

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА



О. Б. Єгоров, М. Л. Глєбова, Я. Б. Форкун

СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2022

Єгоров О. Б. Спеціальні електричні машини : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії») / О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2022. – 121 с.

Автори:

канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензенти:

Д. В. Тугай, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова;

О. В. Сенецький, доктор технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки Харківського національного університету міського господарства імені О. М. Бекетова

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 3 від 18 жовтня 2022 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	5
1 Спеціальні генератори вітроенергетичних установок з постійними магнітами.....	13
1.1 Основні властивості постійних магнітів і їх застосування для збудження генераторів.....	13
1.1.1 Загальні відомості.....	13
1.1.2 Основні параметри та властивості магнітотвердих матеріалів і постійних магнітів.....	14
1.1.3 Короткі відомості про магнітотверді матеріали.....	20
1.1.4 Особливості конструкції генераторів з постійними магнітами....	22
1.1.5 Робоча діаграма магніту.....	27
1.1.6 Застосування робочої діаграми магніту для розрахунків генераторів з постійними магнітами.....	34
1.1.7 Схема заміщення магнітному ланцюга з постійними магнітами..	37
1.1.8 Апроксимація кривої розмагнічування й характеристики магнітного повернення. Аналітичне визначення робочої точки постійного магніту.....	39
1.2 Розрахунки провідностей розсіювання постійних магнітів у вільному стані й у зібраній конструкції.....	42
1.2.1 Магнітні системи з радіальними магнітами.....	42
1.2.2 Магнітні системи зі скобоподібними постійними магнітами.....	52
1.2.3. Магнітні системи із зіркоподібними магнітами.....	54
1.3 Режими роботи синхронного генератора із постійними магнітами....	56
1.3.1 ЕРС холостого ходу та параметри синхронного генератора із постійними магнітами.....	56
1.3.2 Робота синхронного генератора із постійними магнітами при навантаженні. Зовнішня характеристика і векторна діаграма	59
1.3.3 Побудова зовнішньої характеристики синхронного генератора із постійними магнітами.....	66
1.3.4 Активна потужність та електромагнітний момент синхронного генератора із постійними магнітами.....	69
1.3.5 Визначення маси активних матеріалів, втрат та ККД генератора.	70
2 Асинхронні генератори.....	73
2.1 Загальна характеристика асинхронних генераторів.....	73
2.2 Принцип дії та конструкція асинхронних генераторів.....	75
2.2.1 Конструкція асинхронної машини.....	75
2.2.2 Принцип дії та основні співвідношення в асинхронному двигуні.....	77
2.3 Робота асинхронної машини, підключеної до мережі, у генераторному режимі.....	86
2.3.1 Фізичні процеси та співвідношення в асинхронних генераторах..	86
2.3.2 Особливості паралельної роботи асинхронних генераторів із мережею. Порівняння з синхронним генератором.....	90
2.4 Робота асинхронного генератора в автономному режимі.....	92

2.4.1 Принцип дії асинхронного генератора.....	92
2.4.2 Самозбудження асинхронного генератора.....	93
2.5 Характеристики асинхронного генератора в автономному режимі...	100
2.5.1 Робочі характеристики автономного асинхронного генератора	100
2.5.2 Енергетична діаграма, втрати та ККД асинхронного генератора.	109
2.6 Регулювання частоти та напруги автономного асинхронного генератора.....	113
2.6.1 Загальні проблеми регулювання асинхронного генератора	113
2.6.2 Стабілізація напруги та частоти асинхронного генератора	114
Список рекомендованих джерел.....	120

ВСТУП

Недостатність і нерівномірність розміщення викопних енергетичних носіїв по Землі з кожним роком стає усе більш важливою проблемою. Стоїть завдання про негайне знаходження та практичне використання відновлюваних джерел енергії (ВДЕ) для вирішення енергетичних проблем. По даним Міжнародного енергетичного агентства (МЕА) первинні енергоносії, або класичні джерела виробництва енергії, становлять зараз основу електроенергетики будь-якої країни [1]. За даними МЕА електростанції працюють: на нафті – 38 %, на природному газі – 20 %, на вугіллі – 27 %, що становить 85 % від загального виробництва енергетичних ресурсів. Інші 15 % припадають на АЕС і на електростанції, що працюють від відновлюваних енергетичних джерел. Зростанню інтересу до ВДЕ сприяло подорожчання з 70-х років ХХ століття енергоносіїв (переважно нафти), яке, своєю чергою, створило скорочення використання мінеральних паливних ресурсів для вироблення електричної енергії. Обсяг видобутку та вартість енергоносіїв більшою мірою визначають напрямок розвитку світової енергетики. До того ж теплова й атомна енергетика створюють сильні збудження у навколишньому природному середовищі, а розширення масштабів виробництва електричної енергії на базі органічного палива може скинути глобальні екологічні проблеми для всієї планети. Все це сприяє підвищенню уваги до ВДЕ [1].

Західна Європа стрімкою швидкістю створює енергетику на відновлюваних та невичерпних джерелах – альтернативну енергетику, головна роль якої відноситься до вітроенергетики, як найширшого способу отримання енергії серед відновлюваних джерел.

Середньорічний темп росту установки вітряної турбіни становить близько 30 % протягом останніх 10 років. Наприкінці 2020 року, потужність виробітку вітряної енергії збільшилася до 74 223 Мвт з 59 091 Мвт у 2005 році (рис. 1). До кінця 2025 року очікується, що ця цифра зросте більш ніж до 1 260 000 Мвт, цього буде достатньо для 12 % споживання електроенергії у світі [1]. На рисунку 2 подану загальну встановлену потужність енергії вітру в

деяких країнах з 1985 по 2006 рік. Країнами з найбільшою загальною встановленою потужністю є Німеччина (20 622 МВт), Іспанія (11 615 МВт), США (11 603 МВт), Індія (6270 МВт) і Данія (3136 МВт). За даними доповіді глобальної ради по вітровій енергії, Європа як і раніше лідирує на ринку з 48 545 МВт встановленою потужністю наприкінці 2006 року, що становить 65 % від світової. Європейська вітроенергетична асоціація поставила собі за мету задовольнити 23 % європейських електричних потреб в енергії вітру до 2030 року [1]. Зрозуміло, що глобальний ринок для електроенергії, виробленої генераторами вітрової турбіни, неухильно зростає, що забезпечує більшу конкурентність вітрової технології.

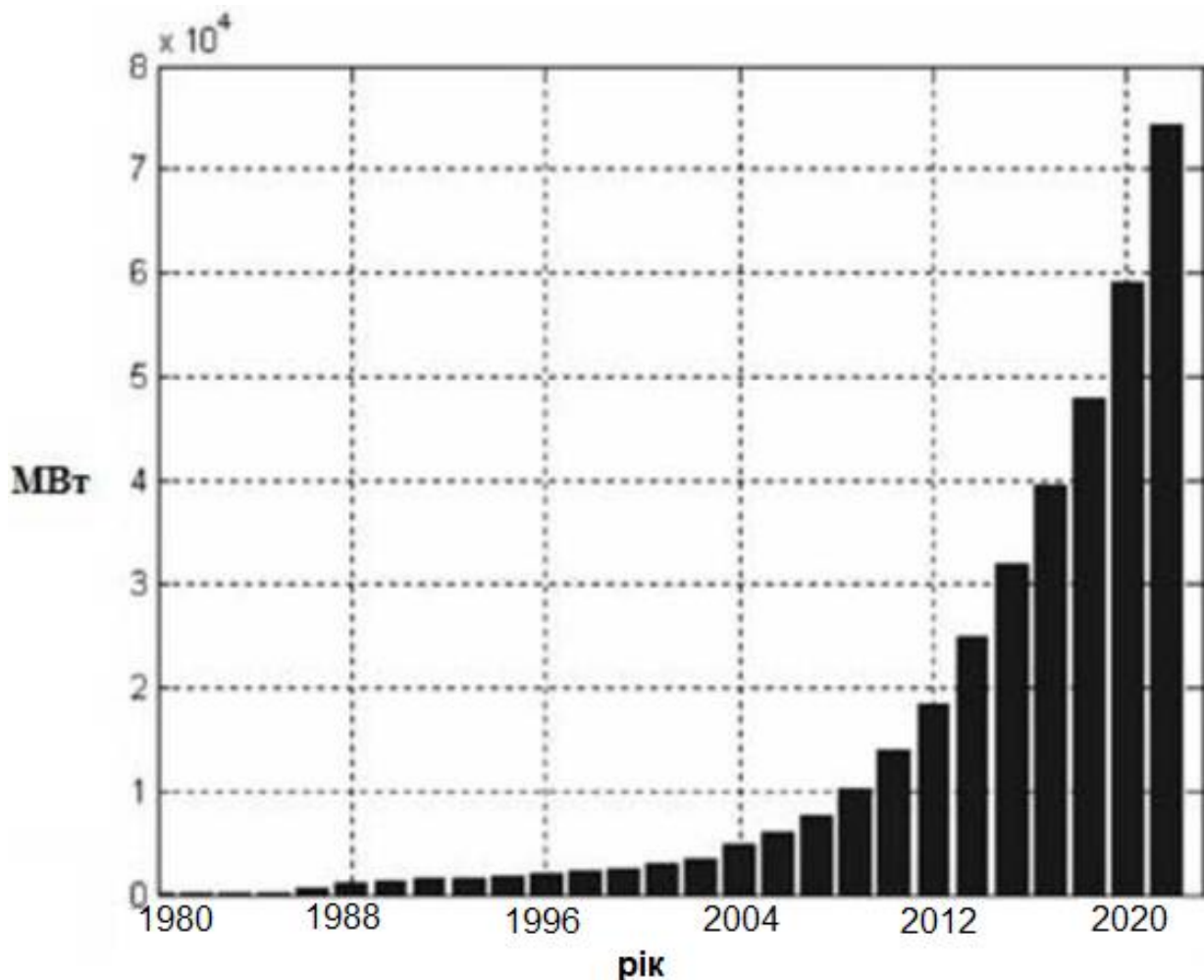


Рисунок 1 – Установлена потужність світової вітряної енергії (1980–2020)

Розвиток технології сучасного перетворення вітряної енергії починається з 1970-х років, а швидке зростання спостерігається з 1990-х років.

