / Z_{\text{общ}}(s).$$

Розрахуємо реактивну потужність, що споживається асинхронним генератором в режимі холостого ходу:

13. ковзання $s_{xx} = 0$;
 14. струм в обмотці статора

$$I_{01} = U_{\phi} / Z_{\text{общ}}(s_{xx}) = 0,158 - i \cdot 28,8 \text{ А}; |I_{01}| = 28,8 \text{ А};$$

15. струм в обмотці ротора

$$I_{02} = \frac{U_{\phi} - I_{01} \cdot Z_1}{Z'_2(s_{xx})} = 0 \text{ А};$$

16. струм намагнічування

$$I_{0\mu} = \frac{U_{\phi} - I_{01} \cdot Z_1}{Z_M} =$$

$$= \frac{231 - (0,158 - i \cdot 28,8) \cdot (0,044 + i \cdot 0,156)}{i \cdot 7,857} = 0,158 - i \cdot 28,8 \text{ А};$$

$$|I_{0\mu}| = 28,8 \text{ А};$$

17. реактивна потужність, споживана індуктивним опором розсіювання статорної обмотки:

$$Q_{01} = |I_{01}|^2 \cdot x_1 = (28,8)^2 \cdot 0,156 = 129,45 \text{ ВАр};$$

18. реактивна потужність споживана індуктивним опором розсіювання вторинної обмотки:

$$Q_{02} = |I_{02}|^2 \cdot x'_2 = 0 \text{ ВАр};$$

19. реактивна потужність споживана індуктивністю ланки намагнічування:

$$Q_{\mu a} = |I_{\mu a}|^2 \cdot x_{\mu a} = (28,8)^2 \cdot 7,857 = 6,527 \text{ кВАр};$$

20. реактивна потужність споживана асинхронним генератором в режимі холостого ходу на одну фазу

$$Q_{xx1\phi} = Q_{01} + Q_{02} + Q_{\mu a} = 129 + 0 + 6\,527 = 6,656 \text{ кВАр};$$

21. реактивна потужність споживана асинхронним генератором в режимі холостого ходу:

$$Q_{\Sigma} = Q_{\phi} \cdot 3 = 6,656 \cdot 10^3 \cdot 3 = 19,97 \text{ кВАр.}$$

Розрахуємо реактивну потужність, що споживається асинхронним генератором та навантаженням в номінальному режимі:

- ковзання $s_{\text{ном}} = 0,012$;
- струм в обмотці статора

$$I_{\text{н1}} = U_{\phi} / Z_{\text{общ}}(s_{\text{ном}}) = 105 - i \cdot 47,8 \text{ А}; |I_{\text{н1}}| = 115,4 \text{ А};$$

22. струм намагнічування:

$$\begin{aligned} I_{\text{нм}} &= \frac{U_{\phi} - I_{\text{н1}} \cdot Z_1}{Z_{\text{м}}} = \\ &= \frac{231 - (105 - i \cdot 47,8) \cdot (0,044 + i \cdot 0,156)}{i \cdot 7,857} = -2,99 - i \cdot 26,7 \text{ А}; \\ |I_{\text{нм}}| &= 27,9 \text{ А}; \end{aligned}$$

23. струм у обмотці ротора:

$$I_{\text{н2}} = \frac{U_{\phi} - I_{\text{н1}} \cdot Z_1}{Z_2'(s_{\text{ном}})} = 107 - i \cdot 20 \text{ А}; |I_{\text{н2}}| = 109 \text{ А};$$

24. реактивна потужність, споживана індуктивним опором розсіювання статорної обмотки:

$$Q_{\text{н1}} = |I_{\text{н1}}|^2 \cdot x_1 = (115,4)^2 \cdot 0,156 = 2,077 \text{ кВАр};$$

25. реактивна потужність споживана індуктивним опором розсіювання вторинної обмотки:

$$Q_{H2} = |I_{H2}|^2 \cdot x'_2 = (109)^2 \cdot 0,24 = 2,842 \text{ кВАр};$$

26. реактивна потужність споживана індуктивністю ланки намагнічування:

$$Q_{H\mu} = |I_{H\mu}|^2 \cdot x_{\mu a} = (27,9)^2 \cdot 7,857 = 6,124 \text{ кВАр};$$

27. реактивна потужність споживана асинхронним генератором в режимі холостого ходу на одну фазу:

$$Q_{H1\phi} = Q_{H1} + Q_{H2} + Q_{H\mu} = 2,077 + 2,842 + 6,124 = 11,04 \text{ кВАр};$$

28. реактивна потужність, споживана асинхронним генератором в номінальному режимі на три фази:

$$Q_{HAG\Sigma} = Q_{H1\phi} \cdot 3 = 11,04 \cdot 3 = 33,13 \text{ кВАр}.$$

29. повна потужність навантаження: $S_{HAB} = S_H = 100 \text{ кВА};$

30. коефіцієнт потужності навантаження: $\cos\varphi_{HAB} = 0,8;$

31. реактивна потужність, що споживається навантаженням:

$$Q_{HAB} = S_{HAB} \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi_{HAB}} = 100 \cdot \sqrt{1 - 0,8^2} = 60 \text{ кВАр}.$$

Таким чином, реактивна потужність конденсаторних батарей має бути:

32. у режимі холостого ходу: $Q_{схх} = Q_{схх1\Sigma} = 20 \text{ кВАр};$

33. у режимі номінального навантаження з урахуванням 50% запасу для забезпечення задовільних показників перехідних електро-механічних процесів у динамічних режимах:

$$Q_{\text{снав}} = 1,5 (Q_{\text{нАГ}\Sigma} + Q_{\text{наб}}) = 1,5 (33,13 + 60) = 130 \text{ кВАр.}$$

Для забезпечення роботи асинхронного генератора в усіх робочих режимах обираємо трифазні конденсатори компанії RTR Energía S.L. серії BO/R у кількості три потужністю 25 кВАр та один потужністю 50 кВАр. Параметри конденсаторів: втрати активної потужності не більше 0,45 Вт/кВАр, номінальна напруга 400 В, частота мережі 50 Гц, діапазон температур від -45°C до +50°C, припустимі відхилення ємності від -5% до +10%. В якості керованого реактора пропонується розрахувати реактор потужністю 46 кВАр та напругою 400 В. Конденсаторні батареї потужністю 25 кВАр до асинхронного генератора мають підключатися поступово в разі потреби додаткової реактивної потужності. Конденсаторна батарея потужністю 50 кВАр має бути підключена одразу разом із реактором та має виконувати функції початкового збудження у режимі холостого ходу та генерації реактивної потужності при малих індуктивних навантаженнях. Принципова схема генераторної установки представлена на рис. 3.1.

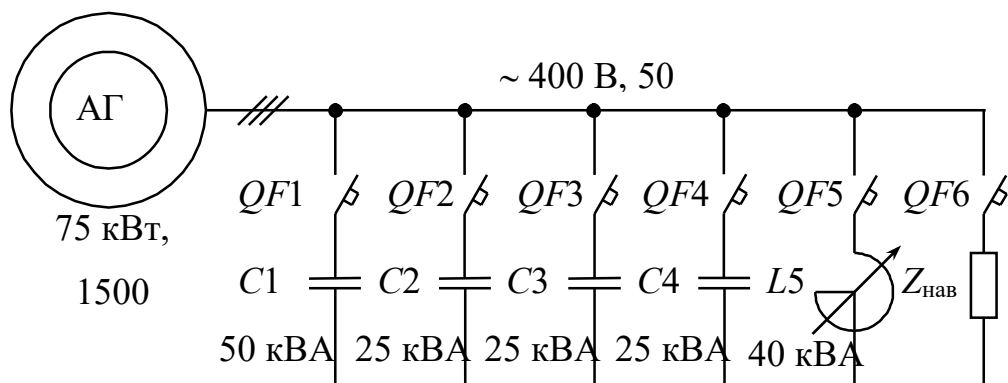


Рисунок 3.1. Принципова схема генераторної установки на базі асинхронної машини

3.2. Розрахунок трансформатора з просторовим магнітопроводом

Електромагнітні системи сучасних трансформаторів складаються з концентричних або галетних обмоток і магнітопроводу, який є основою трансформатора. Конструктивна схема, геометрична форма та співвідношення елементів магнітопроводу визначають не тільки втрати електротехнічної сталі, але й експлуатаційні показники, масу і вартість обмоткових матеріалів.

У симетричній просторовій ЕМС осі стержнів і ярем розміщені в трьох площинах під кутом 120° . Стиковий симетричний просторовий магнітопровід складається зі стержнів, які зроблені з пакетів плоских або з вигнутих за евольвентою пластин одного розміру. Завдяки цій конструкції маса активної сталі та витрати неробочого ходу зменшуються. Для забезпечення стиків стержневої частини кожного з суміжних контурів і збільшення коефіцієнта заповнення кола кільця роблять складеними і піддають деформації – вигинають та відпалюють.

Існують також конструкції з аксіальним напрямком потоку стержнів і шихтованим або стрічковим стиковими магнітопроводами зі стержнями, з'єднаними зіркою; шихтовані і комбіновані СПМ з аксіальним та радіальним напрямками потоку стержнів та кільцевими замкненими ярами шестигранної форми. Технологічна досконалість ЕМС і технічний рівень виробництва визначаються технологічною матеріаломісткістю або рівнем відходів електротехнічної сталі, а також трудомісткістю виготовлення магнітопроводів.

Недоліком конструкцій є недостатнє використання простору, який обмежений контуром кола. Серед існуючих конструкцій і технологій виготовлення мінімальну кількість активних елементів та одиниць оснащення мають СПМ, в яких збігаються напрямки шихтування шарів сталі стержнів і ярма. Недоліком є складність утворення технології стику бокових поверхонь, збігу кутів розрізання та ізолювання частин стиків.

При забезпеченні паралельності стінок обмоткових вікон на основі нетрадиційної конфігурації стержнів, котушок і ярем. Це можливо у витих просторових магнітопроводах. Містять стрічкові ярма з шестигранним або трикутним

внутрішнім контуром зі стрічкової заготовки або шляхом розрізання по осях під кутами 120° . Під час складання суміщаються ділянки відповідних контурів та забезпечуються практично безвідходне виробництво. Технологію розрізання по осям вершин граней можна використати при виготовленні магнітопроводів із діаметром описаного кола до 150 мм та малої потужності і підвищеної частоти. Стержні більших можуть бути складені із заготовок.

Початковими даними є потужність, кількість фаз, частота, лінійні напруги, коефіцієнт потужності навантаження, група з'єднань обмоток, конструктивне виконання. Основою конструкції є магнітопровід, з параметрами площі перерізу стержня, довжин витків, обмоток, обмоткових вікон. Обмотки поділяються на галетні та концентричні. Відповідно до цих типів можливі різні конфігурації котушок. З метою зниження матеріаломісткості виток може виготовлятися з декількох елементарних провідників. Коефіцієнт заповнення обмоткового вікна визначається класом напруг обмоток і залежить від довжин ізоляційних проміжків.

Розрахунок трансформатора є математично невизначеним завданням з багатьма розв'язками, оскільки кількість параметрів більша від кількості рівнянь. Тому залежно від призначення трансформатора вибирають критерій оптимізації, наприклад мінімум маси або вартості. Залежно від цього підбирається решта параметрів. Вибір параметрів залежить від рекомендацій посібників проектування. Оптимізація виконується двома етапами: визначення співвідношення розмірів, навантажень та оптимізування електромагнітних навантажень при заданих обмеженнях.

Для відповідності величини магнітного потоку номінальній потужності і обмотковим даним є урахування зміни насичення і значень індукції в елементах магнітного кола на основі більш точної методики розрахунку. Формули отримані на основі схеми заміщення, технічних рішень просторових ЕМС. Ці формули допускають певні допущення в межах окремих ділянок витків. Зі зміною геометричних співвідношень та мас також змінюються і величини середніх значень індукції і насичень ярем і стержнів. Для забезпечення коректних розраху-

нків необхідно враховувати ці зміни. Розрахунок проводиться за алгоритмом, де ми перевіряємо похибку збігу величин МРС відповідно до значень індукцій. Після цього визначається дійсна МРС та струм неробочого ходу з урахуванням відповідних втрат.

Наприкінці розрахунку визначаються маси, довжини витків, втрати короткого замикання, опори, відносні падіння напруг та визначаються графіки залежності ККД від навантаження за відповідними формулами.

Проектне завдання $U_1 = 400 \text{ В}$; $U_2 = 160 \text{ В}$; $S_2 = 40 \text{ кВА}$; $m = 3$; $f = 50 \text{ Гц}$; $\cos \varphi_2 = 1$; $\Delta U = 2 \%$;

Сумарна активна потужність вторинних обмоток триобмоткового трансформатора.

$$P_{2н} = k S_2 \cos \varphi_2 = 1.15 \cdot 40 \cdot 1 = 46 \text{ кВт.}$$

Попередній розрахунковий лінійний струм первинної обмотки

$$I_{1н} = P_{2н} \cdot \frac{10^3}{\sqrt{3} \cdot U_1 \cdot \eta_e \cos \varphi'_1} = 46 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.98 \cdot 0.912} = 74,3 \text{ А},$$

де $\cos \varphi'_1 = 1 / \sqrt{1 + 0,45^2} = 0,912$, $\eta_e = 0,98$ – попередні розрахункові енергетичні коефіцієнти трансформатора.

Номінальний лінійний струм вторинної обмотки триобмоткового трансформатора, А:

$$I_{21} = S_{21} \cdot \frac{10^3}{\sqrt{3} \cdot U_2} = 46 \cdot \frac{10^3}{\sqrt{3} \cdot 160} = 166 \text{ А}.$$

Попередні електромагнітні навантаження приймаються такими:

$$B_c = 1,3 \text{ Тл}; \Delta_1 = 250 \text{ А/см}^2; \Delta_2 = 270 \text{ А/см}^2.$$

Коефіцієнти напруг і потужностей первинної і вторинної обмоток:

$$k_{U1} = 1 - \frac{\Delta U\%}{200} = 1 - \frac{2}{200} = 0,99;$$

$$k_{U2} = 1 + \frac{\Delta U\%}{200} = 1 + \frac{2}{200} = 1,01;$$

$$k_{p2} = \frac{S_{21}}{P_{2H}} = \frac{46}{46} = 1.$$

Коефіцієнт початкових даних

$$k_{\text{пд}} = \frac{P_{2H} \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot B_c} \left(\frac{k_{U1}}{\Delta_1 \cdot \eta_e \cdot \cos \varphi'_1} + \frac{k_{U1} \cdot k_{p2}}{\Delta_2} \right);$$

$$k_{\text{пд}} = \frac{46 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 1,3} \left(\frac{0,99}{250 \cdot 0,98 \cdot 0,912} + \frac{1,01 \cdot 1}{270} \right) = 8683.$$

Коефіцієнт кута стержня ($\alpha_c = 15...30^\circ$, приймається $\alpha_c = 30^\circ$):

$$k_{\alpha 1} = \frac{\sin \frac{\alpha_c}{2}}{\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2}} = \frac{\sin \frac{30^\circ}{2}}{\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2}} = 0,232;$$

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

Коефіцієнт зміни маси магнітопроводу при $k_k = 1$ і $k_B = 1$

$$\begin{aligned}
k_M &= (a-1) \left(4 \sqrt[3]{3 / \left(\lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) \cdot k_{\alpha 2}^2 \right)} \right)^3 \times \\
&\times \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) \left(k_{\alpha 2} (\lambda_0 + 1,155) + 2,418 \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) \right); \\
k_M &= (a-1) \left(4 \sqrt[3]{3 / \left(\lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) \cdot 0,634^2 \right)} \right)^3 \times \\
&\times \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) \left(0,634 (\lambda_0 + 1,155) + 2,418 \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) \right).
\end{aligned}$$

Коефіцієнт зміни маси обмотки

$$\begin{aligned}
k_0 &= \lambda_0 \left(4 \sqrt[3]{3 / \left(\lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) k_{\alpha 2}^2 \right)} \right)^3 k_{\alpha 2}^2 \times \\
&\times (1,181(a-1) + 1,286 k_{\alpha 1} + 0,7195 k_{\alpha 2}); \\
k_0 &= \lambda_0 \left(4 \sqrt[3]{3 / \left(\lambda_0 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) 0,634^2 \right)} \right)^3 0,634^2 \times \\
&\times (1,181(a-1) + 1,286 \cdot 0,232 + 0,7195 \cdot 0,634).
\end{aligned}$$

Залежність маси АЧ від керованих змінних координат a і λ_0

$$k_a = k_M + 3\gamma_0 \cdot k_{zo} \cdot k_o / (\pi \cdot \gamma_c \cdot k_{zc}) = k_M + 3 \cdot 8900 \cdot 0,34 \cdot k_o / (\pi \cdot 7650 \cdot 0,91),$$

де $\gamma_0 = 8900 \text{ кг/м}^3$ - густина міді обмоткового проводу; k_{zo} - коефіцієнт заповнення обмоткового вікна, приймається рівним 0,34; $\gamma_c = 7650 \text{ кг/м}^3$ - густина електротехнічної сталі 2412; $k_{zc} = 0,91$ - коефіцієнт заповнення магнітопроводу сталлю.