Вигідність вітроенергетичної установки (ВЕУ), значення ККД залежать не так від конструкції лопат і іншого встаткування, але від правильності вибору електрогенератора.

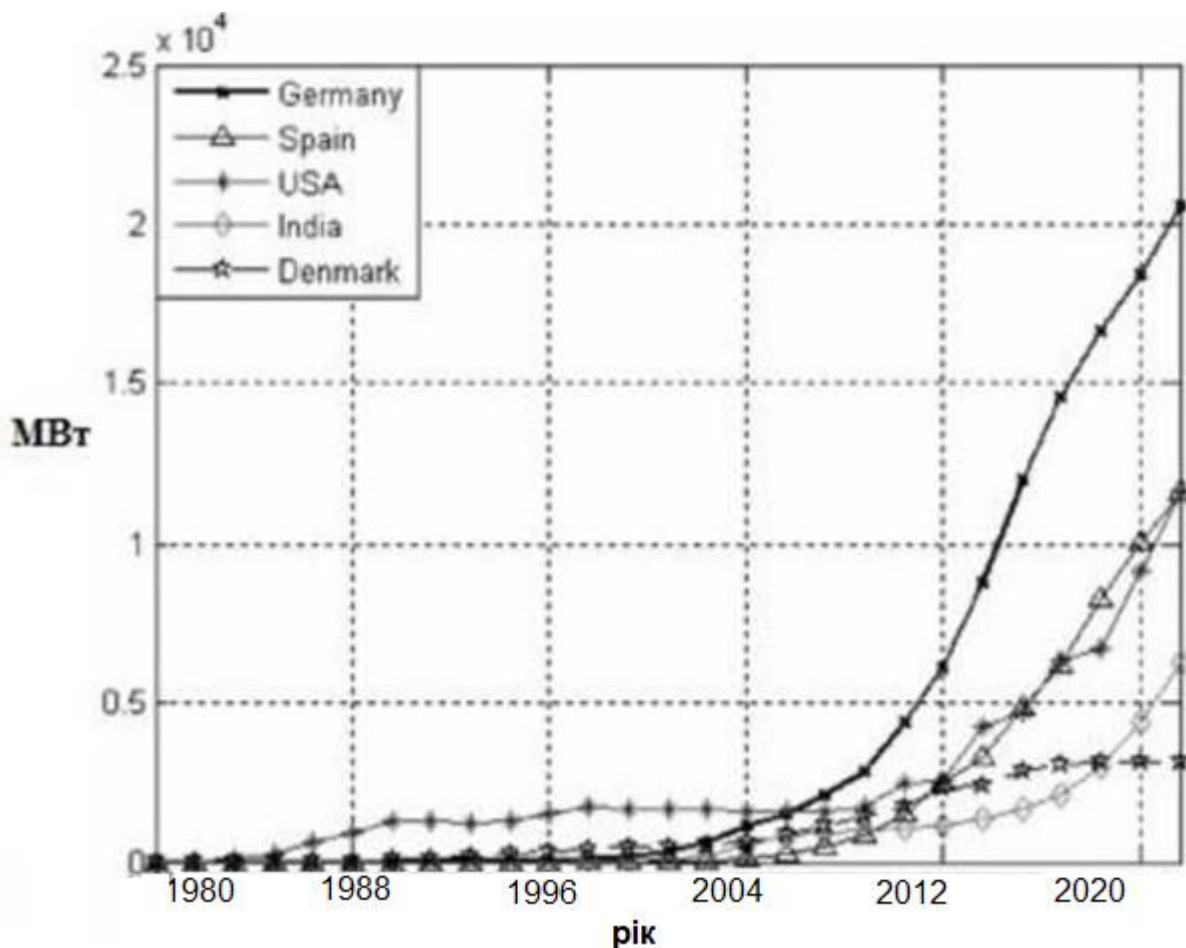


Рисунок 2 – Загальна встановлена потужність вітряної енергії в різних країнах

Необхідний загальний аналіз різних типів генераторів для вітроенергетичних установок, а також порівняння їх у літературі та на ринку. По-перше, представлені кількісні порівняння різних вітряних генераторних систем, засновані на наявних відомостях з технічної літератури. По-друге, показані тенденції та представлені розробки систем вітряного генератора та критерії порівняння їх.

Визначення типу вітрогенератора. Для роботи на єдину енергетичну мережу необхідні вітроенергетичні установки великої потужності, порядком у

кілька МВт. Для підтримки рівня життя в дрібних населених пунктах та в індивідуальних господарствах потрібно споруджувати системи малих енергоустановок. Виходячи з досвіду вищезгаданих країн відомо, що добова потреба родини в селі становить до 2 кВт·година, заможного великого фермерського господарства – до 10 кВт, маленького села (до 30...40 родин) – 50 кВт·година. Мала вітроенергетика є маловимогливою до території. Локальні вітроустановки можуть бути застосовні практично скрізь, де середньорічна швидкість вітру не менш 4...5 м/с, а для тихохідних багатолопатьних вітроенергетичних установок – не менш 3 м/с [1].

Головні проблеми створення й обслуговування вітроустановок – це їх ефективність, безпека й надійність, вплив на навколишнє середовище. Основними проблемами технічного характеру є вибір розрахункових параметрів вітроенергетичних установок, аеродинамічного профілю вітроколеса, конструктивних і компоновальних розв'язків основних вузлів, методів і способів монтажу. Вибір розрахункових параметрів для кожної певної вітроенергетичної установки припадає на встановлення розрахункової швидкості вітру, одиничної потужності й розмірів вітроколеса, установленної потужності й типу генератора, визначення системи регулювання, умов монтажу й обслуговування вітроустановок. Звідси випливає, що визначення типу генератора для вітроенергетичної установки слід віднести до основних питань вітроенергетики.

Вибором типів генераторів для вітроустановок займалися такі відомі вчені, як А. І. Вольдек, В. А. Баляндрасників, Д. А. Завалишин, Я. Б. Данилевич, А. Н. Ледовской, Б. В. Сидельников і ін.

Генератор – головний елемент електроустаткування автономної енергоустановки. Крім прямого призначення генератор повинен виконувати певні функції по стабілізації та регулювання параметрів, що відповідають за якість електричної енергії, що виробляється.

Такі роботи проводяться вченими всього світу. У Греції (м. Афіни) вивчають можливість експлуатації асинхронізованого генератора подвійного живлення; у Великобританії (м. Ноттінгем) – комутований реактивний

синхронний генератор; у Нідерландах і Шотландії тестують керований реактивний синхронний генератор для безредукторної установки; у Японії (м. Хатінойе) – роботу асинхронного генератора з короткозамкненим ротором, обладнаного системою тиристорного керування реактивною потужністю в ланцюзі статора і т. д. [1]. Але майже всі генератори даних типів, при сучасному положенні економіки, до промислового випуску можливо будуть запропоновані тільки після ретельного аналізу.

Необхідно вагоме обґрунтування вибору типу генератора, тому що вибір вимагатиме величезних матеріальних вкладень в організацію їх виробництва, такі як наукові дослідження, створення нових технологічних процесів та оснащення, експериментальних стендів, підготовка інженерно – технічного персоналу та робітників. Таким чином, на наш погляд, більш оптимально, використання класичних типів генераторів або генераторів спеціального типу, але більш традиційного, виконання, що також у свою чергу є значним фактором при визначенні типу генератора.

Для використання на вітроенергетичних установках можливі наступні типи генераторів:

- а) асинхронні генератори з короткозамкненим ротором;
- б) синхронні генератори з електромагнітним збудженням;
- в) асинхронізований синхронний генератор;
- г) асинхронні генератори з фазним ротором;
- д) синхронні генератори (СГ) з магнітоелектричним збудженням, тобто з збудженням від постійних магнітів;
- е) спеціальні СГ: індукторні СГ, генератори з кігтеподібним ротором і деякі інші.