Геометрична оптимізація головних розмірів.

Оптимізація виконується за розрахунками k_a при варіації a і λ_0 .

Залежності $k_a = F(\alpha, \lambda_0)$ при зміні координат $a = 1,4, 1,41 \dots 2,4$; $\lambda_0 = 2 \dots 3$ наведено на рис. 3.2.

Згідно з указаними залежностями оптимальними координатами при $\alpha_c = 30^\circ$ визначені $a = 1,85$ і $\lambda_0 = 3$.

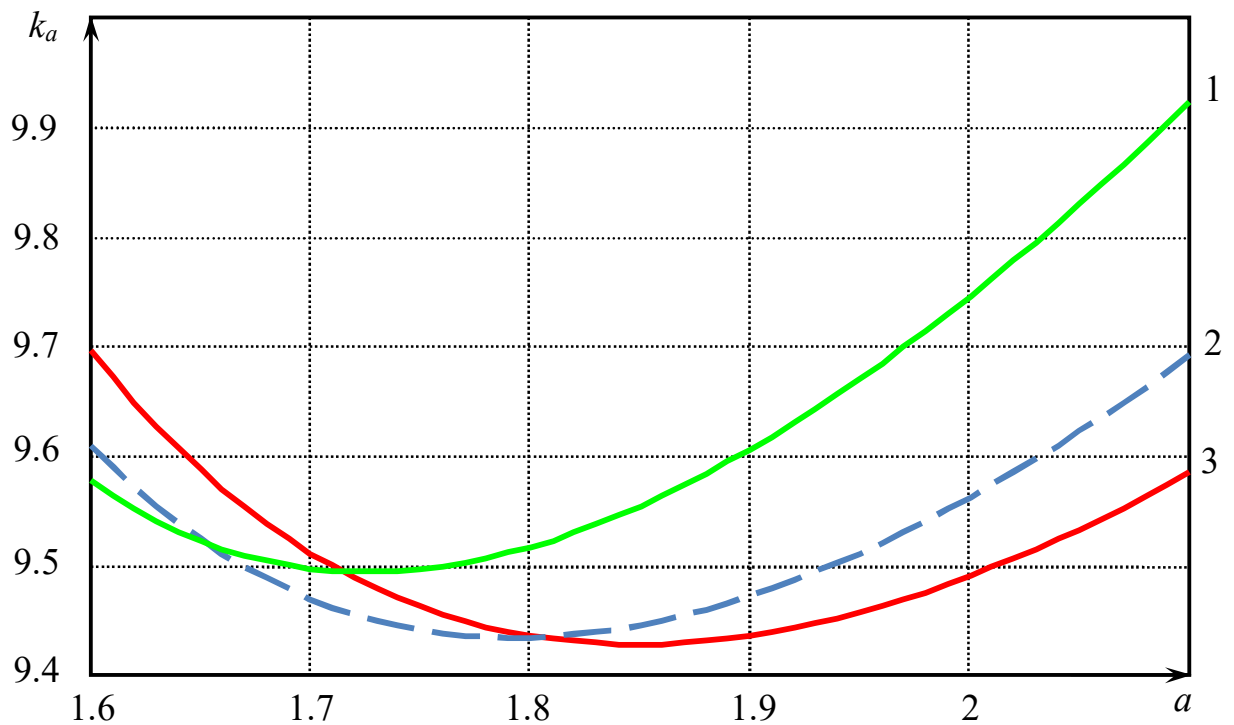


Рисунок 3.2. – Залежності $k_a = F(\alpha, \lambda_0)$ при зміні координат a та λ_0

1 - $\lambda_0 = 2,5$, 2 - $\lambda_0 = 2,8$, 3 - $\lambda_0 = 3$, 4 - $\lambda_0 = 3,5$.

Внутрішні діаметри описаного кола магнітопроводу, см:

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

$$= \sqrt[4]{\frac{3 \cdot 8683}{\pi \cdot 0,34 \cdot 0,91 \cdot 3(1,85-1) \left(\frac{1,85-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) 0,634^2}} = 16,575;$$

$$D'_B = \frac{D_B}{\left(\cos \frac{\alpha_c}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{\alpha_c}{2} \right)} = \frac{16,575}{\cos \frac{30^\circ}{2} + \frac{1}{\sqrt{3}} \sin \frac{30^\circ}{2}} = 14,86.$$

Зовнішній діаметр описаного кола магнітопроводу

$$D_3 = a \cdot D_B = 1,85 \cdot 16,575 = 30,663 \text{ см.}$$

Ширина обмоткового вікна магнітопроводу

$$b_0 = k_{\alpha 2} \cdot D_B = 0,634 \cdot 16,575 = 10,508 \text{ см.}$$

Ширина стержня

$$b_c = k_{\alpha 1} \cdot D_B = 0,232 \cdot 16,575 = 3,846 \text{ см.}$$

Висота обмоткового вікна магнітопроводу

$$h_0 = \lambda_0 \cdot b_0 = 3 \cdot 10,508 = 31,524 \text{ см.}$$

Площа перерізу стержня

$$\begin{aligned} \Pi_c &= \frac{\pi}{3} k_{3c} \cdot D_B^2 (a-1) \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right) = \\ &= \frac{\pi}{3} 0,91 \cdot 16,575^2 (1,85-1) \left(\frac{1,85-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right) = 77,1 \text{ см}^2. \end{aligned}$$

Довжина ярма трансформатора

$$l_{\text{я}} = \frac{D_3 - D_{\text{в}}}{2} = \frac{30,663 - 16,575}{2} = 7,044 \text{ см.}$$

Висота ярма трансформатора

$$h_{\text{я}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot k_{\text{в}} \cdot D_{\text{в}} \left(\frac{a-1}{4} + \frac{k_{\alpha 1}}{\sqrt{3}} \right)}{3 \cdot \sqrt{3}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 1 \cdot 16,575 \left(\frac{1,85-1}{4} + \frac{0,232}{\sqrt{3}} \right)}{3 \cdot \sqrt{3}} = 6,944 \text{ см.}$$

Площі перерізу витків первинної і вторинної обмоток при з'єднанні трикутник/зірка, см^2

$$P'_{\text{еф1}} = \frac{I_{1\text{н}}}{\sqrt{3}\Delta_1} = \frac{74,3}{\sqrt{3} \cdot 250} = 0,172;$$

$$P'_{\text{еф2}} = \frac{I_2}{\Delta_2} = \frac{166}{270} = 0,615.$$

Діаметри та кількість елементарних провідників в ефективному :

$$n_{\text{ел1}} = \frac{P'_{\text{еф1}}}{S_{\text{ел1}}} = \frac{0,172}{0,044} = 4; \quad n_{\text{ел2}} = \frac{P'_{\text{еф2}}}{S_{\text{ел2}}} = \frac{0,615}{0,044} = 14,1.$$

Для первинної і вторинної обмоток обираються круглі мідні проводи марки ПЕТ-155. з таблиці діаметрів і площ перерізів названих проводів обирається кількість елементарних провідників і стандартні діаметри з площами перерізів $P_{\text{еф1}}$, $P_{\text{еф2}}$ найбільш близькими до розрахункових: $S_{\text{ел1}} = 0,044 \text{ мм}^2$ ($d_1 = 0,224 \text{ см}$, $d_{1i} = 0,2340 \text{ см}$ – діаметри неізолюваного й ізолюваного провідників) ; $S_{\text{ел2}} = 0,044 \text{ мм}^2$ ($d_2 = 0,224 \text{ см}$, $d_{2i} = 0,234 \text{ см}$ – діаметри неізолюваного й ізолюваного провідників).

Уточнення електромагнітних навантажень:

$$\Delta_1 = \frac{I_{1н}}{\sqrt{3}\Pi_{\text{эф}1}} = \frac{74,3}{\sqrt{3} \cdot 0,172} = 250 \text{ A/cm}^2;$$

$$\Delta_2 = \frac{I_2}{\Pi_{\text{эф}2}} = \frac{166}{0,615} = 270 \text{ A/cm}^2;$$

$$B_c = \frac{P_2 \cdot 10^7}{6,66 \cdot f \cdot k_{\text{нд}}} \left(\frac{k_{U1}}{\Delta_1 \eta \cdot \cos \varphi'_1} + \frac{k_{U2} \cdot k_{p2}}{\Delta_2} \right);$$

$$B_c = \frac{46 \cdot 10^7}{6,66 \cdot 50 \cdot 8683} \left(\frac{0,99}{250 \cdot 0,98 \cdot 0,912} + \frac{1,01 \cdot 1}{270} \right) = 1,3 \text{ Тл}.$$

Число витків обмоток:

$$w_1 = k_{U1} \cdot \frac{U_1 \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = 0,99 \cdot \frac{400 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 1,3 \cdot 77,1} = 178.$$

Через те, що завдяки підмагнічуванню можливо підтримувати напругу не на максимальному рівні, а на 94% від нього, при виборі кількості витків вторинної обмотки отриману кількість витків необхідно розділити на коефіцієнт 0,94.

$$w_2 = k_{U2} \cdot \frac{U_2 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 0,94 \cdot f \cdot B_c \cdot \Pi_c} = 1,01 \cdot \frac{160 \cdot 10^4}{4,44 \cdot 50 \cdot 0,94 \cdot 1,3 \cdot 77,1} = 41,9.$$

Обираємо $w_2 = 42$.

Розрахунок розподілу індукції в технологічному зазорі та струму неробочого ходу

У магнітопроводі використовується стрічкова нетекстурована ($\chi_\mu = 1$) холоднокатана електротехнічна сталь марки 2412. Технологічний стиковий зазор приймається рівним 0,05 мм та забезпечується шліфовкою стикових поверхонь.

На середній ділянці зазору (радіус округлення стержня R_{ccc}) приймаємо індукція $B_{\delta\text{c}} = B_{\text{c}} = 1,45$ Тл та за кривою намагнічування визначається магнітна напруженість середньої ділянки стержня $H_{\text{cc}} = 17,5$ А/см.

Радіус скруглення стержня на середній ділянці

$$R_{\text{ccc}} = \frac{l_{\text{я}}}{2} = \frac{7,04}{2} = 3,522 \text{ см.}$$

Еквівалентний стиковий зазор на радіусі

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_0 + b_c + 2\pi R_{\text{ccc}}/3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{\text{ccc}}/3} = \\ &= 0,005 \frac{10 \cdot 0,005 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 3,522/3}{10 \cdot 0,005 + 3,846 + 2\pi \cdot 3,522/3} = 0,0096 \text{ см.} \end{aligned}$$

Значення МРС у технологічному зазорі на середній ділянці

$$F_{\delta\text{c}} = \frac{2B_{\delta\text{c}} \cdot \delta' 10^{-4}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,45 \cdot 9,661 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-9}} = 223 \text{ А.}$$

Значення МРС у стержні па середній ділянці

$$F_{\text{cc}} = H_{\text{cc}} \cdot h_0 = 17,5 \cdot 31,524 = 551,6 \text{ А.}$$

Полюсний поділ середньої ділянки

$$\tau_{\text{c}} = 1,5b_0 + \pi(R_{\text{ccc}} + b_{\text{c}}/\sqrt{3}) = 1,5 \cdot 10,508 + \pi(3,522 + 3,846/\sqrt{3}) = 33,8 \text{ см.}$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для середньої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_{\text{c}} &= \frac{2h_{\text{я}}}{(1-k_3)\tau_{\text{c}}} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot h_{\text{я}}/\tau_{\text{c}})} + \frac{k_3}{3 \cdot \text{th}(3 \cdot \pi \cdot h_{\text{я}}/\tau_{\text{c}})} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 6,944}{(1-0,3)33,8} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 6,944/33,8)} + \frac{0,3}{3 \text{th}(3\pi \cdot 6,944/33,8)} \right) = 1,09 \end{aligned}$$

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

Індукція в ярмі на середній ділянці

$$B_{яс} = B_{\delta c} \left(2\pi(R_{ccc} + b_c / \sqrt{3}) / 3 \right) / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ = 1,45 \cdot \left(2 \cdot \pi(3,522 + 3,846 / \sqrt{3}) / 3 \right) / (6,944 \cdot \sqrt{3}) = 1,45 \text{ Тл.}$$

За кривою намагнічування визначається магнітна напруженість ярма на середній ділянці: при $B_{яс} = 1,45 \text{ Тл.}$ $H_{яс} = 17,25 \text{ А/см.}$

МРС ярма для середньої ділянки

$$F_{яс} = \zeta_c \cdot 2 \cdot H_{яс} (h_{я} + b_o + b_c + 2 \cdot \pi \cdot R_{ccc} / 3) / \sqrt{3} = \\ = 1,094 \cdot 2 \cdot 17,5 \cdot (6,944 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 3,522 / 3) / \sqrt{3} = 633,3 \text{ А.}$$

Значення сумарної МРС середньої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\sum c}^{\prime} = F_{\delta c} + F_{cc} + F_{яс} = 223 + 633,6 + 551,6 = 1408 \text{ А.}$$

Приймається кількість розрахункових ділянок, на які поділено ярмо, $n = 5$ та визначається довжина $\Delta l_{я}$ і радіус R_{cc1} округлення першого елементу ярма, см :

$$\Delta l_{я} = l_{я} / n = 7,04 / 5 = 1,49$$

$$R_{cc1} = \Delta l_{я} / 2 = 1,409 / 2 = 0,704$$

Еквівалентний стиковий зазор на радіусі R_{cc1}

$$\delta' = \delta_m \frac{10\delta_m + b_0 + b_c + 2\pi R_{cc1} / 3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc1} / 3} = \\ = 0,005 \frac{10 \cdot 0,005 + 10,508 + 3,384 + 2\pi \cdot 0,704 / 3}{10 \cdot 0,005 + 3,384 + 2\pi \cdot 0,704 / 3} = 0,015 \text{ см.}$$

Приймається індукція в технічному зазорі на першій ділянці $B_{\delta 1} = 1,54$ Тл та за кривою намагнічування визначається магнітна напруженість першої ділянки стержня $H_{c1} = 33$ А/см.