Кожен із вищевказаних типів генераторів має свої «плюси» та «мінуси». Нижче в таблиці 1 подано коротку інформацію цих факторів для кожного типу.

Таблиця 1 – Переваги та недоліки різних типів генераторів для вітроустановок

№ з/п	Тип генератора	Переваги	Недоліки
1	2	3	4
1	Асинхронний генератор з короткозамкненим ротором	1) простота надійність обслуговуванні; 2) невисока вартість; 3) мають малі коливання потужності, електромагнітного моменту та струму при паралельній роботі та при змінній швидкості вітру та його поривах; 4) можливо встановлювати безредукторні установки з гарними масогабарітними показниками, високим ККД і можливістю регулювати напругу та їх частоту в широких межах	1) необхідність установлення редукторів, тому що використовують дешеві тихохідні турбіни (із частотою обертання 20...30 об/хв). Тому генератор приєднують через редуктор з високим коефіцієнтом перетворення (Кред=50...70), що вимагає додаткових витрат на установку, обслуговування, ремонт, знижує надійність, є джерелом механічного шуму; 2) неможливо управляти режимними параметрами, що необхідно при поривчастому вітрі; 3) для роботи в автономному режимі необхідне автономне джерело реактивної потужності; 4) обмеження у промисловому застосуванні – при спотвореній формі вихідної напруги та незадовільних динамічних властивостей
2	Синхронний генератор з магнітоелектричним збудженням	1) вимкнення ковзного контакту; 2) висока надійність роботи; 3) високе значення ККД	1) необхідність у придбанні дорогих постійних магнітів; 2) сталість магнітного потоку; неможливість його регулювати; 3) висока вартість; 4) відсутність вітчизняної бази виробництва

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
3	Асинхронний генератор з фазним ротором	<p>1) можливо використовувати в автономних системах у комбінації з іншими машинами. Можливо каскадне з'єднання двох АГ або з'єднання АГ та ДПТ із паралельним збудженням;</p> <p>2) простота обслуговуванні;</p> <p>3) надійність;</p> <p>4) мають порівняно малі коливання генерируемой потужності, електромагнітного моменту та струму при паралельній роботі, при змінній швидкості вітру та його поривах</p>	<p>1) необхідність встановлення редукторів, тому що використовують удешеві тихохідні турбіни (із частотою обертання 20 ... 30 об/хв). Необхідний редуктор з високим коефіцієнтом перетворення ($K_{ред} = 50...70$), що вимагає додаткових витрат на установку, обслуговування, ремонт, знижує надійність, є джерелом механічного шуму;</p> <p>2) неможливо управляти режимними параметрами, що буває необхідно при рвучкому вітрі;</p> <p>3) в автономному режимі необхідне автономне джерело реактивної потужності;</p> <p>4) обмеження в промисловому застосуванні через перекручену форму вихідної напруги й незадовільних динамічних властивостей;</p> <p>5) наявність ковзного контакту, що знижує надійність</p>
4	Спеціальні СГ із магнітоелектричним збудженням	<p>1) виключення ковзного контакту;</p> <p>2) прості та зручні в експлуатації, високий ККД;</p> <p>3) зберігають стійкі робочі характеристики протягом не менш десяти років</p>	<p>1) необхідність у придбанні дорогих постійних магнітів;</p> <p>2) сталість магнітного потоку, тобто неможливість його регулювати;</p> <p>3) висока вартість генераторів;</p> <p>4) відсутність вітчизняної бази виробництва.</p>

Закінчення таблиці 1

1	2	3	4
5	СГ із електро-магнітним збудженням	<p>1) при застосуванні перетворювача з явною ланкою постійного струму та інвертором напруги при широтно-імпульсному керуванні, можливо одержати в струмі низький состав гармонік, покращення динамічних властивостей об'єкта;</p> <p>2) можливість керування реактивною потужністю з генераторної сторони</p>	<p>1) вище вартість, складніше конструкція, нижче надійність, ніж в АМ;</p> <p>2) наявність ковзного контакту й необхідність джерела постійного струму для обмотки збудження;</p> <p>3) при необхідності безредукторної установки ускладнюється конструкція, збільшується вага й ціна;</p> <p>4) тверда залежність частоти ЕРС від швидкості обертання. Це обмежує, а в регіонах з різкими поривами вітру унеможлиблює, використання СГ для прямого включення в мережу без ППЧ;</p> <p>5) для забезпечення параметрів струму та напруги із припустимими технічними характеристиками необхідно застосовувати перетворювачі з явною ланкою постійного струму та інвертором напруги</p>
6	Асинхронні – зованний синхронний генератор	<p>1) можливо використовувати автономні системи у комбінації з іншими машинами, можливо каскадне з'єднання з АГ або з'єднання з АГ та ДПТ з паралельним збудженням;</p> <p>2) більша стійкість</p>	<p>1) наявність на роторі ковзного контакту для підведення напруги до обмотки збудження ротора й необхідність в перетворювачі частоти для регулювання напруги збудження;</p> <p>2) при відхиленні швидкості від синхронної потрібне значне збільшення реактивної потужності й напруги в обмотці збудження;</p> <p>3) при наближенні ковзання до нуля та несинусоїдальності у випрямлячі, що живить обмотку збудження, в напрузі генератора виникають значні субгармоніки, а при паралельній роботі й регулюванні напруги за величиною і фазою ковзання, у напрузі, що виробляється, виникають пульсації, практично повторюючи пульсації моменту вітротурбіни</p>

1 СПЕЦІАЛЬНІ ГЕНЕРАТОРИ ВІТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК З ПОСТІЙНИМИ МАГНІТАМИ

1.1 Основні властивості постійних магнітів і їх застосування для збудження генераторів

1.1.1 Загальні відомості

Нині у різних галузях техніки широке застосування отримали генератори зі збудженням від постійних магнітів. Цьому значною мірою сприяв досягнутий за останні роки прогрес у галузі промислового освоєння виробництва висококоерцетивних сплавів та з'єднань для постійних магнітів, що дозволило створити електричні машини з покращеними енергетичними та масогабаритними показниками.

Основні переваги електричних машин зі збудженням від постійних магнітів:

а) простота конструкції, що пояснюється відсутністю обмотки збудження, а в машинах з роторним збудженням відсутністю ковзного контакту;

б) менші габаритні розміри та маса. Ця перевага збільшується зі зменшенням потужності машини. Дійсно, енергія, що створюється постійним магнітом, пропорційна обсягу магніту, тобто третьому ступені лінійних розмірів, а енергія, що створюється електромагнітом, пропорційна добутку перетину сердечника на перетин обмотки збудження, тобто четвертому ступені лінійних розмірів:

$$P \sim \Phi IW = (BQ_{Fe})(jqW) = BjQ_{Fe}Q_{Cu}, \quad (1.1)$$

де B – індукція в перетині;

j – щільність струму в обмотці збудження;

q – перетин проведення обмотки;

W – число витків обмотки;

Q_{Fe} – площа поперечного перерізу сердечника полюса;

Q_{Cu} – перетин котушки обмотки збудження;

в) менші втрати, а, отже, більш високий ККД за рахунок зменшення втрат на збудження та втрат на тертя в ковзному контакті (для машин з роторним збудженням);

г) підвищена надійність, внаслідок відсутності ковзного контакту та обмотки збудження;

д) сталість магнітного потоку – незалежність його від коливань температури, напруги мережі, частоти обертання;

е) відсутність необхідності в джерелі постійного струму;

ж) мале нагрівання та краще умови охолодження.

До недоліків постійних магнітів слід віднести:

а) складність обробки більшості магнітів;

б) дефіцитність ряду матеріалів, що йдуть на виготовлення постійних магнітів (кобальт, вольфрам, титан і ін.);

в) складність регулювання магнітного потоку;

г) висока вартість деяких магнітотвердих матеріалів для постійних магнітів.

1.1.2 Основні параметри та властивості магнітотвердих матеріалів і постійних магнітів

Постійним магнітом називається попередньо намагнічене феромагнітне тіло, що володіє значною залишковою намагніченістю, що і є джерелом магнітної енергії.

Постійний магніт виготовляється з магнітотвердого феромагнітного матеріалу, властивості якого характеризуються залежністю $B_M = \mu_0 M = f(H)$ або залежністю $B = f(H)$, де M – намагніченість, H – напруженість зовнішнього магнітного поля, μ_0 – магнітна проникність вакууму, B – магнітна індукція. Якщо відома одна із цих залежностей, то іншу можна одержати зі співвідношення:

$$B = \mu_0 (M + H) = \mu_0 (\chi H + H) = \mu_0 (\chi + 1) H = \mu_0 \mu H = \mu_a H, \quad (1.2)$$

де χ – магнітна сприйнятливості матеріалу;

μ – відносна магнітна проникність;

$\mu_a = \mu_0\mu$ – абсолютна магнітна проникність.