Значення МРС у технологічному зазорі на першій ділянці

$$F_{\delta 1} = \frac{2B_{\delta 1} \cdot \delta \cdot 10^{-4}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,51 \cdot 15,5 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-9}} = 373 \text{ А.}$$

Значення МРС у стержні на першій ділянці

$$F_{c1} = H_{c1} \cdot h_0 = 33,8 \cdot 31,52 = 1065 \text{ А.}$$

Полюсний поділ першої ділянки

$$\tau_1 = 1,5b_0 + \pi(R_{cc1} + b_c / \sqrt{3}) = 1,5 \cdot 10,51 + \pi(0,704 + 3,84 / \sqrt{3}) = 24,95 \text{ см.}$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі першої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_1 &= \frac{2h_{я}}{(1-k_3)\tau_1} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot h_{я} / \tau_1)} + \frac{k_3}{3 \cdot \text{th}(3 \cdot \pi \cdot h_{я} / \tau_1)} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 6,944}{(1-0,3) \cdot 24,95} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 6,944 / 24,95)} + \frac{0,3}{3 \text{th}(3\pi \cdot 6,944 / 24,95)} \right) = 1,211. \end{aligned}$$

Індукція в ярмі на першій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я1} &= B_{\delta 1} \left(2\pi(R_{cc1} + b_c / \sqrt{3}) / 3 \right) / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,54 \cdot \left(2 \cdot \pi(0,704 + 3,84 / \sqrt{3}) / 3 \right) / (6,94 \cdot \sqrt{3}) = 0,784 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Де згідно таблиці для $B_{я1}=0,784$ Тл, $H_{я1}=1,27$ А/см.

МРС ярма для першої ділянки

$$F_{я1} = \zeta_1 \cdot 2 \cdot H_{я1} (h_{я} + b_o + b_c + 2 \cdot \pi \cdot R_{cc1} / 3) / \sqrt{3} =$$

$$= 1,211 \cdot 2 \cdot 1,27 \cdot (6,94 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 0,704 / 3) / \sqrt{3} = 40,43 \text{ А.}$$

Значення сумарної МРС першої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F''_{\Sigma 1} = F_{\delta 1} + F_{c1} + F_{я1} = 362,3 + 1040 + 40,43 = 1443 \text{ А.}$$

Перевірка відносної похибки МРС першої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| \frac{(F''_{\Sigma 1} - F'_{\Sigma c})}{F''_{\Sigma 1}} \right| = \left| \frac{1443 - 1408,24}{1443} \right| = 0,024.$$

Похибка заходиться в допустимих межах, тому індукція прийнята правильно.

Радіус елемента ярма на другій ділянці

$$R_{cc2} = R_{cc1} + \Delta l_{я} = 0,704 + 1,41 = 2,1 \text{ см.}$$

Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc2}

$$\delta' = \delta_m \frac{10\delta_m + b_0 + b_c + 2\pi R_{cc2} / 3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc2} / 3} =$$

$$= 0,005 \frac{10 \cdot 0,005 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 2,113 / 3}{10 \cdot 0,005 + 3,846 + 2\pi \cdot 2,113 / 3} = 0,011 \text{ см.}$$

Приймається індукція в технологічному зазорі на другій ділянці $B_{\delta 2} = 1,54$ Тл та за кривою намагнічування визначається магнітна напруженість другої ділянки стержня $H_{c2} = 33 \text{ А/см.}$

Значення МРС у технологічному зазорі на другій ділянці

$$F_{\delta 2} = \frac{2B_{\delta 2} \cdot \delta' 10^{-4}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,54 \cdot 0,113 \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-9}} = 277,3 \text{ А.}$$

Значення МРС у стержні на другій ділянці

$$F_{c2} = H_{c2} \cdot h_0 = 33 \cdot 31,52 = 1040 \text{ А.}$$

Полюсний поділ другої ділянки

$$\tau_2 = 1,5b_0 + \pi(R_{cc2} + b_c / \sqrt{3}) = 1,5 \cdot 10,508 + \pi \cdot (2,113 + 3,846 / \sqrt{3}) = 29,377 \text{ см.}$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі для другої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_2 &= \frac{2h_{я}}{(1-k_3)\tau_2} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot h_{я} / \tau_2)} + \frac{k_3}{3 \cdot \text{th}(3 \cdot \pi \cdot h_{я} / \tau_2)} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 6,944}{(1-0,3) \cdot 29,377} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 6,944 / 29,377)} + \frac{0,3}{3 \text{th}(3\pi \cdot 6,944 / 29,377)} \right) = 1,14. \end{aligned}$$

Індукція в ярмі на другій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я2} &= B_{\delta 2} (2\pi(R_{cc2} + b_c / \sqrt{3}) / 3) / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,54 \cdot (2 \cdot \pi(2,113 + 3,846 / \sqrt{3}) / 3) / (6,944 \cdot \sqrt{3}) = 1,162 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Де згідно таблиці для $B_{я2}=1,162 \text{ Тл}$, $H_{я2}=3,55 \text{ А/см}$.

МРС ярма для другої ділянки

$$\begin{aligned} F_{я2} &= \zeta_2 \cdot 2 \cdot H_{я2} (h_{я} + b_o + b_c + 2 \cdot \pi \cdot R_{cc2} / 3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,14 \cdot 2 \cdot 3,55 \cdot (6,944 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 2,113 / 3) / \sqrt{3} = 120 \text{ А.} \end{aligned}$$

Значення сумарної МРС другої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F''_{\Sigma 2} = F_{\delta 2} + F_{c2} + F_{я2} = 277,3 + 1040 + 120 = 1438 \text{ А.}$$

Перевірка відносної похибки МРС другої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| \frac{F''_{\Sigma 2} - F'_{\Sigma c}}{F''_{\Sigma 2}} \right| = \left| \frac{1437,7 - 1408}{1437,7} \right| = 0,021.$$

Похибка знаходиться в допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

Радіус елемента ярма на четвертій ділянці

$$R_{cc4} = R_{ccc} + \Delta l_{я} = 3,522 + 1,409 = 5 \text{ см.}$$

Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc4}

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_0 + b_c + 2\pi R_{cc4} / 3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc4} / 3} = \\ &= 0,005 \cdot \frac{10 \cdot 0,005 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 5 / 3}{10 \cdot 0,005 + 3,846 + 2\pi \cdot 5 / 3} = 8,694 \cdot 10^{-3} \text{ см.} \end{aligned}$$

Приймається індукція в технологічному зазорі на четвертій ділянці $B_{\delta 4} = 1,22 \text{ Тл}$ та за кривою намагнічування визначається магнітна напруженість четвертої ділянки стержня $H_{c4} = 4,23 \text{ А/см.}$

Значення МРС у технологічному зазорі на четвертій ділянці

$$F_{\delta 4} = \frac{2B_{\delta 4} \cdot \delta' 10^{-4}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,22 \cdot 8,694 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-9}} = 168,8 \text{ А.}$$

Значення МРС у стержні на четвертій ділянці

$$F_{c4} = H_{c4} \cdot h_0 = 4,23 \cdot 31,523 = 133,3 \text{ А.}$$

Полюсний поділ четвертої ділянки

$$\tau_4 = 1,5b_0 + \pi(R_{cc4} + b_c / \sqrt{3}) = 1,5 \cdot 10,508 + \pi \cdot (5 + 3,846 / \sqrt{3}) = 38,23 \text{ см.}$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі четвертої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_4 &= \frac{2h_{я}}{(1-k_3)\tau_4} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot h_{я} / \tau_4)} + \frac{k_3}{3 \cdot \text{th}(3 \cdot \pi \cdot h_{я} / \tau_4)} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 6,944}{(1-0,3) \cdot 38,3} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 6,944 / 38,3)} + \frac{0,3}{3 \text{th}(3\pi \cdot 6,944 / 38,3)} \right) = 1,061. \end{aligned}$$

Індукція в ярмі на четвертій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я4} &= B_{\delta 4} (2\pi(R_{cc4} + b_c / \sqrt{3}) / 3) / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,22 \cdot (2 \cdot \pi(5 + 3,846 / \sqrt{3}) / 3) / (6,944 \cdot \sqrt{3}) = 1,519 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Де згідно таблиці для $B_{я4}=1,5 \text{ Тл}$, $H_{я4}=28,7 \text{ А/см}$.

МРС ярма для четвертої ділянки

$$\begin{aligned} F_{я4} &= \zeta_4 \cdot 2 \cdot H_{я4} (h_{я} + b_0 + b_c + 2 \cdot \pi \cdot R_{cc4} / 3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,061 \cdot 2 \cdot 28,7 \cdot (6,944 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 5 / 3) / \sqrt{3} = 1113 \text{ А.} \end{aligned}$$

Значення сумарної МРС четвертої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F_{\sum 4}'' = F_{\delta 4} + F_{c4} + F_{я4} = 168,8 + 133,3 + 1113 = 1415 \text{ А.}$$

Перевірка відносної похибки МРС четвертої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| \frac{(F''_{\Sigma 4} - F'_{\Sigma c})}{F''_{\Sigma 4}} \right| = \left| \frac{1415 - 1408}{1415} \right| = 0,454.$$

Похибка знаходиться в допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

Радіус елемента ярма на п'ятій ділянці

$$R_{cc5} = R_{cc4} + \Delta l_{\text{я}} = 5 + 1,409 = 6,34 \text{ см.}$$

Еквівалентний стиковий проміжок на радіусі R_{cc5}

$$\begin{aligned} \delta' &= \delta_m \frac{10\delta_m + b_0 + b_c + 2\pi R_{cc5} / 3}{10\delta_m + b_c + 2\pi R_{cc5} / 3} = \\ &= 0,005 \cdot \frac{10 \cdot 0,005 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 6,34 / 3}{10 \cdot 0,005 + 3,846 + 2\pi \cdot 6,34 / 3} = 8,059 \cdot 10^{-3} \text{ см.} \end{aligned}$$

Приймається індукція в технологічному зазорі на п'ятій ділянці $B_{\delta 5} = 1,02 \text{ Тл}$ та за кривою намагнічування визначається магнітна напруженість п'ятої ділянки стержня $H_{c5} = 2,30 \text{ А/см.}$

Значення МРС у технологічному зазорі на п'ятій ділянці

$$F_{\delta 5} = \frac{2B_{\delta 5} \cdot \delta' \cdot 10^{-4}}{\mu_0} = \frac{2 \cdot 1,02 \cdot 8,059 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-4}}{4\pi \cdot 10^{-9}} = 130,8 \text{ А.}$$

Значення МРС у стержні на п'ятій ділянці

$$F_{c5} = H_{c5} \cdot h_0 = 2,30 \cdot 31,5 = 72,5 \text{ А.}$$

Полюсний поділ п'ятої ділянки

$$\tau_5 = 1,5b_0 + \pi(R_{cc5} + b_c / \sqrt{3}) = 1,5 \cdot 10,508 + \pi \cdot (6,34 + 3,846 / \sqrt{3}) = 42,65 \text{ см.}$$

Коефіцієнт нерівномірності розподілу індукції у ярмі п'ятої ділянки

$$\begin{aligned} \zeta_5 &= \frac{2h_{я}}{(1-k_3)\tau_5} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot h_{я} / \tau_5)} + \frac{k_3}{3 \cdot \text{th}(3 \cdot \pi \cdot h_{я} / \tau_5)} \right) = \\ &= \frac{2 \cdot 6,944}{(1-0,3) \cdot 42,65} \left(\frac{1}{\text{th}(\pi \cdot 6,944 / 42,65)} + \frac{0,3}{3 \text{th}(3\pi \cdot 6,944 / 42,65)} \right) = 1,038. \end{aligned}$$

Індукція в ярмі на п'ятій ділянці

$$\begin{aligned} B_{я5} &= B_{\delta 5} \left(2\pi(R_{cc5} + b_c / \sqrt{3}) / 3 \right) / (h_{я} \sqrt{3}) = \\ &= 1,02 \cdot \left(2 \cdot \pi(6,34 + 3,84 / \sqrt{3}) / 3 \right) / (6,944 \cdot \sqrt{3}) = 1,52 \text{ Тл.} \end{aligned}$$

Де згідно таблиці для $B_{я5} = 1,52 \text{ Тл}$, $H_{я4} = 28,7 \text{ А/см}$.

МРС ярма для п'ятої ділянки

$$\begin{aligned} F_{я5} &= \zeta_5 \cdot 2 \cdot H_{я5} (h_{я} + b_o + b_c + 2 \cdot \pi \cdot R_{cc5} / 3) / \sqrt{3} = \\ &= 1,038 \cdot 2 \cdot 28,7 \cdot (6,944 + 10,508 + 3,846 + 2\pi \cdot 6,34 / 3) / \sqrt{3} = 1190 \text{ А.} \end{aligned}$$

Значення сумарної МРС п'ятої ділянки магнітного кола трансформатора

$$F''_{\Sigma 5} = F_{\delta 5} + F_{c5} + F_{я5} = 130,8 + 72,5 + 1190 = 1393 \text{ А.}$$

Перевірка відносної похибки МРС п'ятої ділянки відносно МРС на середній ділянці

$$\left| \frac{F''_{\Sigma 5} - F'_{\Sigma c}}{F''_{\Sigma 5}} \right| = \left| \frac{1393 - 1408}{1393} \right| = 0,011.$$

Похибка знаходиться в допустимих межах, тому розрахунок не потрібно повторювати.