Залежність $B_M = \mu_0 M = f(H)$ і $B = f(H)$ становлять, відповідно, гістерезисні петлі по намагніченості та індукції (рис. 1.1) [2]. Для технічних розрахунків зазвичай використовують характеристику $B = f(H)$. У цьому випадку властивості магнітотвердого матеріалу, з якого виготовлений постійний магніт, характеризується граничною петлею гістерезису, що виходить при намагнічуванні матеріалу до стану насичення. При цьому основне значення має частина граничної петлі гістерезису, яка розташована в другому квадранті і називається кривою розмагнічування (рис. 1.2, а).

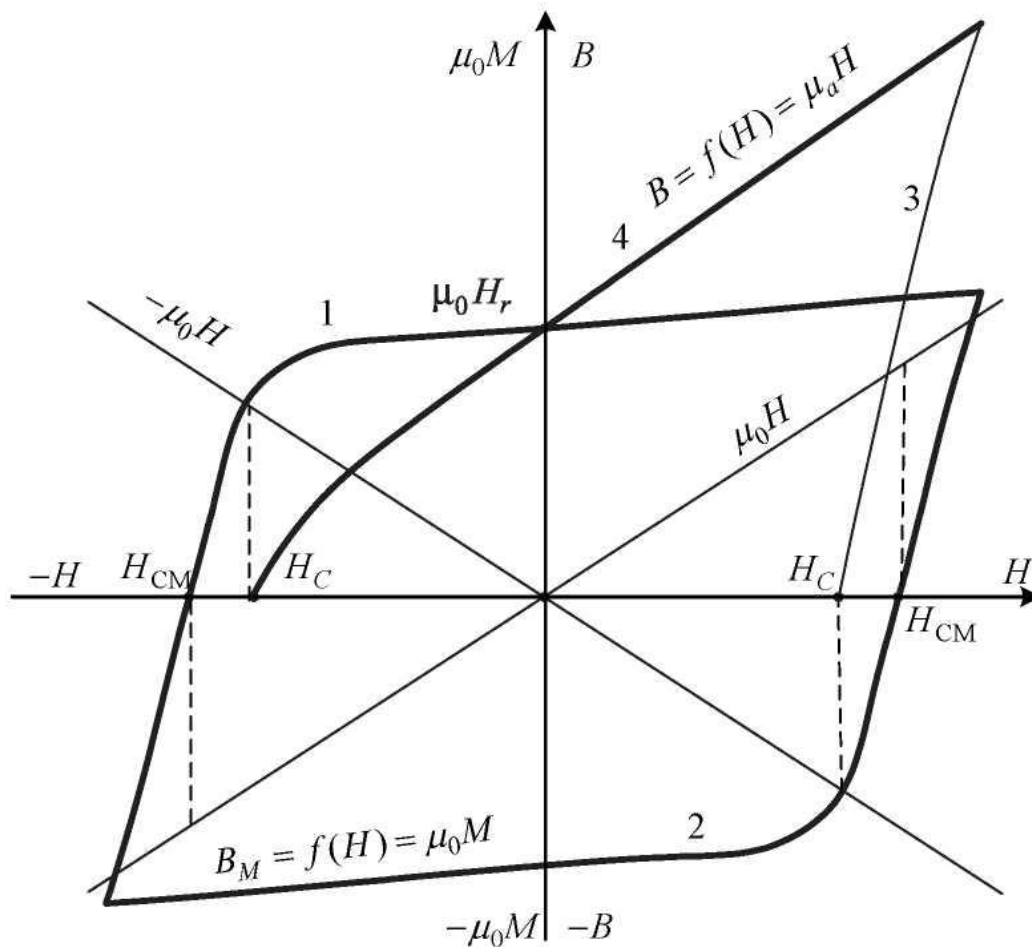


Рисунок 1.1 – Залежності $B_M = \mu_0 M = f(H)$ та $B = f(H)$

Зазначимо, що намагніченість M – векторна величина, що характеризує магнітний стан речовини, що дорівнює межі відношення магнітного моменту елемента об’єму речовини до цього елемента об’єму, коли останній прагне нуля. У ферромагнетиках магнітні моменти атомів або іонів знаходяться в стані

мимовільного впорядкування, причому результуючий магнітний момент кожної з областей з однорідне-упорядкованими магнітними моментами атомів або іонів, тобто магнітний момент домену не дорівнює нулю.

У процесі намагнічування матеріалу, тобто. за наявності зовнішнього поля та насичення матеріалу напрямком всіх векторів намагніченості збігається з напрямком поля. Після усунення останнього вектори намагніченості прагнуть вернутися в найближчий напрямок легкого намагнічування. При цьому в ізотропних матеріалів залишкова намагніченість становить 0,5...0,8 від значення намагніченості насичення.

В анізотропних матеріалів розмагніченому стану відповідає рівному розподілу векторів намагніченості уздовж осі легкого намагнічування. При намагнічуванні до насичення уздовж текстури, що збігається з віссю легкого намагнічування, усі вектори збігаються з напрямком поля, що намагнічує. Після усунення зовнішнього поля напрямком векторів намагніченості зберігається, тому що вісь легкого намагнічування збігається з напрямком текстури та з напрямком поля, що намагнічує. Тому в анізотропних матеріалів залишкова намагніченість близька до намагніченості насичення.

Постійні магніти як джерела магнітного поля характеризуються рядом параметрів, основними з яких є [3]:

а) індукція насичення B_s і відповідна їй напруженість магнітного поля H_s . Ці величини характеризують стан так званого технічного намагнічування матеріалу магніту, при якому всі вектори намагніченості (магнітні моменти) доменів орієнтовані паралельно зовнішньому магнітному полю;

б) залишкова індукція – індукція, що виникає в тороїді або в нескінченно довгому прямому магніті з магнітотвердого матеріалу, попередньо намагніченому до технічного насичення, після зняття, що намагнічує поля. Значення B_r у сучасних магнітах перебуває в межах від 0,2 до 1,5 Тл. Чим більше B_r , тим краще постійний магніт;

в) коерцитивна сила щодо індукції H_c – напруженість поля, що розмагнічує, при якому індукція в магніті стає рівною нулю. Чим більша коерцитивна сила H_c , тим складніше розмагнітити магніт. У сучасних магнітів

H_c досягає 60...100 кА/м, а в магнітах на основі інтерметалевих з'єднань кобальту з рідкісноземельними елементами H_c досягає 500...560 кА/м;

г) коерцитивна сила щодо намагніченості H_{CM} – напруженість поля, що розмагнічує, при якому намагніченість попередньо повністю намагніченого матеріалу доходить до нуля. Коерцитивна сила по намагніченості завжди більше коерцитивної сили по індукції, тобто $H_{CM} > H_c$ (рис. 1.1). Значення коерцитивної сили H_{CM} є критерієм для поділу феромагнітних матеріалів на магнітотверді та магнітом'які. До магнітотвердих відносяться матеріали з $H_{CM} > 1\ 000$ А/м, а до магнітом'яких – матеріали з $H_{CM} < 1\ 000$ А/м;

д) магнітна проникність магніту j_{na} визначається відношенням індукції в в будь-якій точці матеріалу до напруженості магнітного поля в цій точці, причому $\mu_a = \mu_0 \mu$. Сучасні постійні магніти мають малу магнітну проникність $\mu = 5...25$, у той час як в електротехнічних сталей $\mu = (50...300) \cdot 10^3$;

е) максимальна питома магнітна енергія W_{max} – максимальна енергія, що створюється магнітом у зовнішньому просторі одиницею його обсягу. Як відомо, питома магнітна енергія визначається виразом

$$W = \frac{1}{2} BH, \quad (1.3)$$

де H і B – напруженість поля, що розмагнічує, і відповідна їй індукція.

Звідси випливає, що будь-який ідеальний короткозамкнений ланцюг, наприклад, кільце постійного перетину з магнітотвердого матеріалу (рис. 1.2, б) будучи попередньо намагніченим, не може бути джерелом енергії. Дійсно, після відключення обмотки тороїду від джерела живлення напруженість у ньому впаде до нуля. Отже, тороїд виявляється нейтральним і не створює вільної МРС. Весь потік Φ_r , відповідний до залишкової індукції B_r , замикається усередині кільця, а МРС витрачається на падіння магнітного потенціалу на внутрішньому опорі. Якщо вирізати частину кільця (рис. 1.2, в), то з'являється потік поза магнітом, що складається з потоку повітряного зазору Φ_δ і потоку розсіювання Φ_σ .