Значення середньої розрахункової індукції, Тл

$$B_{cp} = \frac{B_{\delta 1}(b_c + 2\pi R_{cc1} / 3) + B_{\delta 2}(b_c + 2\pi R_{cc2} / 3) + B_{\delta c}(b_c + 2\pi R_{ccc} / 3)}{n(b_c + \pi \cdot l_{я} / 3)} +$$

$$+ \frac{B_{\delta 4}(b_c + 2\pi R_{cc4} / 3) + B_{\delta 5}(b_c + 2\pi R_{cc5} / 3)}{n(b_c + \pi \cdot l_{я} / 3)};$$

$$B_{cp} = \frac{1,54(3,84 + 2\pi \cdot 0,704 / 3) + 1,54(3,84 + 2\pi \cdot 2,11 / 3) + 1,45(3,84 + 2\pi \cdot 3,52 / 3)}{5(3,846 + \pi \cdot 7,044 / 3)} +$$

$$+ \frac{1,22(3,84 + 2\pi \cdot 5 / 3) + 1,02(3,84 + 2\pi \cdot 6,34 / 3)}{5(3,84 + \pi \cdot 7,044 / 3)} = 1,282.$$

Перевірка відносної розрахункової похибки середньої індукції

$$\left| \frac{B_{cp} - B_c}{B_{cp}} \right| = \left| \frac{1,282 - 1,3}{1,282} \right| = -0,014.$$

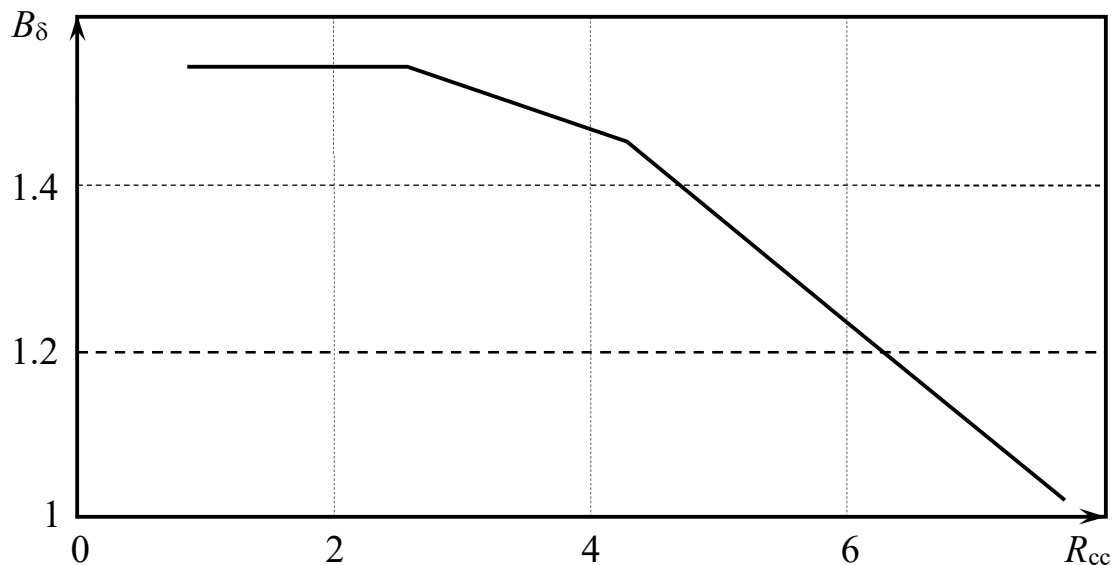


Рисунок 2.14. – Розрахункова крива розподілу індукції в магнітопроводі.

Значення $B_{cp}=1,282$ Тл відповідає сумарна МРС $F_{\Sigma} = 1419$ А.

Реактивна складова СНХ

$$I_{0p} = \frac{F_{\Sigma c}}{\sqrt{2} w_1 \cdot k_v} = \frac{1419}{\sqrt{2} \cdot 178 \cdot 1,28} = 4,405 \text{ А.}$$

де $k_v=1,28$ – коефіцієнт, який ураховує наявність у намагнічуючої струмі вищих гармонік.

Розрахункова величина індукції кутових зон ярма просторового стикового магнітопроводу визначається за виразами, Тл:

$$B_{k1} = 0,87(B_{\delta 1} + B_{я1}) / 2 = 0,87(1,54 + 0,784) / 2 = 1,011$$

$$B_{k2} = 0,87(B_{\delta 2} + B_{я2}) / 2 = 0,87(1,45 + 1,45) / 2 = 1,262$$

$$B_{kc} = 0,87(B_{\delta c} + B_{яc}) / 2 = 0,87(1,02 + 1,52) / 2 = 1,105$$

$$B_{k4} = 0,87(B_{\delta 4} + B_{я4}) / 2 = 0,87(1,54 + 1,162) / 2 = 1,175$$

$$B_{k5} = 0,87(B_{\delta 5} + B_{я5}) / 2 = 0,87(1,22 + 1,519) / 2 = 1,192$$

Коефіцієнт додаткових утрат від третьої гармоніки поля у ярмі

$$k_{Д3i} = 1 + 0,55((k_{Bi} / 1.11)^2 - 1) = 1 + 0,55((1.35 / 1.11)^2 - 1) = 1,264,$$

де k_{Bi} – коефіцієнт форми кривої індукції, який для діапазону $k_{яi}$ від 1,0 до 1,5 Тл може бути прийнятим у межах від 1,28 до 1,43.

Коефіцієнти об'ємних утрат елементів магнітопроводу :

$$k_{pc} = 3h_0 \Delta l_{я} P_{1/50} \left(\frac{f}{50} \right)^{1.5} \left[\begin{aligned} & \frac{2}{3} \pi \left(R_{cc1} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 1}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{cc2} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 2}^2 + \\ & + \frac{2}{3} \pi \left(R_{ccc} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta c}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{cc4} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 4}^2 + \\ & + \frac{2}{3} \pi \left(R_{cc5} + \frac{b_c}{\sqrt{3}} \right) B_{\delta 5}^2 \end{aligned} \right];$$

$$k_{\text{pc}} = 3 \cdot 31,524 \cdot 1,409 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \times$$

$$\times \left(\frac{2}{3} \pi \left(0,704 + \frac{3,864}{\sqrt{3}} \right) 1,54^2 + \frac{2}{3} \pi \left(2,113 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) 1,54^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3} \pi \left(3,522 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) 1,45^2 + \frac{2}{3} \pi \left(5 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) 1,22^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3} \pi \left(6,34 + \frac{5,34}{\sqrt{3}} \right) 1,02^2 \right) = 15670;$$

$$k_{\text{ря}} = 6b_0 h_{\text{я}} \Delta l_{\text{я}} P_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} k_{\text{ДЗ}} (B_{\text{я1}}^2 + B_{\text{я2}}^2 + B_{\text{я3}}^2 + B_{\text{я4}}^2 + B_{\text{я5}}^2);$$

$$k_{\text{ря}} = 6 \cdot 10,508 \cdot 6,944 \cdot 1,409 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \times$$

$$\times 1,264 \cdot (0,784^2 + 1,162^2 + 1,45^2 + 1,519^2 + 1,52^2) = 7787;$$

$$k_{\text{pk}} = 3h_{\text{я}} \Delta l_{\text{я}} P_{1/50} \left(\frac{f}{50}\right)^{1,5} k_{\text{ДЗ}} \times$$

$$\times \left(\frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc1}} + \frac{b_{\text{c}}}{\sqrt{3}} \right) B_{\kappa 1}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc2}} + \frac{b_{\text{c}}}{\sqrt{3}} \right) B_{\kappa 2}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{ccc}} + \frac{b_{\text{c}}}{\sqrt{3}} \right) B_{\kappa \text{c}}^2 + \right.$$

$$\left. \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc4}} + \frac{b_{\text{c}}}{\sqrt{3}} \right) B_{\kappa 4}^2 + \frac{2}{3} \pi \left(R_{\text{cc5}} + \frac{b_{\text{c}}}{\sqrt{3}} \right) B_{\kappa 5}^2 \right);$$

$$k_{\text{pk}} = 3 \cdot 6,944 \cdot 1,409 \cdot 1,15 \cdot \left(\frac{50}{50}\right)^{1,5} \cdot 1,264 \times$$

$$\times \left(\frac{2}{3} \pi \cdot \left(0,704 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) \cdot 1,011^2 + \frac{2}{3} \pi \cdot \left(2,113 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) \cdot 1,175^2 \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3} \pi \cdot \left(3,522 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) \cdot 1,262^2 + \frac{2}{3} \pi \cdot \left(5 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) \cdot 1,192^2 + \right.$$

$$\left. + \frac{2}{3} \pi \cdot \left(6,34 + \frac{3,846}{\sqrt{3}} \right) \cdot 1,105^2 \right) = 3459,$$

де $P_{1/50}$ - питомі втрати в електричній сталі при індукції 1 Тл і частоті переманічування 50 Гц .

Втрати в сталі трансформатора

$$P_c = 1,2 \cdot (k_{pc} + k_{p\pi} + k_{pk}) k_{3c} \gamma_c \cdot 10^{-6} =$$

$$= 1,2 \cdot (3459 + 7787 + 3459) \cdot 0,91 \cdot 7650 \cdot 10^{-6} = 224,9 \text{ Вт.}$$

Активна складова СНХ

$$I_{0a} = \frac{P_c}{3U_{\phi 1}} = \frac{224,9}{3 \cdot 400} = 0,187 \text{ А.}$$

Величина СНХ визначається виразом

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2} = \sqrt{4,405^2 + 0,187^2} = 4,409 \text{ А.}$$

Визначення втрат короткого замикання та характеристик

Середня довжина витка галетної обмотки

$$l_w = D_B (2,275(a-1) + 1,286k_{\alpha 1} + 0,7195k_{\alpha 2}) =$$

$$= 16,575 \cdot (2,275 \cdot (1,85 - 1) + 2 \cdot 0,232 + 1,571 \cdot 0,634) = 56,25 \text{ см.}$$

Маси провідникового матеріалу фаз первинної і вторинної обмоток трансформатора, кг.

$$m_{01} = \Pi_{\text{еф1}} w_1 l_w \gamma'_0 = 0,172 \cdot 178 \cdot 56,25 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 15,29;$$

$$m_{02} = \Pi_{\text{еф2}} w_2 l_w \gamma'_0 = 0,615 \cdot 42 \cdot 56,25 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 12,9,$$

де γ'_0 – питома маса провідникового матеріалу обмоток, для міді

$$\gamma'_0 = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг/см}^3.$$

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

$$P_{\text{ел1}} = P_{\text{елп}} \Delta_1^2 \Pi_{\text{еф1}} w_1 l_w \gamma'_0 = 2,4 \cdot (250 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,172 \cdot 178 \cdot 56,25 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 229,3;$$

$$P_{\text{ел2}} = P_{\text{елп}} \Delta_2^2 \Pi_{\text{еф2}} w_2 l_w \gamma'_0 = 2,4 \cdot (270 \cdot 10^{-2})^2 \cdot 0,615 \cdot 42 \cdot 56,25 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 226,1,$$

де $P_{\text{елп}} = 2,4 \text{ Вт} \cdot \text{А} / (\text{кг} \cdot \text{мм}^2)$ - питомі втрати міді.

Втрати короткого замикання:

$$P_{\text{к}} = 3(P_{\text{ел1}} + P_{\text{ел2}}) = 3 \cdot (229,3 + 226,1) = 1366 \text{ Вт}.$$

Відносні активні падіння напруги первинної і вторинної обмоток трансформатора, %:

$$\Delta U_{\text{а1\%}} = 100 P_{\text{ел1}} / (\sqrt{3} U_1 I_1) = 100 \cdot 229,3 / (\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 74,29) = 0,446;$$

$$\Delta U_{\text{а2\%}} = 100 P_{\text{ел2}} / (\sqrt{3} U_2 I_2) = 100 \cdot 226,1 / (\sqrt{3} \cdot 260 \cdot 166) = 0,492.$$

Активні опори обмоток трансформатора, Ом:

$$r_1 = P_{\text{ел1}} / I_{\text{ф1}}^2 = 229,3 / 42,9^2 = 0,125;$$

$$r_2 = P_{\text{ел2}} / I_{\text{ф2}}^2 = 226,1 / 165^2 = 0,0821,$$

де при заданій схемі з'єднань обмоток $I_{\text{ф2}} = I_2$.

Активні опори короткого замикання, Ом:

$$r_{\text{к12}} = r_1 + r_2 \left(\frac{w_1}{w_2} \right)^2 = 0,125 + 0,0821 \left(\frac{178}{42} \right)^2 = 0,272.$$

Ізоляційний проміжок між обмоткою та ярмом $\delta_{0я} = 1,5 \text{ см.}$

Ізоляційний проміжок між обмоткою та стрижнем $\delta_{0с} = 1,5 \text{ см.}$

Ізоляційний проміжок між обмотками ВН та НН $\delta_{0ВН} = 1,5 \text{ см.}$

Ізоляційний проміжок між обмотками, що розташовані на різних стрижнях $\delta_{0рс} = 1,5 \text{ см.}$

Площа перетину обмотки низької напруги

$$S_{\text{НН}} = d_{2i}^2 \cdot n_{\text{ел}2} \cdot w_2 = 0,234^2 \cdot 14 \cdot 42 = 32,2 \text{ см}^2.$$

Площа перетину обмотки високої напруги

$$S_{\text{ВН}} = d_{1i}^2 \cdot n_{\text{ел}1} \cdot w_1 = 0,234^2 \cdot 4 \cdot 178 = 39 \text{ см}^2.$$

Кількість секцій обмотки високої напруги $n_{k1} = 4.$

Кількість секцій обмотки низької напруги $n_{k2} = 4.$

Коефіцієнт заповнення секції обмотки $kzp = \frac{\pi}{4} = 0,785.$

Ширина обмоткової секції з точки зору виконання припустимих ізоляційних проміжків

$$b_{\text{секц}} = \frac{P'_{\text{еф}1} \cdot \frac{W_1}{kzp} + P'_{\text{еф}2} \cdot \frac{W_2}{kzp}}{h_0 - (n_{k1} + n_{k2} + 1) \cdot b_i} = \frac{S_{\text{НН}} + S_{\text{ВН}}}{h_0 - (n_{k1} + n_{k2} + 1) \cdot b_i} =$$

$$\frac{0,172 \cdot \frac{178}{0,785} + 0,615 \cdot \frac{42}{0,785}}{31,5 - 4 \cdot 4 \cdot 0,785} = 3,98 \text{ см}$$

Оскільки $2b_{\text{секц}}$ менший за b_0 , то виконання обмотки з точки зору ізоляції припустима.

Висота малої секції напруги

$$h_1 = P'_{\text{еф}1} \cdot \frac{W_1}{b_{\text{секц}} \cdot n_{k1} \cdot k_{zp}} = 0,172 \cdot \frac{178}{4 \cdot 4 \cdot 0,785} = 2,442 \text{ см.}$$

Висота великої секції напруги

$$h_2 = P'_{\text{еф}2} \cdot \frac{W_2}{b_{\text{секц}} \cdot n_{k2} \cdot k_{zp}} = 0,615 \cdot \frac{42}{4 \cdot 4 \cdot 0,785} = 2,442 \text{ см.}$$

Потужність первинної обмотки трансформатора

$$P_1 = P_2 / \eta_e = 46 / 0,98 = 46,94 \text{ Вт.}$$

Відносне індуктивне падіння напруги пар обмоток трансформатора, віднесені до потужності первинної обмотки, %

$$\begin{aligned} \Delta U_{L12} &= b_{\text{секц}} \cdot \frac{l_w (I_1 w_1 + I_2 w_2 P_1 / P_2)}{3,33 h_0 \Pi_c B_c} 10^{-2} = \\ &= 3,98 \cdot \frac{56,25 \cdot (74,23 \cdot 178 + 166 \cdot 42 \cdot 46,93 / 46)}{3,33 \cdot 31,52 \cdot 224,87 \cdot 1,3} = 1,48 \end{aligned}$$

Індуктивні падіння напруги окремих обмоток, %

$$\begin{aligned} \Delta U_{L1} &= \frac{I_1 w_1 l_w b_{\text{секц}} 10^{-2}}{3,33 \cdot h_0 \Pi_c B_c} = \frac{74,29 \cdot 178 \cdot 56,25 \cdot 3,98 \cdot 10^{-2}}{3,33 \cdot 31,524 \cdot 224,87 \cdot 1,3} = 0,965; \\ \Delta U_{L21} &= \Delta U_{L12} - \Delta U_{L1} = 1,48 - 0,965 = 0,519. \end{aligned}$$

Індуктивні опори короткого замикання пар обмоток трансформатора, приведені до первинної обмотки, Ом:

$$x_{k12} = x_1 + x'_2 = \frac{\Delta U_{L12} U_1}{100 I_1} = \frac{1,48 \cdot 400}{100 \cdot 74,29} = 0,08.$$