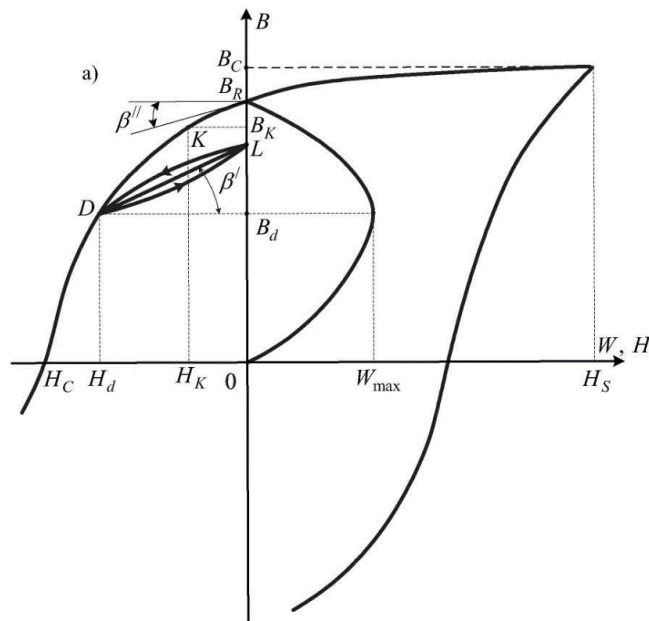


Рисунок 1.2 – Крива розмагнічування (а), кільце з магнітотвердого матеріалу (б), магнітні потоки (в)

Магнітне поле в зазорі має зворотну полярність відносно поля магніту. Дійсно, згідно із законом повного струму,

$$H_{\delta\delta} + H_{lm} = 0 \quad (1.4)$$

і напруженість у магніті виявляється негативною, тобто

$$H = -\frac{H_{\delta\delta}\delta}{l_M}, \quad (1.5)$$

де $H_{\delta\delta}$ – напруженість поля в повітряному зазорі;

δ – довжина повітряного зазору;

l_M – довжина середньої магнітної лінії в магніті.

Магнітний стан розімкнутого магніту буде визначатися точкою К, зміщеною вниз по кривій розмагнічування яка має координати $(B_K; H_K)$, де $B_K < B_R$; $H_K < 0$ (рис. 1.2, а). При цьому питома магнітна енергія в повітряному зазорі, тобто за магнітом:

$$W = \frac{1}{2} B_K H_K. \quad (1.6)$$

Зі збільшенням повітряного зазору збільшується розмагнічуюча напруженість поля і зменшується індукція в нейтральному перетині магніту.

Зовнішня магнітна енергія досягає максимуму в точці D з координатами $(B_d ; H_d)$:

$$W_{max} = \frac{(BH)_{max}}{2} = \frac{1}{2} B_d H_d. \quad (1.7)$$

Зазначимо, що розмагнічувальне поле можна створювати зовнішньою МРС;

ж) коефіцієнт магнітного повернення.

Якщо в будь-якій точці граничної петлі гістерезису, наприклад у межах кривої розмагнічування, тобто в другому квадранті, замінити монотонну зміну напруженості поля в магніті H на циклічну, залежність $B = f(H)$ опише петлю приватного циклу, конфігурація якої залежить від положення точки та величини зміни напруженості. При практичних розрахунках через несуттєвий розчин і кривизну петлі приватного циклу її зазвичай замінюють прямий поворот (відрізок DL на рисунку 1.2 а) і крутість нахилу цієї прямої до осі абсцис приймають рівною коефіцієнту повернення ρ :

$$\rho_B = \frac{\Delta B}{\Delta H} = \operatorname{tg} \beta' \approx \mu_r', \quad (1.8)$$

де μ_r' – проникність повернення або реверсивна проникність.

Крутість прямих повернення, а отже, величина коефіцієнта магнітного повернення залежить від положення точки повернення D на кривій розмагнічування. Зі збільшенням індукції прямих повернення стають пологими і коефіцієнт повернення зменшується. Однак ця зміна незначна. Тому з достатнім наближенням можна вважати ρ_B постійним, рівним величині цього коефіцієнта в точці максимуму енергії магніту. Нерідко коефіцієнт повернення ухвалюють рівним крутості дотичної до кривої розмагнічування в точці $B = B_r$, ($\rho_B = \operatorname{tg} \beta''$);

и) коефіцієнт форми або коефіцієнт опуклості кривої розмагнічування:

$$\gamma = \frac{(BH)_{max}}{B_r H_c} = \frac{B_d H_d}{B_r H_c}. \quad (1.9)$$

Цей коефіцієнт характеризує ступінь наближення кривої розмагнічування до прямокутної форми. Теоретично він може перебувати в межах 0,25...1,0. При $\gamma = 0,25$ крива розмагнічування – пряма, при $\gamma = 1,0$ вона має прямокутну форму. Для більшості сучасних магнітів $\gamma = 0,3...0,65$;

к) залишковий коефіцієнт:

$$\alpha_0 \frac{2\sqrt{\gamma}-1}{\gamma}. \quad (1.10)$$

1.1.3 Короткі відомості про магнітотверді матеріали

Магнітні матеріали, застосовувані для виготовлення постійних магнітів, можна розділити на п'ять груп:

- а) важкодеформовані литі та металокерамічні сплави;
- б) деформовані сплави;
- в) металокерамічні з'єднання;
- г) магнітотверді ферити;
- д) з'єднання на основі рідкісноземельних металів (РЗМ).

До першої групи належать литі та металокерамічні сплави на основі заліза, алюмінію (Ю), нікелю (Н), міді (Д), кобальту (К), титану (Т), ніобію (Б), кремнію (З). Залежно від змісту і способу термообробки вони можуть бути ізотропними та анізотропними. Ізотропні матеріали на відміну від анізотропних не мають переважного напрямку намагнічування [4].

Методи намагнічування залежать від форми та матеріалу постійного магніту, конструкції системи збудження, типу джерела живлення. Намагнічування може бути здійснене постійним струмом за допомогою імпульсної установки, причому напруженість зовнішнього магнітного поля повинна бути не менше шестиразового значення H_c . Петля гістерезису досягає стаціонарного стану після п'яти – семи перемагнічувань.

У випадку анізотропного матеріалу намагнічування здійснюється уздовж текстури, що збігається з віссю легкого намагнічування. При цьому вектори намагніченості збігаються з напрямком поля, що намагнічує, і після усунення останнього зберігають цей напрямок. Це визначає більш високі значення H_c , B_r , W_{max} . Постійні магніти з литих сплавів мають досить гарні магнітні параметри ($B_r = 0,9 \dots 1,5$ Тл; $H_c = 40 \dots 150$ кА/м; $W_{max} = 4 \dots 40$ кДж/м) і їх стабільність, стійкість проти структурного старіння. Однак надзвичайні

твердість і крихкість ускладнюють механічну обробку постійних магнітів, що змушує прибігати до застосування фасонного лиття з наступним шліфуванням поверхонь, що сполучаються. Невисока механічна міцність литих сплавів обмежує застосування виготовлення з них постійних магнітів без арматур лінійними швидкостями 30...50 м/с. У цьому відношенні кращими виявляються сплави на основі заліза, кобальту, молібдену, нікелю, хрому і т. д. Таким матеріалом є, наприклад, платина (Плк78).

Металокерамічні магніти, як правило, виготовляються спіканням порошків магнітотвердих сплавів у вигляді готових виробів не потребуючих додаткової механічної обробки (ММК6, К8,...,К11). Вони мають більш високу механічну міцність (140 м/с) і більш однорідними магнітними властивостями. Однак їх параметри на 15...20 % нижче, чим у литих.

У системах збудження з більшими значеннями фактора, що розмагнічує, і при наявності силових зовнішніх магнітних полів найбільш доцільно застосовувати оксидні постійні магніти з порошків барію та стронцію, наприклад, 7ВІЗ00, 28ВА190, 24БА210, 28СА250 і ін. ($B_r = 0,2...0,4$ Тл; $H_c = 120...270$ кА/м; $W_{max} = 5...15$ кДж/м). Магніти з магнітотвердих феритів мають невисоку вартість (вони в 10 раз дешевші за сплави алько). З фериту барію виготовляються еластичні магнітні матеріали з гумовою основою й наповнювачем із дрібного порошку барію ($B_r = 0,14...0,15$ Тл; $H_c < 100$ кА/м; $W_{max} < 2$ кДж/м³).

Найвищі магнітні властивості мають магніти з інтерметалевих з'єднань кобальту з рідкісноземельними матеріалами, наприклад з самарієм. Однак ці матеріали складні у виробництві та відрізняються дорожнечою (КС37, КСП37). Вартість $SmCo_5$ ($B_r = 0,9...1,0$ Тл; $H_c = 800...900$ кА/м) досягає декількох сотень гривень за кілограм.

Досить перспективним є сплав типу Фенобор на основі заліза (Fe), неодиму (Nd), бору (B): $Nd_2Fe_{14}B$ ($B_r = 1,18$ Тл; $H_c = 774$ кА/м; $W_{max} = 120$ кДж/м³). У США отримано сплав Фенобор NEOMAX – 35: ($B_r = 1,24$ Тл; $H_c = 926$ кА/м; $W_{max} = 142$ кДж/м³).

1.1.4 Особливості конструкції генераторів з постійними магнітами

Конструкції генераторів з постійними магнітами (ГПМ) вирізняються більшим різноманіттям, що пояснюється різними вимогами до їхньої вартості, робочих характеристик, областю застосування, а також відмінністю властивостей використовуваних у них магнітотвердих матеріалів. Індуктор цих машин не має обмотки збудження і йому відносно легше надавати різні конструктивні форми.

У колекторних ГПМ постійного струму найбільш широке застосування отримали магнітні системи з нерухомим індуктором та внутрішнім розташуванням якоря (1), тобто магнітні системи, виконані по типу машини постійного струму з електромагнітним збудженням (рис. 1.3). При цьому для збудження найбільш простих і дешевих мікрогенераторів широке застосування одержали постійні магніти з феритовими з'єднаннями, що мають форму кільцевого сегмента (2) або кільця (3) і намагнічені в радіальному і діаметральному напрямку (рис. 1.3, а, б, в). Можливо також застосування прямокутної форми магніту (рис. 1.3, г, д).

Нерідко магніти забезпечуються магнітом'якими наконечниками (4). Вони виключають утворення залишкової деформації поля від поперечної реакції якоря. У цьому випадку потік реакції якоря замикається по наконечнику, минаючи магніт. Пакет якоря (1) набирається з листів електротехнічної сталі. Корпус генератора (ядро) (5) із шихтованого магнітом'якого матеріалу й має звичайно форму циліндра.

На рисунку 1.3 зображено магнітопровід з постійними магнітами у вигляді скоб (2), які своїми торцевими поверхнями стикаються з бічними поверхнями полюсів (4) з м'якої сталі. Полюси та магніти запресовані в алюмінієвий корпус (6).

У генераторах постійного струму нерідко застосовується магнітна система з кільцевим магнітом – корпусом (2) (рис. 1.3, ж). При цьому індуктор виконується як двополюсним так і чотириполісним. З метою полегшення конструкції, кільцевий магніт у місцях розташування полюсів може мати

плоскі зрізи. У більш дорогих генераторах постійного струму застосовуються спеціальні конструкції магнітопроводів (рис. 1.3, и, к). У них використовуються постійні магніти (2) з магнітотвердих сплавів (Al, Ni, Co) або магніти, виготовлені на базі рідкісноземельних елементів. Нерідко конструкція має безкорпусне виконання (рис. 1.3, и) з кутовим розташуванням полюсів (4), виконаних з магнітом'якого матеріалу. Пакет якоря 1 набирається з листів високоякісної сталі.

Спеціальні конструкції магнітопроводів знаходять широке застосування у виконавчих машинах постійного струму із гладким і порожнім якорем. У вентильних машинах постійного струму та синхронних генераторах переважно застосування одержали магнітопроводи із зовнішнім розташуванням якоря (1) і обертовим індуктором (2) (рис. 1.4). Однак у ряді спеціальних випадків вентильні машини постійного струму можуть виконуватися із зовнішнім обертовим індуктором і нерухливим внутрішнім якорем (рис. 1.3, в).

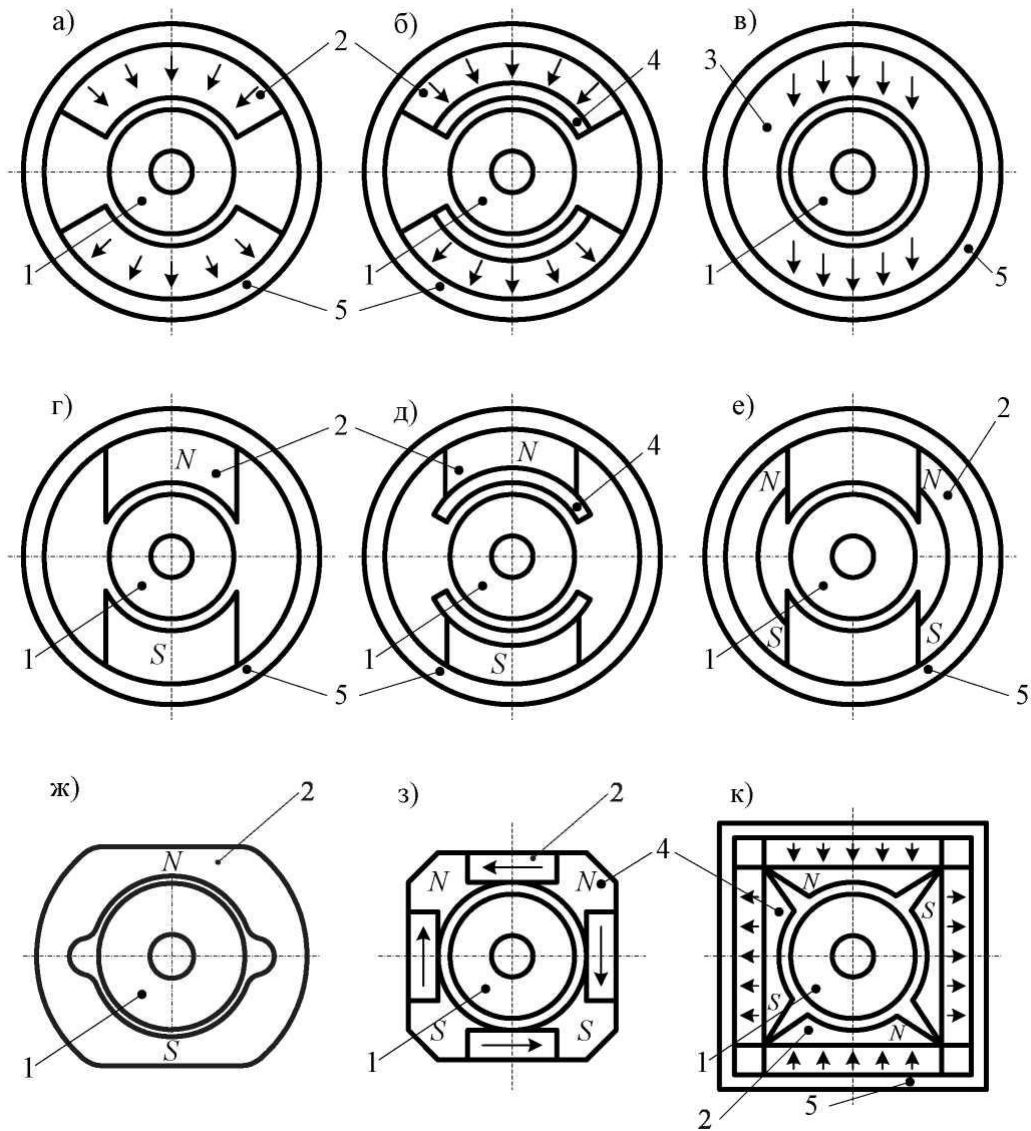


Рисунок 1.3 – Конструкції генераторів з постійними магнітами

Циліндричні магніти (рис. 1.4, а, б) застосовують для генераторів потужністю 50...60 Вт. Магніт розташовується безпосередньо на немагнітний вал (рис. 1.4, а) або на немагнітну втулку (рис. 1.4, б). Конструкції відрізняються простотою виготовлення, однак мають істотний недолік: погане використання матеріалу магніту.

Індуктор розглянутих ГПМ дуже часто виконуються у вигляді зірочки з явними полюсами без полюсних наконечників (рис. 1.4, в, г). Індуктор може бути монолітним (рис. 1.4, в) або складним (рис. 1.4, г). У першому випадку магніт – зірочка (2) кріпиться на валу шляхом заливання цинковим або алюмінієвим сплавом (3) або безпосередньо заливається на валу при виливку. Сплав також виконує роль демпферної клітини. Індуктор такого типу має

високий коефіцієнт заповнення обсягу магнітом, однак має високу чутливість до впливу реакції якоря.