Опори короткого замикання трансформатора, Ом:

$$Z_{k12} = \sqrt{r_{k12}^2 + x_{k12}^2} = \sqrt{0,272^2 + 0,08^2} = 0,284.$$

Напруги короткого замикання пар обмоток трансформатора, %

$$U_{k12} \% = 100 I_1 Z_{k12} / U_1 = 100 \cdot 74,29 \cdot 0,28 / 400 = 5,267$$

Номінальна величина ККД трансформатора

$$\eta_H = P_2 / (P_2 + (P_c + P_k) 10^{-3}) = 46 / (46 + (224,87 + 1366) 10^{-3}) = 0,967.$$

Зміна напруги під навантаженням, %:

$$\begin{aligned} \Delta U_{121} &= \Delta U_{a1} \cos \varphi_1 + \Delta U_{a2} \cos \varphi_2 + \Delta U_{L1} \sin \varphi_1 + \Delta U_{L2} \sin \varphi_2 = \\ &= 0,446 \cdot 0,997 + 0,492 \cdot 1 + 0,664 \cdot 0,997 + 0,346 \cdot 0 = 0,936. \end{aligned}$$

Фазна напруга на вторинній обмотці, В:

$$U_{\phi 2} = U_1 (1 - \Delta U_{12} / 100) w_2 / w_1 = 400 \cdot (1 - 0,936 / 100) \cdot 42 / 178 = 93,5.$$

Маса магнітопроводу трансформатора

$$\begin{aligned} m_M &= \gamma'_c k_{3c} (3 \Pi_c h_0 + 6 (\Pi_c + b_0 l_{\text{я}}) h_{\text{я}}) = \\ &= 7,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,91 \cdot (3 \cdot 77,1 \cdot 31,524 + 6 \cdot (77,1 + 10,508 \cdot 7,45) \cdot 7,044) = 94,6 \text{ кг}. \end{aligned}$$

Маса АЧ трансформатора, кг

$$m_a = m_M + 3(m_{01} + m_{02}) = 94,6 + 3 \cdot (15,3 + 12,93) = 179,2.$$

Залежність ККД від навантаження

$$\eta = \frac{k_H S_2 \cos \varphi_2}{k_H S_2 \cos \varphi_2 + (k_H^2 P_k + P_c) \cdot 10^{-3}}$$

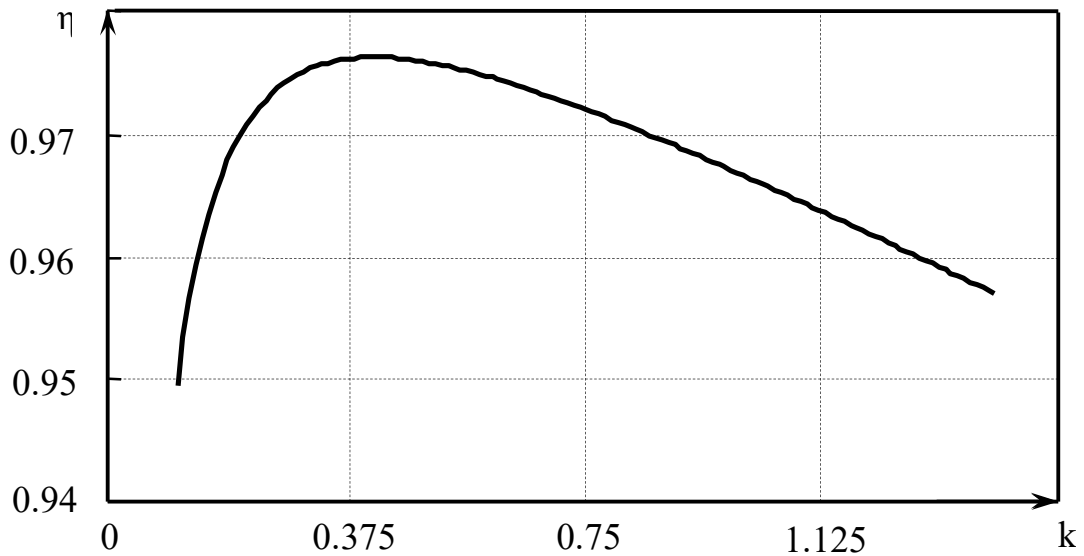


Рисунок 3.3. – Залежність ККД від навантаження

Креслення трансформатора у відповідності до виконаних розрахунків представлені на рис. 3.4 та рис. 3.5.

3.3. Розрахунок реактора трансформаторного типу із просторовим магніто проводом керованого поперечним підмагнічуванням

Конструкція реактора трансформаторного типу подібна до конструкції звичайного трансформатора з просторовим магнітопроводом. Відмінністю є збільшення висоти стрижня за рахунок розміщення магнітного шунта та наявність його у обмотковому вікні. Всі інші параметри магнітної системи та обмоток залишаються незмінними. Таким чином, основним завданням є розрахунок геометричних та електромагнітних параметрів шунта.

Для визначення геометричних параметрів шунта необхідно визначитись із його магнітними властивостями в крайніх режимах. Для початку визначимо у відносних одиницях параметри схеми заміщення, яка представлена на рис. 2.9.

Базисне намагнічуючої сили обираємо із розрахунку холостого ходу просторового трансформатора, який був виконаний у пункті 3.2. Для даного трансформатора справедливі наступні значення МРС на окремих ділянках магнітопроводу:

$$F_c = 551,6 \text{ A}; F_a = 633,3 \text{ A}; F_\delta = 223 \text{ A}.$$

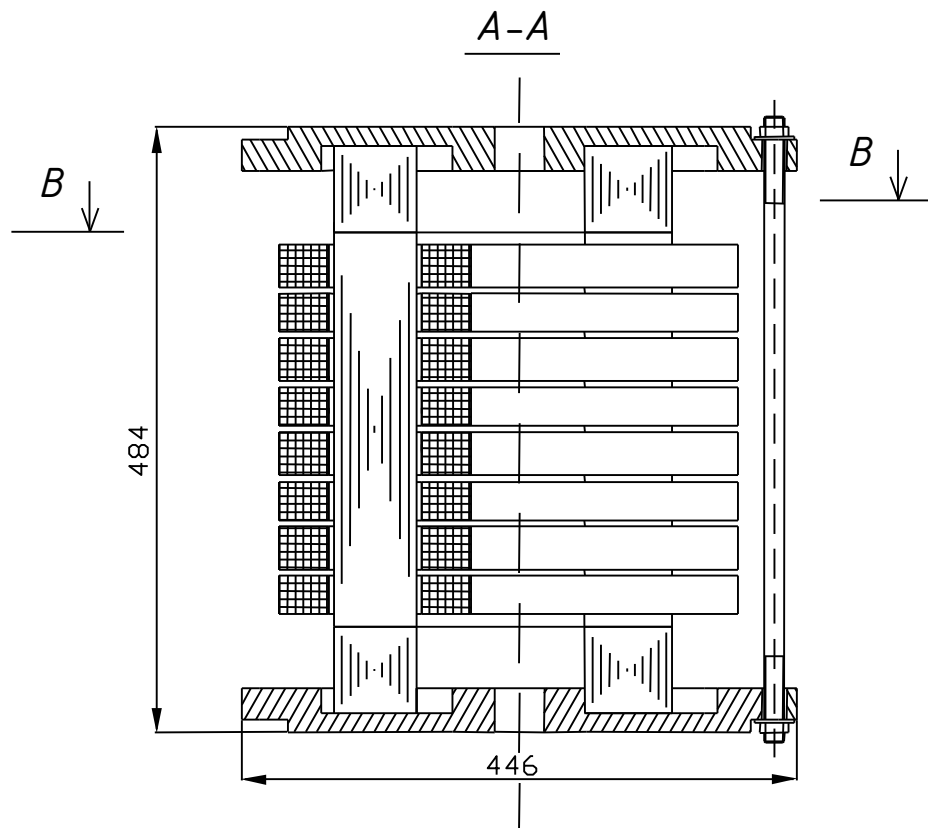


Рисунок 3.4 – Трифазний просторовий трансформатор, фронтальна проекція

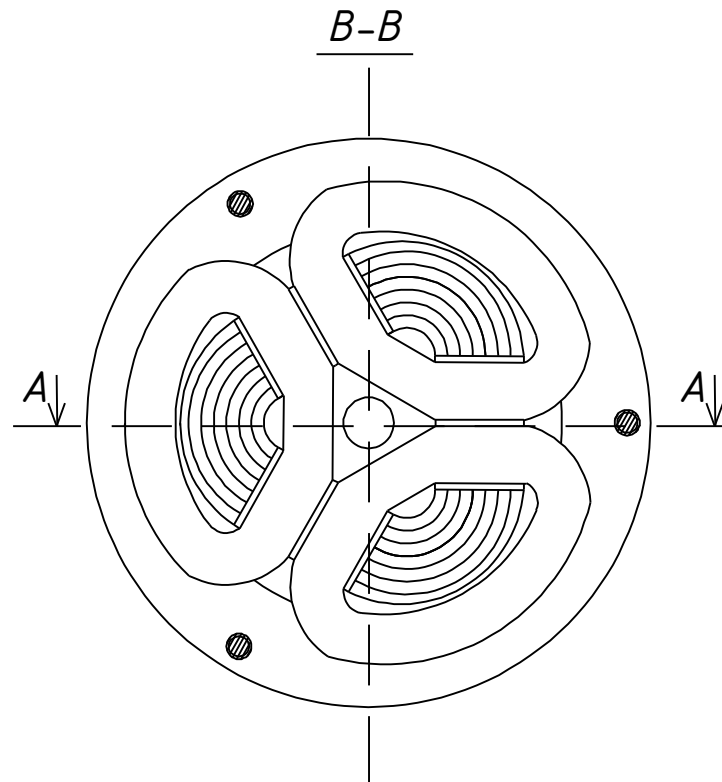


Рисунок 3.5. – Трифазний просторовий трансформатор, вид зверху

Для визначення геометричних параметрів шунта необхідно визначитись із його магнітними властивостями в крайніх режимах. Для початку визначимо у відносних одиницях параметри схеми заміщення, яка представлена на рис. 2.9.

Базисне намагнічуючої сили обираємо із розрахунку холостого ходу просторового трансформатора, який був виконаний у пункті 3.2. Для даного трансформатора справедливі наступні значення МРС на окремих ділянках магнітопроводу:

$$F_c = 551,6 \text{ А}; F_y = 633,3 \text{ А}; F_\delta = 223 \text{ А}.$$

Якщо прийняти за базисне значення МРС наступне:

$$F_{\text{баз}} = F_c + F_y + F_\delta = 1408 \text{ А},$$

та домовитись, що додаткова вторинна обмотка складає $x = 0,35$ частину загальної вторинної обмотки, тоді опори у схемі заміщення приймають наступні значення:

$$R_1 = \frac{x F_c}{2 F_{\text{баз}}} = \frac{0,4 \cdot 551,6}{2 \cdot 1408} = 0,078 \text{ в.о.};$$

$$R_2 = \frac{(2-x) F_c}{4 F_{\text{баз}}} + \frac{F_\delta}{2 F_{\text{баз}}} = \frac{(2-0,4) 551,6}{1408} + \frac{223}{2 \cdot 1408} = 0,236 \text{ в.о.};$$

$$R_3 = \frac{\sqrt{3} F_y}{2 F_{\text{баз}}} = \frac{\sqrt{3} \cdot 633,3}{2 \cdot 1408} = 0,39 \text{ в.о.}; R_4 = k_1 R_3,$$

де k_1 - коефіцієнт більший або рівний одиниці, який характеризує збільшення опору магнітної перемички за рахунок поперечного підмагнічування.

З розрахунків, виконаних у пункті 3.2, маємо струм холостого ходу $I_0 = 4,4 \text{ А}$, а номінальний фазний струм $I_{1\phi} = I_{1н} / \sqrt{3} = 42,3 \text{ А}$, тобто номінальний струм по відношенню до струму холостого ходу складає 9,75 в.о.

Сумісним рішенням рівнянь (2.16), (2.18), (2.21) та (2.22) визначаємо граничні параметри електромагнітної системи, приймаючи $I_{1A} = 1$ в.о.:

- при $\sigma_3 = 0,9$ маємо $I_{2A} = 0,1$ в.о., $|E_{1A}| = 3,3$ в.о. та $R_4 = 7,6 R_3$;
- при $\sigma_3 = 0,45$ маємо $I_{2A} = 0,55$ в.о., $|E_{1A}| = 9,9$ в.о. та $R_4 = 39,3 R_3$;

Таким чином, змінюючи опір магнітного шунта від $7,6 R_3$ до $39,3 R_3$, кратність зміни струму у первинній обмотці дорівнює 3.

Шунт розташовується поміж внутрішніх бічних сторін обмоткового вікна із повітряним зазором δ , який визначаємо із припущення, що його магнітний опір буде складати $3,3 R_3$:

$$\delta = \frac{\mu_0 3,3 F_{\text{я}}}{4 B_{\delta c} 10^{-4}} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^{-9} \cdot 3,3 \cdot 633,3}{4 \cdot 1,3 \cdot 10^{-4}} = 0,05 \text{ см.}$$

Висоту шунта обираємо із наступних міркувань. При $\sigma_3 = 0,9$ маємо $R_4 = 7,6 R_3$ та магнітний потік у шунті (формула 2.12) $I_{k7\min} = I_{R4\min} = 0,521$. По-перше, при відсутності шунта через ярмо протікає магнітний потік $1/\sqrt{3} = 0,577$, який у 1,11 разів більший, ніж $I_{R4\min}$, що дозволяє у стільки ж разів зменшити висоту шунта. По друге, повітряний зазор має магнітний опір $3,3 R_3$, а у режимі $\sigma_3 = 0,9$ шунт разом із магнітними зазорами повинен мати магнітний опір $7,6 R_3$, тобто на сам шунт приходить $4,3 R_3$. Це означає, що при тому ж магнітному потоці падіння магнітного потенціалу збільшиться у 4,3 рази. Якщо магнітну індукцію у шунті збільшити із 1,3 Тл до 1,5 Тл, то напруженість магнітного поля для сталі 2412 збільшиться із 5,85 А/см до 25 А/см, тобто у 4,3 разів. Це дозволяє ще зменшити висоту шунта у $k_{\text{ш}} = 1,5 / 1,3 = 1,154$ разів. Таким чином, висота шунта має бути менша за висоту ярма у $1,11 \cdot 1,154 = 1,28$ разів і складати:

$$h_{\text{ш}} = h_{\text{я}} / 1,28 = 6,94 / 1,28 = 5,42 \text{ см.}$$

Висота вторинної додаткової обмотки із урахуванням ізоляційного проміжку до поверхні шунта $\Delta = 5$ мм складає:

$$h_{22} = P'_{\text{ef2}} \cdot \frac{W_{21} \cdot x}{b_{\text{секц}} \cdot k_{zp}} + 2 \cdot \Delta = 0,615 \cdot \frac{42 \cdot 0,4}{4 \cdot 0,785} + 2 \cdot 0,5 = 4,3 \text{ см.}$$

Із креслення трансформатора із просторовим магнітопроводом (рис. 3.4 та рис. 3.5) маємо відстань від осі симетрії магнітопроводу до шпильки, що стягують магнітну систему, $l_{\text{ш}} = 20,5$ см. Таким чином, довжина середньої лінії магнітопроводу шунта:

$$l_{\text{сер.ш}} = 2(h_{22} + l_{\text{ш}} + 2h_{\text{ш}}) = 2(4,3 + 20,5 + 2 \cdot 4,87) = 69,08 \text{ см.}$$