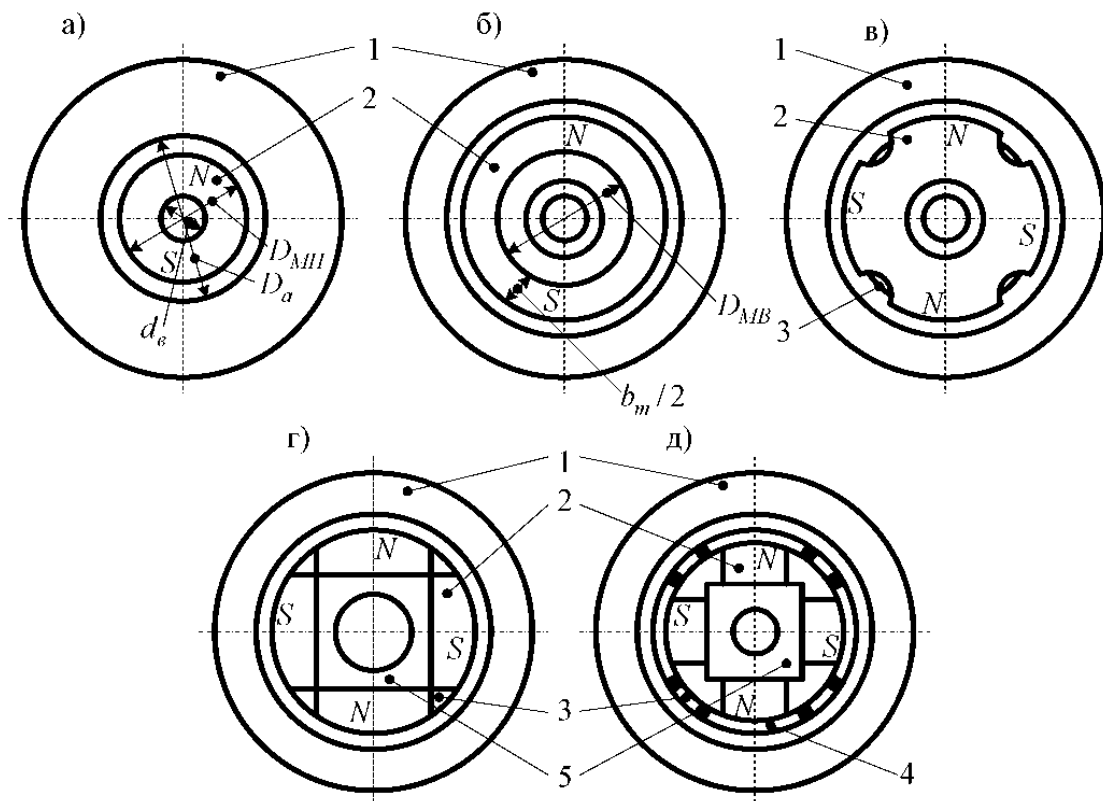


Рисунок 1.4 – Особливості конструкції вентильних і синхронних машин

У складеному індукторі (рис. 1.4 г) застосовуються постійні магніти призматичної форми (2), які кріпляться на втулці (5) шляхом заливання спеціальними сплавами або смолами. Для поліпшення кріплення на їхніх бічних гранях передбачаються шліци (канавки). Дана конструкція забезпечує більш високе використання магніту та характерна для анізотропних сплавів зі стовпчастою структурою.

На рисунку 1.4, д зображено складений індуктор із призматичними постійними магнітами (2), забезпеченими полюсними наконечниками (4). Для додання ротору необхідної міцності наконечники зварюють із ділянками з немагнітної сталі. Магніти намагнічуються в зібраному стані. Полюсні наконечники внаслідок їхнього демпфуючого впливу, зменшують дію реакції якоря, що розмагнічує, при пусках і реверсах, а також запобігають утворенню

залишкових деформацій поля від поперечної реакції якоря. Крім того, вони дозволяють одержати необхідну форму поля в повітряному зазорі.

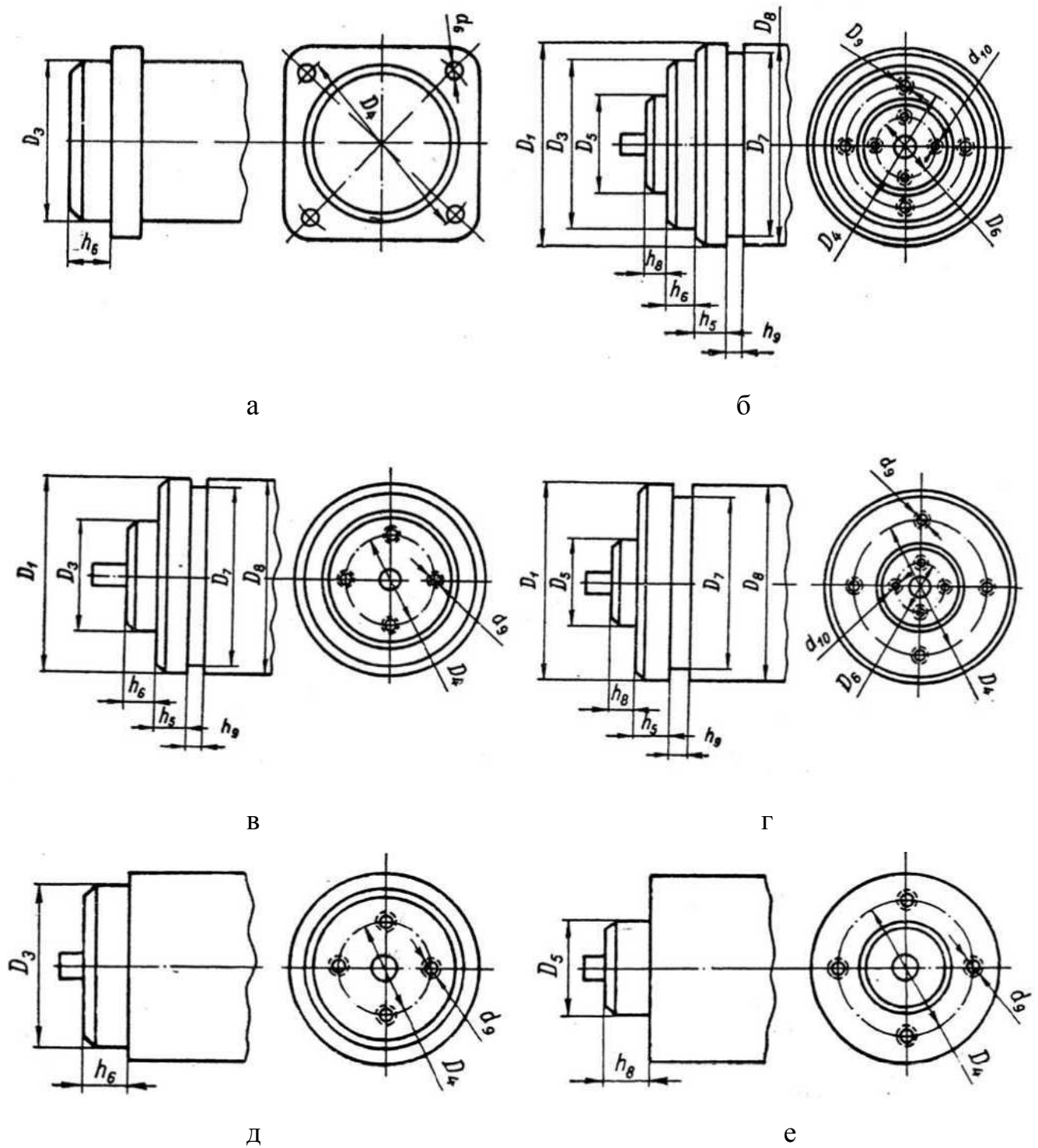


Рисунок 1.5 – Типи фланцевих кріплень електричних генераторів:

а – виконання 1; б – виконання 2; в – виконання 3; г – виконання 4;

д – виконання 5; е – виконання 6

Для ГПМ передбачено три види кріплення: фланцеве, на лапах, на лапах із фланцем. При цьому найбільш зручним є фланцеве кріплення, яке має шість виконань (див. рис. 1.5):

а) звичайне (негерметичне) і герметичне із гладкими прохідними отворами під болти і гвинти (рис. 1.5, а);

б) універсальне з упорним бортиком, виточенням і двома заточками, що центрують, – великою і малою (рис. 1.5, б);

в) з упорним бортиком, виточенням і великою центрувальною заточкою (рис. 1.5, в);

г) з упорним бортиком, виточенням і малою центрувальною заточкою (рис. 1.5, г);

д) без виточення з великим заточенням, що центрує (рис. 1.5, д);

е) без виточення з малим заточенням, що центрує (рис. 1.5, е).

Для деяких виконань ГПМ Держстандарт України регламентує також зовнішній діаметр корпусу та інші лінійні розміри.

1.1.5 Робоча діаграма магніту

Робоча діаграма магніту являє собою сукупність кривої розмагнічування та додаткових графічних побудов, що дозволяє встановити зв'язок між параметрами магніту і параметрами зовнішнього магнітного ланцюга, а також зовнішнім магнітним полем. Ця діаграма лежить в основі розрахунків магнітних ланцюгів з постійними магнітами.

При практичних розрахунках і теоретичному аналізі магнітних ланцюгів з постійними магнітами найбільш зручно використовувати робочу діаграму, побудовану у відносних одиницях [5]. При цьому в якості основних базових одиниць ухвалюються наступні величини:

$$B_B = B_r, \text{ Тл}; H_B = H_C, \text{ А/м}; Q_B = Q_m, \text{ м}^2; l_B = h_m, \text{ м}, \quad (1.11)$$

де $Q_m = b_m \cdot l_m$ – площа нейтрального перетину, перпендикулярного магнітним лініям магніту, і знаходиться на рівній відстані від кінців магніту;

b_m ; l_m – ширина й осьова довжина магніту в нейтральному перетині;

h_m – довжина середньої силової лінії в магніті на один полюс.

Похідними базовими одиницями є:

– магнітна проникність $\mu_B = B_r / H_c$, Гн/м;

– МРС магніту на пару полюсів $F_B = F_C = 2hmhc$, А;

– магнітний потік $\Phi_B = \Phi_C = BrQm$, Вб;

– магнітна провідність $\Lambda_B = \Phi_C / F_C = \frac{BrQm}{2hmH_c}$, Гн; (1.12)

– магнітний опір $R_B = 1 / \Lambda_B = \frac{2H_c hm}{BrQm}$, Гн⁻¹;

– питома магнітна енергія $W_B = Brhc$, Дж/м.