При $\sigma_3 = 0,55$ маємо магнітний потік у шунті (формула 2.12) $I_{k7\text{max}} = I_{R4\text{max}} = 0,26$. Такий магнітний потік відповідає середній індукції у шунті при обраних його параметрах:

$$B_{\text{ш max}} = k_{\text{ш}} B_{\text{cp}} I_{R4\text{max}} / I_{R4\text{min}} = 1,154 \cdot 1,3 \cdot 0,26 / 0,521 = 0,749 \text{ Тл.}$$

Також у режимі $\sigma_3 = 0,45$ маємо $R_4 = 39,3 R_3$. Враховуючі магнітний опір повітряних зазорів у $3,3 R_3$, магнітний шунт повинен мати опір $36 R_3$. В цьому випадку при зміні магнітної індукції на $\Delta B = 0,15$ Тл приріст напруженості магнітного поля має бути:

$$\Delta H = \frac{36 \cdot \Delta B \cdot F_{\text{я}}}{B_{\text{с}} \cdot 2 \cdot (b_0 - 2\delta)} = \frac{36 \cdot 0,15 \cdot 633,3}{1,3 \cdot 2 \cdot (10,5 - 2 \cdot 0,05)} = 85 \text{ А/см.}$$

Такий приріст напруженості у відповідності до основної кривої намагнічування сталі 2412 маємо при магнітній індукції $B_{\text{нас}} = 1,76$ Тл. При цьому максимальне відхилення сумарної магнітної індукції у шунті від $B_{\text{нас}}$:

$$\Delta B = \sqrt{B_{\text{ш max}}^2 + B_{\text{нас}}^2} - B_{\text{нас}} = 0,153 \text{ Тл.}$$

Для досягнення бажаної магнітної індукції $B_{\text{нас}} = 1,76$ Тл в сталі 2412 необхідно забезпечити напруженість магнітного поля $H_{\text{нас}} = 131$ А/см. В такому разі намагнічуюча сила обмотки має бути

$$F_{\text{нас}} = l_{\text{сер.ш}} H_{\text{нас}} + 2 \delta_{\text{мп}} B_{\text{нас}} 10^{-4} / \mu_0 = \\ = 69 \cdot 131 + 2 \cdot 0,005 \cdot 1,875 \cdot 10^{-4} / (4 \cdot \pi \cdot 10^{-9}) = 9188 \text{ А},$$

де $\delta_{\text{мп}}$ – технологічний зазор в стику (можна прийняти 0,005 см).

Щільність струму приймаємо 6 А / мм², що дозволяє вирахувати площу перетину обмотки підмагнічування:

$$S_{\text{обм}} = F_{\text{нас}} / j_{\text{обм}} = 9188 / 600 = 15,3 \text{ см}^2.$$

Висота обмотки

$$h_{\text{обм}} = S_{\text{обм}} / h_{22} = 15,3 / 4,3 = 3,56 \text{ см}.$$

Середня довжина витка обмотки підмагнічування

$$l_{\text{сер.обм}} = 2 (h_{\text{ш}} + b_0 - 2\delta + 2 h_{\text{обм}}) = \\ = 2 (5,42 + 10,5 - 0,1 + 2 \cdot 3,56) = 45,9 \text{ см}.$$

Виходячи з наступних співвідношень:

для струму обмотки підмагнічування $I_{\text{обм}} = F_{\text{нас}} / w_{\text{обм}}$,

для площі перетину витку $S_{\text{вит}} = S_{\text{обм}} / w_{\text{обм}}$,

для опору обмотки підмагнічування $R_{\text{обм}} = w_{\text{обм}} \rho_{\text{сц}} l_{\text{сер.обм}} / S_{\text{вит}}$,

для напруги на обмотці підмагнічування $U_{\text{обм}} = I_{\text{обм}} R_{\text{обм}}$,

маємо наступне співвідношення для визначення кількості витків

$$w_{\text{обм}} = \frac{S_{\text{обм}} U_{\text{обм}}}{\rho_{\text{сц}} l_{\text{сер.обм}} F_{\text{нас}}} = \frac{15,3 \cdot 15}{1,72 \cdot 10^{-6} \cdot 45,9 \cdot 9188} = 316,$$

де $\rho_{\text{сц}} = 1,72 \cdot 10^{-6}$ Ом·см – питомий опір міді; $U_{\text{обм}}$ приймаємо рівним 15 В з урахуванням рівня напруги системи керування.

Потужність, що споживається обмоткою підмагнічування,

$$P_{\text{обм}} = I_{\text{обм}}^2 R_{\text{обм}} = \frac{F_{\text{нас}}^2 \rho_{\text{cu}} l_{\text{сер.обм}}}{S_{\text{обм}}} = \frac{9188^2 \cdot 1,72 \cdot 10^{-6} \cdot 45,9}{15,3} = 435,6 \text{ Вт.}$$

Маса обмотки підмагнічування

$$m_{\text{обм}} = 3 l_{\text{сер.обм}} S_{\text{вит}} w_{\text{обм}} \gamma_{\text{cu}} = 3 \cdot 45,9 \cdot 15,3 \cdot 8,9 \cdot 10^{-3} = 18,75 \text{ кг},$$

де $\gamma_{\text{cu}} = 8,9 \cdot 10^{-3} \text{ кг / см}^3$ – питома маса провідникового матеріалу.

Маса сталі магнітного шунта

$$m_{\text{Fe}} = 3 l_{\text{сер.ш}} h_{\text{ш}} \gamma_{\text{ст}} = 3 \cdot 69,08 \cdot 5,42 \cdot 7,65 \cdot 10^{-3} = 8,593 \text{ кг},$$

де $\gamma_{\text{ст}} = 7,65 \cdot 10^{-3} \text{ кг / см}^3$ – питома маса сталі.

Для розміщення магнітного шунта (рис.2.8) між основними обмотками реактора трансформаторного типу необхідно збільшити висоту стрижня на $\Delta h = 2 \cdot h_{\text{ш}} = 10,84 \text{ см}$.

Таким чином, сумарна маса сталі стрижнів збільшиться на

$$\Delta m = \gamma'_{\text{c}} k_{\text{зс}} 3 \Pi_{\text{c}} \Delta h = 7,65 \cdot 10^{-3} \cdot 0,91 \cdot 3 \cdot 77,1 \cdot 10,84 = 17,45 \text{ кг.}$$

Загальна маса сталі магнітопроводу:

$$m_{\text{c}} = m_{\text{M}} + \Delta m + m_{\text{Fe}} = 94,6 + 17,45 + 8,59 = 120,6 \text{ кг.}$$

Загальна маса міді:

$$m_{\text{Cu}} = 3(m_{01} + m_{02}) + m_{\text{обм}} = 3 \cdot (15,3 + 12,93) + 18,75 = 103,44 \text{ кг.}$$

Втрати потужності в номінальному режимі:

$$\Delta p_{\text{втр.н}} = P_{\text{с}} + 3P_{\text{обм}} + P_{\text{к}} = 224,87 + 3 \cdot 435,6 + 1366 = 2897,7 \text{ Вт.}$$

В таблиці 2.1 наведені порівняльні характеристики обох трансформаторів.

Таблиця 2.1. Порівняльні характеристики статичних індукційних перетворювачів

Параметр	Трансформатор із просторовим магнітопроводом	Реактор трансформаторного типу	Різниця параметрів
Маса сталі	94,6 кг	120,6 кг	+27,5 %
Маса міді	84,7 кг	103,4 кг	+22,1 %
Маса АЧ	179,3 кг	224 кг	+24,9 %
Висота стрижня	31,5 см	42,34 см	+34,4 %
Втрати в ном. режимі	1590,9 Вт	2897,7 Вт	+82 %

Як можемо бачити, введення в конструкцію магнітного шунта збільшило масу активної частини на 25%, а втрати активної потужності на 82%.

Розглянемо загальні технічні показники асинхронного генератора із регульованим реактором:

- маса асинхронного двигуна 4A250S4Y3 $m_{\text{ад}} = 490$ кг [36]; маса реактора $m_{\text{р}} = 224$ кг; маса конденсаторних батарей [20] приблизно 0,1 кг / кВА, тому $m_{\text{сб}} = 0,1 Q_{\text{сб}} = 12,5$ кг; в такому разі маса генеруючої установки

$$m_{\text{аг}} = m_{\text{ад}} + m_{\text{р}} + m_{\text{сб}} = 490 + 224 + 12,5 = 726,5 \text{ кг;}$$

- втрати у номінальному режимі асинхронного двигуна 4A250S4Y3 $\Delta p_{\text{ад}} = (1 - \eta) P_{\text{ном}} / \eta = (1 - 0,93) 75000 / 0,93 = 5645$ Вт; втрати потужності в реакторі $\Delta p_{\text{р}} = 2898$ Вт; втрати потужності в конденсаторних батареях

0,45 Вт/кВАр, в номінальному режимі потрібно підключати батареї потужністю 100 кВАр, тому $\Delta p_{сб} = 45$ Вт; тоді ККД генеруючої установки:

$$\eta_{аг} = \frac{P_{ном}}{P_{ном} + \Delta p_{ад} + \Delta p_p + \Delta p_{сб}} \cdot 100\% = \frac{75000 \cdot 100\%}{75000 + 5645 + 2898 + 45} = 89,7\%.$$

Для синхронного генератора МСС-91-4 потужністю 75 кВт, напругою 400 В та частотою обертання 1500 об / хв маємо масу 730 кг та ККД 89,5%. Порівнюючи ці показники із отриманими для асинхронного генератора, можна зробити висновок, що вони приблизно однакові. Але перевагою асинхронного генератора є відсутність щітково-контактного механізму та, як наслідок, більш висока надійність.

Таблиця 2.2 Порівняння маси та ККД генераторів потужністю 75 кВт

Електромеханічний перетворювач	Маса, кг	ККД, %
Асинхронний двигун 4А250S4У3	490	93
Асинхронний генератор з реактором	726,5	89,7
Синхронний генератор МСС-91-4	730	89,5

Таблиця 2.3 Порівняння маси та ККД

асинхронних двигунів та синхронних генераторів

Асинхронні двигуни серії 4А (400 В; 1500 об / хв)			Синхронні генератори серії МСС (400 В; 1500 об / хв)			Співвідношення параметрів	
$P_{ном},$ кВт	Маса, $m_{ад},$ кг	ККД, $\eta_{ад},$ %	$P_{ном},$ кВт	Маса, $m_{сг},$ кг	ККД, $\eta_{сг},$ %	$m_{сг} / m_{ад}$	$\eta_{сг} - \eta_{ад}$
30	195	91	30	455	85,5	2,33	- 5,5%
55	355	92,5	50	545	88,5	1,54	- 4%
75	490	93	75	730	89,5	1,49	- 3,5%
90	535	93	100	830	91	1,55	- 2%
160	1005	93,5	160	1410	91,5	1,40	- 2%
200	1130	94	200	1545	92	1,37	- 2%

Порівнюючи параметри, представлені у таблицях 2.2 та 2.3, маємо висновок, що використання асинхронного генератора із керованим реактором є технічно оправданим при потужностях, що не перевищують 75 кВт.

3.4 Висновки до розділу 3

3.1. Розраховані потужності конденсаторних батарей та визначена потужність регульованого реактора для регулювання напруги асинхронного генератора потужністю 75 кВт та частотою обертання 1500 об/хв, який виконаний на базі асинхронного двигуна 4A250S4У3.

3.2. У режимі номінального навантаження АГ з урахуванням 50% запасу для забезпечення задовільних показників перехідних електромеханічних процесів у динамічних режимах потужність конденсаторних батарей має складати 130 кВАр, а у режимі холостого ходу – 20 кВАр.

3.3 Схема регулювання напруги АГ включає 3 конденсаторні батареї потужністю 25 кВАр та одну потужністю 50 кВАр, а також реактор потужністю 40 кВАр.

3.4. Реактор трансформаторного типу подібний до аксіальної конструкції просторового трансформатору та відрізняється розташуванням у обмотковому вікні між додатковою вторинною обмоткою та основними обмотками магнітного шунта, що підмагнічується у поперечному напрямленні по відношенню до магнітного потоку розсіювання.

3.5. Розрахований трансформатор із просторовим магнітопроводом, потужністю 40 кВА, первинною напругою 400 В та вторинною напругою 160 В. Визначені геометричні та енергетичні параметри шунта для додаткової вторинної обмотки, а також реактора трансформаторного типу в цілому.

3.6. Включення до складу трансформатора регульованого магнітного шунта збільшує масу статичного індукційного перетворювача на 25% та втрати активної потужності у номінальному режимі на 82%.

3.7. При роботі розробленого індукційного статичного перетворювача у якості реактора трансформаторного типу кратність зміни струму у первинній обмотці дорівнює 3.

3.8. Включення до складу генеруючої установки на базі асинхронного генератора реактора трансформаторного типу збільшує масу в 1,48 разів та зменшує ККД на 3,3%, але за цими показниками вона не поступається синхронному генератору типу МСС тієї ж потужності та частоти обертання.

3.9. Порівняння технічних показників синхронних генераторів серії МСС та асинхронних двигунів серії 4А, дозволяє зробити висновок, що використання асинхронного генератора із керованим реактором є технічно оправданим при потужностях, що не перевищують 75 кВт.

РОЗДІЛ 4.

ВИМОГИ ПОЛОЖЕНЬ МІЖНАРОДНОЇ КОНВЕНЦІЇ МАРПОЛ 73/78 ЩОДО УСТРОЮ ТАКОРПУСУ НАФТОНАЛИВНИХ СУДЕН

4.1. Танки ізольованого баласту

На кожному нафтоналивному судні для перевезення сирової нафти дедвейтом більше 20000 т і кожному нафтопродуктовозі дедвейтом 30000 т і більше, поставлених після 1 червня 1982 року, як вони визначені в розд. 1, передбачаються танки ізольованого баласту і виконуються вимоги, передбачені в пунктах 2, 3 і 4 або в пункті 5 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

На кожному нафтоналивному судні для перевезення сирової нафти дедвейтом 40000 т і більше, поставленому 1 червня 1982 року або до цієї дати, передбачаються танки ізольованого баласту і виконуються вимоги, передбачені в пунктах 2 і 3 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78. Однак, незважаючи на вищезазначене, на цих нафтоналивних судах допускається не мати танків ізольованого баласту при одночасному виконанні наступних умов:

на нафтоналивних судах застосовується метод очистки вантажних танків шляхом миття сировою нафтою відповідно до правил 33 і 35 Додатка I до МАРПОЛ 73/78;

нафтоналивні суду не призначені для перевезення сирової нафти, непридатною для миття сировою нафтою.

На кожному нафтопродуктовозі дедвейтом 40000 т і більше, поставленому 1 червня 1982 року або до цієї дати, передбачаються танки ізольованого баласту і виконуються вимоги, передбачені в пунктах 2 і 3 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 або, як альтернатива, застосовуються виділені для чистого баласту танки відповідно до положень пунктів 8.1 - 8.4 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

На кожному нафтоналивному судні для перевезення сирової нафти дедвейтом 20000 т і більше і кожному нафтопродуктовозі дедвейтом 30000 т і більше, поставлених після 1 червня 1982 року, крім нафтоналивних суден, які відпові-

дають вимогам до подвійного корпусу і подвійному дну на нафтоналивних судах, поставлених 6 липня 1996 року або пізніше цієї дати, відповідно до правила 19 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, танки ізольованого баласту, необхідні для забезпечення місткості, що задовольняє вимогам пункту 2 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, і розташовані в межах зони вантажних танків, виконуються відповідно до вимог пунктів 13, 14 і 15 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 для забезпечення захисту від виливу нафти в випадку посадки на мілину або зіткнення.

Відповідно до уніфікованої інтерпретацій (UI) МАКО МРС5 з поправками, при визначенні мінімальної висоти кожного танка подвійного дна або простору, величина якої враховується при розрахунку площі проекції днищевой обшивки PAs, прийомні колодязі можуть бути виключені з цього розрахунку за умови, що вони не значні по площі і проникають в подвійне дно на відстань, що не перевищує половини висоти танка або простору подвійного дна.

Відповідно до правила 18.5 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, незважаючи на положення правила 18.2 про місткості танків ізольованого баласту, кількість і розміщення ізольованого баласту на нафтоналивних судах довжиною менше 150 м повинні задовольняти вимогам Адміністрації. При цьому Адміністрації можуть слідувати Керівництву для Адміністрацій щодо рекомендованих осад для танкерів з ізольованим баластом довжиною менше 150 м, наведеного в Доповненні 1 до Єдиних тлумачень Додатку I до МАРПОЛ 73/78.

Будь-яке нафтоналивне судно, на якому не потрібно передбачати танки ізольованого баласту згідно з 3.1.1 - 3.1.3, може, однак, розглядатися як нафтоналивне судно з ізольованим баластом за умови, що він відповідає, відповідно, вимогам пунктів 2, 3 і 4 або пункту 5 правила 18 Додатку I до МАРПОЛ 73/78.

З огляду на особливості експлуатаційних вимог, інспектор Регістра повинен переконатися, що конкретне нафтоналивне судно має достатні можливості баластування, що забезпечують безпечну експлуатацію. У будь-якому випадку остійність повинна перевірятися окремо.

Нафтоналивні судна зі спеціальним баластуванням, поставлені 1 червня 1982 року або до цієї дати, повинні мати таку конструкцію або експлуатуватися таким чином, щоб, не вдаючись до використання водяного баласту, завжди задовольняли вимоги по осаді і диференту відповідно до пункту 2 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, при цьому повинні виконуватися вимоги пункту 10 правила 18 Додатка I.

На нафтоналивних судах дедвейтом 70000 т і більше, поставлених після 31 грудня 1979 р., передбачаються танки ізольованого баласту і ці нафтоналивні судна відповідають вимогам пунктів 2, 3 і 4 або пункту 5 правила 18 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

Для аварійного зливу ізольованого баласту через вантажний насос може бути передбачений знімний патрубок, що приєднує баластовий трубопровід до вантажного насосу. У цьому випадку на приєднаних трубопроводах ізольованого баласту повинні бути встановлені безповоротні клапани для запобігання проникнення нафти в танки ізольованого баласту, а патрубок повинен бути встановлений в насосному відділенні на видному місці. У патрубку повинна бути прикріплена табличка з написом про обмеження його застосування.

Танки ізольованого баласту повинні мати окремі баластні насоси і трубопроводи, призначені виключно для забору баластної води з моря і випуску її в море. При цьому трубопроводи і танки ізольованого баласту не повинні мати з'єднань з трубопроводами системи прісної води. Танки ізольованого баласту не повинні використовуватися для перевезення будь-якого вантажу і зберігання будь-яких суднових запасів або матеріалів.

4.2 Відстійних танки.

Кожне нафтоналивне судно валовою місткістю 150 і більше повинно бути обладнане відстійним танком або системою відстійних танків відповідно до вимог правила 29 Додатка I до МАРПОЛ 73/78. На нафтоналивних судах, поставлених 31 грудня 1979 року або до цієї дати, будь-який вантажний танк може використовуватися в якості відстійного. Місткість відстійного танка або систе-

ми відстійних танків повинна відповідати вимогам пункту 2.3 правила 29 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

На нафтоналивних суднах дедвейтом 70000 т і більше, поставлених після 31 грудня 1979 г., повинні передбачатися по меншій мірі два відстійних танка.

Розташування вхідних і вихідних отворів, а також відбійних перегородок відстійних танків повинно бути таким, щоб не виникало зайвої турбулентності і захоплення водою нафти або емульсії.

Вимоги правила 29 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 можуть не застосовуватися до будь-якого нафтоналивного судна в наступних випадках:

1. якщо судно зайнято в перевезенні асфальту, за умови збереження залишків на борту з подальшою здачею цих залишків і всіх промивних вод в прийомні споруди;

2. якщо судно має валову місткість менше 150 за умови збереження нафти на борту з подальшою здачею всіх промивних вод в приймальні споруди.

Адміністрація може звільнити будь-яке нафтоналивне судно від виконання вимог правила 29 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, якщо судно зайнято в рейсах тривалістю 72 год або менше з віддаленням від найближчого берега не більше 50 миль, за умови, що судно зайняте виключно в перевезеннях між портами або терміналами в державі-стороні Додатка I до МАРПОЛ 73/78, а також за умови збереження на борту всіх нафтовмісних сумішей для подальшої здачі їх в приймальні споруди і що Адміністрація встановлює, що такі споруди, наявні для прийому таких нафтовмісних сумішей, є достатніми.

Вимоги правила 29 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 застосовуються до суден, які не є нафтоналивними суднами, але мають вантажні приміщення, спеціально побудовані і використовуються для перевезення нафти, сумарна місткість яких становить 200 м^3 і більше. Зазначені вимоги також застосовуються до ПНК (FPSO і FSO).

Зазначені вимоги не застосовуються, якщо сумарна місткість цих приміщень менше 1000 м^3 , за умови, що нафтові залишки (шлам) і промивна вода зберігаються на борту для подальшої здачі їх в приймальні споруди.

Якщо передбачений трубопровід для скидання забруднених нафтою лляльних вод з льял машинних приміщень в відстійні танки, він повинен включати належний засіб для запобігання потрапляння вантажу і газів в машинні приміщення.

4.3 Вантажні танки.

Кожне, наведене нижче, нафтоналивне судно валовою місткістю 150 і більше в частині обмеження розмірів вантажних танків і їх розташування, а також в частині трубопроводів, що з'єднують вантажні танки між собою, і трубопроводів, що проходять через вантажні танки, має відповідати положенням правила 26 Додатку I до МАРПОЛ 73/78:

1. судно, поставлене після 31 грудня 1979 р але до 1 січня 2010 р .;
2. судно, поставлене 31 грудня 1979 р, або до цієї дати, яке відноситься до однієї з наступних категорій:

судно, поставлене після 1 січня 1977 р .;

або судно, до якого можна застосувати обидві наступні умови: його поставка здійснена не пізніше 1 січня 1977 р і контракт на його побудову не був попередньо укладений, але киль був закладений або судно знаходилося в подібній стадії будівництва після 30 червня 1974 р.

Кожне нафтоналивне судно валовою місткістю 150 і більше, поставлене 1 січня 2010 року або після цієї дати, в частині обмеження розмірів вантажних танків і їх розташування, а також в часта трубопроводів, що з'єднують вантажні танки між собою, і трубопроводів, що проходять через вантажні танки, має відповідати оложенням правила 23 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

Відповідно до правила 19.3.6 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 баластні і інші трубопроводи, такі як вимірювальні і вентиляційні трубопроводи до баластових танків, не повинні проходити через вантажні танки. Вантажні та подібні трубопроводи до вантажних танках не повинні проходити через баластні танки. Звільнення від цієї вимоги може надаватися стосовно перерахованих коротких ділянок трубопроводів за умови, що вони є повністю зварними або рівноцінними по конструкції.

4.4 Система мийки танків сирою нафтою.

Кожне нафтоналивне судно для перевезення сирої нафти дедвейтом 20000 т і більше, поставлене після 1 червня 1982 року, має бути обладнано системою миття сирою нафтою. Ця система повинна повністю відповідати вимогам правила 33 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 не пізніше одного року після того, як судно було вперше використано для перевезення сирої нафти, або до кінця третього рейсу з перевезення сирої нафти, придатної для мийки, залежно від того, яка дата настане пізніше. ПНК (FPSO і FSO) повинні бути обладнані системою миття сирою нафтою, якщо характеристики видобутої нафти підходять для миття сирою нафтою.

Будь-який вантажний або відстійний танк, оснащений системою миття сирою нафтою, повинен бути обладнаний системою інертних газів відповідно до вимог Міжнародного кодексу по системам пожежної безпеки (Кодекс СПБ) з урахуванням резолюції ІМО MSC.98 (73) з поправками.

Система трубопроводів миття сирою нафтою і пов'язане з нею обладнання та пристрої (трубопроводи, мийні машинки, насоси, зачисна система і баластні трубопроводи) повинні відповідати Технічним вимогам до конструкції, експлуатації та перевірці систем миття сирою нафтою відповідно до положень резолюції ІМО А.446 (XI), зміненої резолюціями ІМО А.497 (XII) і А.897 (21).

4.5. Вимоги додатка I до МАРПОЛ 73/78 щодо подвійного корпусу нафтоналивних суден

Подвійний корпус (подвійні борти і подвійне дно) нафтоналивних суден дедвейтом 600 т і більше, поставлених 6 липня 1996 року або після цієї дати, повинен відповідати вимогам правила 19 Додатка I до МАРПОЛ 73/78. Місткість танків ізолюваного баласту нафтоналивних суден для перевезення сирої нафти дедвейтом 20000 т і більше, а також нафтоналивних суден для перевезення нафтопродуктів дедвейтом 30000 т і більше повинна визначатися відповідно до правила 19.3.4 Додатка I до МАРПОЛ 73/78. У районі заокруглення скули або в місцях без чітко позначеного заокруглення скули, коли відстані h і

и, як зазначено в правилі 19.3.3 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, різні, відстань w є кращим на рівнях, що перевищують $1,5 h$ над основною лінією. Дана вимога для району заокруглення скули можна застосувати по всій довжині танка.

Нафтоналивні судна дедвейтом 5000 т і більше, поставлені до 6 липня 1996 р., повинні відповідати вимогам до подвійного корпусу відповідно до пунктів 2...5, 7 та 8 правила 19 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 на умовах, обумовлених в правилі 20 цього Додатку.

Нафтоналивні судна дедвейтом 600 т і більше, що перевозять в якості вантажу нафту важких сортів, незалежно від дати їх поставки повинні відповідати вимогам до подвійному корпусу відповідно до пунктів 2...8 правила 19 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 на умовах, обумовлених в правилі 21 Додатку I.

Виконання цих вимог на судах, що експлуатуються в районі Антарктики, не дає право цим судам перевозити наливом в якості вантажу або перевозити і використовувати в якості палива нафту важких сортів, зазначену в правилі 43 Додатку I до МАРПОЛ 73/78.

На нафтоналивних судах категорій А та В дедвейтом менше 5000 т, побудованих 1 січня 2017 року або після цієї дати, в разі їх експлуатації в Арктичних водах в межах, визначених Полярним кодексом, наведеному в резолюції ІМО МЕРС.264 (68), вантажні танки по всій довжині повинні бути захищені:

танками або відсіками подвійного дна, розташованими відповідно до правила 19.6.1 Додатка I до МАРПОЛ 73/78;

бортовими танками або відсіками, розташованими відповідно до правил 19.3.1 та із застосовними вимогами Правила 19.6.2 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

На судах категорій А та В, які не є нафтоналивними судами, побудованими 1 січня 2017 р. або після цієї дати, в разі їх експлуатації в Арктичних водах в межах, визначених Полярним кодексом, наведеному в резолюції ІМО МЕРС.264 (68), вантажні танки, які спроектовані і використовуються для перевезення нафти, повинні перебувати на відстані не менше 0,76 м від зовнішньої обшивки судна.

На нафтоналивних суднах дедвейтом 5000 т і більше, побудованих 1 січня 2007 року або після цієї дати, відповідно до вимог правила 22 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, повинні бути передбачені наступні засоби захисту вантажних насосних відділень:

1. вантажні насосні відділення цих суден повинні бути обладнані подвійним дном; подвійне дно, що захищає вантажне насосне відділення, може являти собою сухий танк, баластний танк або, якщо не заборонено іншими правилами, паливний танк;

2. баластні насоси повинні бути обладнані відповідними засобами, що забезпечують ефективну відкачування з танків подвійного дна;

3. трубопроводи баластної системи допускається розташовувати в подвійному дні вантажних насосних відділень за умови, що будь-яке пошкодження цих трубопроводів не вплине на працездатність вантажної системи;

4. прийомні колодязі в подвійному дні вантажних насосних відділень повинні бути настільки малі, наскільки це практично можливо, при цьому відстань між дном колодязя і основною лінією судна, виміряний під прямим кутом до цієї лінії, повинна бути не менше половини висоти подвійного дна.

Якщо дно насосного відділення або частина цього дна розташовані вище основної лінії судна принаймні на мінімальну висоту, як зазначено в правилі 22.2 Додатки I до МАРПОЛ 73 / 78, немає необхідності забезпечувати обладнання конструкції подвійним дном в районі всього насосного відділення або його частини.

Якщо частина насосного відділення розташована нижче мінімальної висоти, визначеної правилом 22.2, то ця частина насосного відділення повинна бути забезпечена подвійним дном для захисту вище розташованої частини насосного відділення.

4.6 Розподіл на відсіки і остійність

Кожне нафтоналивне судно дедвейтом 5000 т і більше, поставлене 1 лютого 2002 р, або після цієї дати (як визначено в правилі 1.28.7 Додатку I до МА-

РПОЛ 73/78), має відповідати критеріям остійності в непошкодженому стані, зазначеним в пунктах 1.1 і 1.2 правила 27 Додатка I до МАРПОЛ 73/78.

Кожне нафтоналивне судно валовою місткістю 150 і більше, поставлене після 31 грудня 1979 року (як визначено в правилі 1.28.2 Додатку I до МАРПОЛ 73/78), має відповідати критеріям розподілу на відсіки і аварійній остійності як зазначено в правилі 28.3 додатку I до МАРПОЛ 73/78.

Відповідно до поправок до правила 28 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, внесеними в резолюції ІМО МЕРС.248 (66), всі нафтоналивні судна повинні бути забезпечені приладом контролю остійності, здатним виконувати перевірку як остійності непошкодженого судна, так і аварійної остійності на відповідність поставленим вимогам.

Для нафтоналивних суден, побудованих 1 січня 2016 року і після цієї дати, огляд приладу контролю остійності судна повинен бути виконаний при первинному огляді. Для нафтоналивних суден, побудованих до 1 січня 2016 р такий огляд має бути виконаний при найближчому огляді судна для відновлення Свідоцтва ІОРР, починаючи з 1 січня 2016 року, але не пізніше 1 січня 2021 р.

4.7. Розрахунок умовних ушкоджень корпусу нафтоналивних суден та передбачуваного виливу нафти

Для нафтоналивних суден, поставлених до 1 січня 2010 року, щодо передбачуваного виливу нафти, а також обмеження розмірів вантажних танків і їх розташування, діють правила 25 і 26 Додатку I до МАРПОЛ 73/78.

При визначенні мінімальної висоти міждонного простору h прийомні колодязі можуть не враховуватися за умови, що вони не дуже великі за площею і тягнуться нижче танка на мінімальну відстань, причому в будь-якому випадку їх глибина не перевищує половини висоти подвійного дна. Якщо глибина такого колодязя перевищує половину висоти подвійного дна, h приймається рівною висоті подвійного дна за вирахуванням глибини колодязя.

Трубопровід в міждонному просторі, обслуговуючий такі колодязі, в місці свого з'єднання з танком, що обслуговується, обладнується клапанами або

іншими запірними пристроями для запобігання виливу нафти в разі пошкодження трубопроводу. Відповідно до уніфікованої інтерпретацією правила 25.3.3 Додатка I до МАРПОЛ 73/78 (документ ІМО МЕРС 56/23, додаток 15) ці клапани або інші запірні пристрої можуть розглядатися аналогічними прийомним колодязям (правило 12А.10 Додатки I до МАРПОЛ 73/78) і, отже, повинні бути розташовані на відстані від днищової обшивки не менше ніж $h/2$. Крім того, що прийомні колодязі, згадані в правилі 25.3.3 Додатка I до МАРПОЛ 73/78, повинні бути не надто великі за площею, їх розміри повинні відповідати розмірам всмоктуючого патрубка.

Відповідно до правила 23.11 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 вантажні трубопроводи, які проходять через вантажні танки в місцях, що знаходяться на відстані менше $0,3 B_s$ (B_s - найбільша теоретична ширина судна) від борта судна і менш $0,30 D_s$ (D_s - теоретична висота борта) від днищової обшивки, мають бути обладнані клапанами або подібними пристроями в точці, де вони відкриваються в будь-який вантажний танк.

В якості ефективного засобу зменшення виливу нафти в разі пошкодження днища застосовуються схвалені системи перекачування вантажу відповідно до пункту 5 правила 25 Додатку I до МАРПОЛ 73/78. Якщо встановлена система перекачування вантажу з'єднує два вантажних танка та більше, то передбачаються клапани або інші запірні пристрої для відділення танків один від одного.

Для нафтоналивних суден, поставлених 1 січня 2010 року або після цієї дати, діють показники аварійного виливу нафти згідно з правилом 23 Додатку I до МАРПОЛ 73/78 з урахуванням положень резолюції ІМО МЕРС 122 (52) з поправками, внесеними резолюцією ІМО МЕРС 146 (54). При цьому вилив нафти для кожного вантажного танка повинен розраховуватися з урахуванням уніфікованої інтерпретації правила 23.7.3.2 (показники аварійного виливу нафти) Додатка I до МАРПОЛ 73/78 (документ ІМО МЕРС 59/24, додаток 24).

ВИСНОВКИ

1. Розглянуто роботу асинхронного генератора на мережу великої потужності і на автономне навантаження. Аналіз схем заміщення дозволив визначити, що у генераторному режимі асинхронна машина працює із від'ємним ковзанням та споживає реактивну потужність.

2. Від'ємне ковзання створює негативний активний опір у вторинному колі, втрати активної потужності на якому компенсують втрати на активному опорі навантаження.

3. Для роботи у режимі генератора асинхронна машина має працювати паралельно із джерелом реактивної потужності, в якості якого може виступати синхронний генератор або конденсаторна батарея. В останньому випадку разом із навантаженням утворюється паралельний резонансний LC-контур, резонансна частота якого і визначає частоту напруги живлення.

4. Показано, що при зміні навантаження змінюється індуктивна потужність, що споживається асинхронним генератором та навантаженням. при незмінній реактивній потужності конденсаторних установок це призводить до зміни напруги статора як по амплітуді так і по частоті. С цього зроблений висновок про необхідність регулювати потужність, що генерується ємнісною установкою.

5. Аналіз технічних показників схем регулювання і стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора дозволяє говорити про доцільність використання у схемі стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора регульованого реактору, який має менші викривлення у струмі статора генератора по відношенню до тиристорних систем та плавне регулювання напруги у широкому діапазоні по відношенню до інших систем.

6. Наведено аналіз конструкції та графіки зміни режимних параметрів керованих реакторів трансформаторного типу у залежності від ступеня підмагнічування елементу магнітопроводу, що поділяє вторинну обмотку на основну частину та додаткову.

7. Показано, що при короткозамкненій вторинній обмотці кратність регулювання реактора трансформаторного типу складає 4,8...5,4 рази, що є достатнім для регулювання реактивної потужності конденсаторних батарей при регулюванні напруги асинхронного генератора.

8. Розглянуто принципи роботи і конструктивні особливості регульованих трансформаторів, які можуть бути використані у якості ректорів трансформаторного типу. Для підвищення енергетичних і поліпшення масогабаритних показників регульованого трансформатора (який надалі у режимі короткого замикання використаний у вигляді реактора) запропоновано замінити поздовжнє підмагнічування ярма на поперечне.

9. Запропоновано в аксіальній просторовій симетричній магнітній системі на стрижні розмістити основні мережеву та вторинну обмотку і додаткову вторинну обмотку. Основні та додаткову обмотки пропонується просторово розділити шляхом розміщення в обмотковому вікні між ними шунта, який підмагнічується поперечним магнітним полем.

10. Складена математична модель магнітного ланцюга запропонованої конструкції реактора та отримані залежності параметрів магнітного кола від параметрів навантаження та ступеня підмагнічування магнітного шунта. Визначений алгоритм розрахунку індуктивного опору розсіювання вторинної обмотки, що є навантаженням для короткозамкненої вторинної обмотки.

11. Розраховані потужності конденсаторних батарей та визначена потужність регульованого реактора для регулювання напруги асинхронного генератора потужністю 75 кВт та частотою обертання 1500 об/хв, який виконаний на базі асинхронного двигуна 4A250S4У3.

12. Реактор трансформаторного типу подібний до аксіальної конструкції просторового трансформатору та відрізняється розташуванням у обмотковому вікні між додатковою вторинною обмоткою та основними обмотками магнітного шунта, що підмагнічується у поперечному напрямленні по відношенню до магнітного потоку розсіювання.

13. Розрахований трансформатор із просторовим магнітопроводом, потужністю 40 кВА, первинною напругою 400 В та вторинною напругою 160 В. Визначені геометричні та енергетичні параметри шунта для додаткової вторинної обмотки, а також реактора трансформаторного типу в цілому.

14. Включення до складу трансформатора регульованого магнітного шунта збільшує масу статичного індукційного перетворювача на 25% та втрати активної потужності у номінальному режимі на 82%.

15. При роботі розробленого індукційного статичного перетворювача у якості реактора трансформаторного типу кратність зміни струму у первинній обмотці дорівнює 3.

16. Включення до складу генеруючої установки на базі асинхронного генератора трансформатора реакторного типу збільшує масу в 1,48 разів та зменшує ККД на 3,3%, але за цими показниками вона не поступається синхронному генератору типу МСС тієї ж потужності та частоти обертання.

17. Порівняння технічних показників синхронних генераторів серії МСС та асинхронних двигунів серії 4А, дозволяє зробити висновок, що використання асинхронного генератора із керованим реактором є технічно оправданим при потужностях, що не перевищують 75 кВт.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ:

1. Сергеев П. С. Проектирование электрических машин. [Текст] / П. С. Сергеев, Н. В. Виноградов, Ф. А. Горяинов – М.: Энергия, 1969. – 632 с.
2. Лопухина Е. М. Расчет асинхронных электродвигателей однофазного и трехфазного тока. [Текст] / Е. М. Лопухина, Г. С. Самихина – ГЭИ, 1961. – 312 с.
3. Алюшин Г. Н. Асинхронные генераторы повышенной частоты. [Текст] / Г. Н. Алюшин, Н. Д. Торопцев – Машиностроение, 1974. – 352 с.
4. Ставинський А. А. Розрахунок трифазних трансформаторів з просторовим магнітопроводом. [Текст] / А. А. Ставинський, Р. А. Ставинський, О. О. Плахтир – Миколаїв: НУК, 2004. – 106 с.
5. Ставинский Р. А. Расчет магнитной цепи и потерь в стали трехфазного трансформатора малой мощности с витым пространственным магнітопроводом [Текст] // Р. А. Ставинский. Електромашинобудування та електрообладнання: Міжвід. Наук. – техн. зб. – 2000. – Вип. 55. – С. 53-57.
6. Домбровский В. В. Справочное пособие по расчету электромагнитных полей в электрических машинах. [Текст] / В. В. Домбровский. – Л.: Энергоатомиздат, 1983. – 256 с.
7. Аренков А. Б. Изготовление трансформаторов с ленточными магнитопроводами. [Текст] / А. Б. Аренков, А. К. Климов, Ю. Н. Липатов – Л.: Судостроение, 1976. – 232 с.
8. Ставинский А. А. Трехфазный трансформатор малой мощности с пониженной материалоемкостью. [Текст] / А. А. Ставинский, Р. А. Ставинский // Електромашинобудування та електрообладнання: Респ. міжвід. наук.-техн. зб. – 1998. – Вип. 51. – С. 68-72. (статья)
9. Плахтырь О.О. Варианты конструкций и классификация пространственных магнитопроводов трехфазных трансформаторов и реакторов. [Текст] // О.О. Плахтырь. Електротехніка та електромеханіка. – 2002. №3. – С. 64-65.

10. Михнюк Т.Ф. Охрана труда и основы экологии: Учеб. Пособие. [Текст] / Т.Ф.Михнюк. – Минск: Высш. шк. – 2007. – 356 с.
11. Сторожук В.М. Промислова екологія: Підручн. [Текст] / В.М.Сторожук, В.А.Батлук, М.М.Назарук. – Львів: Українська академія друкарства. – 2006. – 547 с. (книжки)
12. Тубальцев А.М. Виробниче освітлення та його розрахунок. Навчальний посібник. [Текст] / А.М. Тубальцев. – Миколаїв: УДМТУ. – 2001. – 84 с.
13. А. с. 1251193 СССР. Бесконтактный индукционный разъем [Текст] / В. М. Венгер, А.И. Поликарпов, Д.В. Тогатов – 3810603/24–07 ; заявл. 16.08.84 ; опубл. 15.08.86, Бюл. № 30. (авторское свидетельство)
14. А. с. 1372390 СССР. Трехфазный регулируемый трансформатор [Текст] / Г. П. Копейкина, И.А. Румянцева – 4103525/24–07 ; заявл. 19.08.86 ; опубл. 07.02.88, Бюл. № 5.
15. А. с. 1108516 СССР. Трехфазный силовой подмагничиваемый трансформатор [Текст] / А.И. Кубрак – 2419366/18–07 ; заявл. 05.11.76 ; опубл. 15.08.86, Бюл. № 30.
16. Дорожко, Л.И. Реакторы с поперечным подмагничиванием. [Текст] / Л.И. Дорожко, М.С. Либкинд. –М.: Издательство «Энергия», 1977 – 176 с.
17. Флора В.Д. Электрические машины специальных конструкций и принципов действия. Под редакцией доцента к.т.н. Ю.С. Коробкова [Текст] /В.Д. Флора. – Запорожье: Информационная система iElectro, 2011. – 254 с.
18. А. с. 1585836 СССР. Индукционный выключатель [Текст] / В. П. Безручко, В.Д. Флора, Н.Н. Кайгушский – 4329016/24–07 ; заявл. 17.11.87 ; опубл. 15.08.90, Бюл. № 30.
19. Постников И. М. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. [Текст] / И. М. Постников, А. В. Новиков, Ю. А. Прокофьев и др. – Киев: Наукова думка, 1977. – 176 с.
20. Торопцев Н. Д. Асинхронные генераторы автономных систем. [Текст] / Н. Д. Торопцев – М.: Знак. – 1998. – 288 с.

21. Бут Д. А. Анализ и расчет асинхронных машин на основе одномерных уравнений электромагнитного поля. [Текст] // Д. А. Бут. Электричество. – 1986. – № 3. – С. 18-23.
22. Бут Д. А. Бесконтактные электрические машины: Учеб. пособие для электромех. и электроэнерг. спец. вузов. [Текст] / Д. А. Бут. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
23. Балагуров В. А. Проектирование специальных электрических машин переменного тока: Учеб. пособие для студентов вузов. [Текст] / В. А. Балагуров. – М.: Высш. школа, 1982. – 272 с.
24. Александров Г.Н. Управляемые реакторы. [Текст] / Г.Н. Александров. В.П., Лунин – Санкт – Петербург. Третье издание Центра подготовки кадров энергетики, 2005. – 200 с.
25. Соколов С.Е. Управляемые ферромагнитные реакторы и их использование для управления режимами протяженных ЛЭП. [Текст] / С.Е. Соколов, Г.О. Борисов, А. П. Гусев, Т. Б. Заславская – Новосибирск: ВО “Наука”, 1993. - 229 с.
26. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. [Текст] / П.М. Тихомиров. Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
27. Александров Г.Н. Быстродействующий управляемый реактор трансформаторного типа 420 кВ, 50 Мвар пущен в эксплуатацию. [Текст] / Г.Н. Александров. Электричество, 2002, №3, – С. 64-66.
28. Александров Г.Н. Статический тиристорный компенсатор на основе управляемого шунтирующего реактора трансформаторного типа. [Текст] / Г.Н. Александров. Электричество, 2003, №2, – С. 38-46.
29. Александров Г.Н. Исследование переходных режимов работы управляемого шунтирующего компенсатора трансформаторного типа с помощью магнитоэлектрических схем замещения. [Текст] / Г.Н. Александров, М.А. Шакиров. Электричество, 2005, №6, – С. 20-32.
30. Костырев М. Л. Автономные асинхронные генераторы с вентильным возбуждением. [Текст] / М. Л. Костырев, А. И. Скороспешкин – М.: Энергоатомиздат, 1993. – 158 с.

31. Радин В. И. Электрические машины: Асинхронные машины. [Текст] / В. И. Радин, Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович – М.: Высшая школа, 1988. – 328с.
32. Толстов Ю. Г. Исследование передачи электрической энергии на большие расстояния от асинхронных генераторов : Диссертация кандидата технических наук. [Текст] / Ю. Г. Толстов. – Моск. энерг. ин – т (МЭИ) . – 1940 . – 246 с.
33. Цибулевский Г. И. Обмоточные данные асинхронных двигателей. [Текст] / Г.И. Цибулевский. – М.: Энергия, 1971. – 392 с.
34. Петрова В. М. Асинхронные двигатели общего назначения [Текст] / В. М. Петрова, А. Э. Кравчика – М.: Энергия. 1980. – 488 с.
35. Захаров М.К. Построение многоскоростных обмоток методом фазной модуляции при сдвиге модуляционной волны. [Текст] / М.К. Захаров, В.Г. Дягтев , И. Н. Родимов. // Электричество. – 1976. – № 9. – С. 72 – 76.
36. Кравчик А. Е. Асинхронные двигатели серии – 4А. [Текст] / А.Е.Кравчик, М. М. Шлаф, В. И. Афонин, Е. А. Соболенская. – М.: Энергия. справочник – 90А. 1982. – 91 с.
37. А. с. 233144 СССР. Трехфазный симметричный регулируемый трансформатор [Текст] / В. А. Троицкий–1167775/25–27; заявл. 29.06.84; опубл. 18.12.68, Бюл. № 2.
38. А. с. 597013 СССР. Трехфазный симметричный регулируемый трансформатор [Текст] / А. И. Краснов, Ю. И. Борю, Д. Н. Паршин, П. А. Жинжиков, А. Н. Корнеев, В. А. Троицкий, Н. Г. Белый, Ю. Д. Гупало, В. А. Нагайцев – 1804278/24–07; заявл. 03.07.72; опубл. 05.03.78, Бюл. № 9.