Відповідні величини у відносних одиницях будуть такими :

$$B^* = \frac{B}{B_r}; H^* = \frac{H}{H_c}, \Phi^* = \frac{\Phi}{\Phi_c}, F^* = \frac{F}{F_c};$$

$$W^* = \frac{\frac{1}{2}BH}{\frac{1}{2}B_r H_c} = B^* H^*; \rho^* = \frac{H_c}{B_r} \frac{\Delta B}{\Delta H} = \frac{\Delta B^*}{\Delta H^*}. \quad (1.13)$$

$$\Lambda^* = \frac{H_c}{B_r} \frac{2hm}{Q_m} \Lambda = \frac{H_c}{B_r} \lambda = \lambda^*$$

$$\Lambda_{\delta^*} = \frac{H_c}{B_r} \frac{2hm}{Q_m} \Lambda_{\delta} = \frac{H_c}{B_r} \lambda_{\delta} = \lambda_{\delta^*}$$

$$\Lambda_{\sigma^*} = \frac{H_c}{B_r} \frac{2hm}{Q_m} \Lambda_{\sigma} = \frac{H_c}{B_r} \lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma^*}, \quad (1.14)$$

де $\lambda, \lambda_{\delta}, \lambda_{\sigma}$ – наведені магнітні провідності, Гн/м: повна, повітряного зазору та розсіювання, відповідно рівні:

$$\lambda = \frac{2hm}{Q_m} \Lambda; \lambda_{\delta} = \frac{2hm}{Q_m} \Lambda_{\delta}; \lambda_{\sigma} = \frac{2hm}{Q_m} \Lambda_{\sigma},$$

$\lambda^*, \lambda_{\delta}^*, \lambda_{\sigma}^*$ – відносне значення тих же наведених провідностей.

При цьому

$$A_{\delta} = \mu_0 \frac{Q_{\delta}}{2\delta'} = \mu_0 \frac{\alpha_{\delta} \tau l_{\delta}}{2\delta'}, \quad (1.15)$$

де $Q_{\delta} = \mu_0 \frac{\alpha_{\delta} \tau l_{\delta}}{2\delta'}$ – площа повітряного зазору під полюсом, м ;

$\alpha_{\delta} = 0,65 \dots 0,75$ – коефіцієнт розрахункової полюсної дуги;

$\tau = \pi D_a / 2p$ – полюсний розподіл, м;

D_a – діаметр розточення статора або зовнішній діаметр якоря, м;

p – число пар полюсів;

l_{δ} – розрахункова осьова довжина повітряного зазору, м;

$\delta' = k_{\delta} \delta$ – розрахунковий повітряний зазор, м.

Відзначимо, що відносні значення магнітних провідностей дуже зручно використовувати при побудові робочої діаграми магніту, тому що вони чисельно безпосередньо дорівнюють тангенсам кутів нахилу прямих відповідних провідностей до осі абсцис. Надалі індекс «*» будемо опускати. Можливі відступи від цього правила будуть додатково оговорюватися.

Як відзначалося вище, короткозамкнений магнітний ланцюг з постійним магнітом не може бути джерелом магнітної енергії в зовнішньому просторі. Енергія може з'являтися тоді, коли опір зовнішнього магнітного ланцюга не дорівнює нулю. При цьому вільна МРС, що створюється магнітом суттєво залежить від величини цього опору й зовнішньої МРС (наприклад, МРС реакції якоря).

Розглянемо побудову робочої діаграми магніту стосовно до магнітних ланцюгів із внутрішнім (рис. 1.6, а) і зовнішнім (рис. 1.6, в) розташуванням індуктора. Перша конструкція характерна для синхронних генераторів, а друга – для колекторних генераторів. В обох випадках магнітний ланцюг містить у собі індуктор у вигляді постійного магніту прямокутної форми, двосторонній повітряний зазор і зовнішній (внутрішній) магнітопровід. Нерідко постійний магніт має полюсні наконечники. Попутно відзначимо, що в конструкції із зовнішнім розташуванням індуктора (рис. 1.6, в) нейтральний перетин магніту перебуває в місці стику полюсів зі станиною. Якщо магніт попередньо намагнічений у спеціальному пристрої, то його властивості у вільному стані поза зібраною конструкцією (рис. 1.6, б, г) характеризуються точкою К на кривій розмагнічування (рис. 1.7). Положення цієї точки визначається магнітною провідністю зовнішнього магнітного ланцюга вільного магніту, тобто його магнітною провідністю розсіювання у вільному стані $\Lambda_{\text{св}}$.

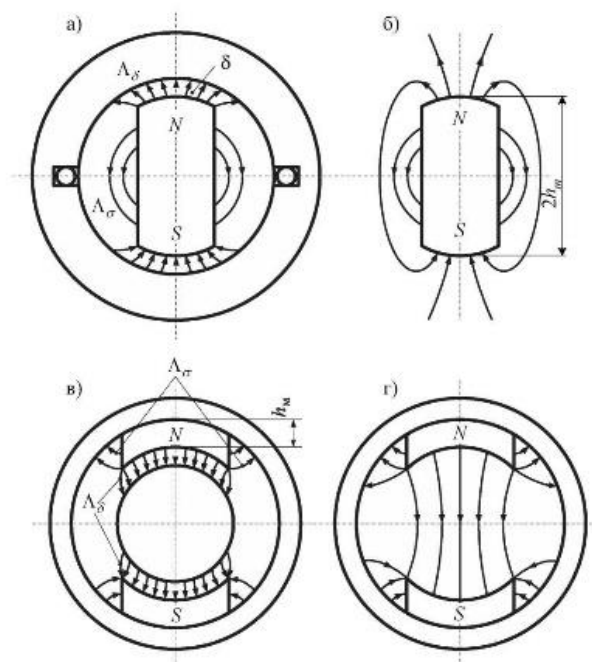


Рисунок 1.6 – Магнітні ланцюги із внутрішнім і зовнішнім розташуванням індуктора

Якщо такий магніт поєднати з магнітопроводом машини (рис. 1.6, а, в), то провідність зовнішнього магнітного ланцюга збільшиться і точка, що характеризує магнітний стан магніту, переміститься на діаграмі (рис. 1.7) по прямій повернення KN у точку Р. Точка N відповідає короткому замиканню, тобто магнітної провідності зовнішнього магнітного ланцюга, рівної нескінченності. При намагнічуванні магніту в зібраній конструкції його магнітний стан визначається точкою Р, розташований на кривій розмагнічування вище точки К [6].

Таким чином, визначення магнітного стану постійного магніту пов'язане з визначенням магнітних провідностей окремих ділянок його магнітного ланцюга.

Повна провідність зовнішнього ланцюга магніту в зібраній конструкції Λ складається з корисної провідності Λ_{δ} (провідності повітряного зазору) і провідності розсіювання Λ_{σ} : $\Lambda = \Lambda_{\delta} + \Lambda_{\sigma}$. Корисна провідність визначає величину корисного потоку в робочій частині магнітопроводу, а провідність Λ_{σ} у загальному випадку містить у собі провідність розсіювання магніту $\Lambda'_{\sigma M}$ і провідність розсіювання його полюсних наконечників, $\Lambda_{\sigma H}$, причому

$$\Lambda'_{\sigma M} = k_{\lambda} \Lambda_{\sigma M} ; \Lambda_{\sigma} = \Lambda'_{\sigma M} + \Lambda_{\sigma H} = k_{\lambda} \Lambda_{\sigma M} + \Lambda_{\sigma H} ,$$

де $\Lambda'_{\sigma M}$ – розрахункова провідність розсіювання магніту;

$\Lambda_{\sigma M}$ – дійсна провідність розсіювання магніту, обумовлена по його геометричних розмірах;

$k_\lambda = 0,5 \dots 0,65$ – розрахований або експериментально підібраний коефіцієнт, що враховує падіння МРС по довжині магніту (при лінійному падінні МРС $k_\lambda = 0,5$) [2].

Використання в практичних розрахунках провідності розсіювання $\Lambda_{\sigma M}$ пов'язане з тим, що потік розсіювання обумовлює нерівномірний розподіл потоку в магніті по його довжині (висоті). У результаті цього напруженість уздовж магніту не залишається постійною, а змінюється за певним законом. З метою спрощення розрахунків дійсний потік розсіювання, що залежить від розподілу МРС магніту по його довжині (висоті), замінюють еквівалентним розрахунковим потоком $\Phi'_{\sigma M}$, який проходить по всій довжині магніту і виходить цілком з поверхні полюса, зверненої до повітряного зазору разом з корисним потоком Φ_δ і потоком розсіювання полюсних наконечників $\Phi_{\sigma ll}$ (при наявності останніх). Тоді

$$\Phi_M = \Phi_\delta + \Phi'_{\sigma M} + \Phi_{\sigma ll} = \Phi_\delta + \Phi_\sigma, \quad (1.16)$$

де Φ_M – повний розрахунковий потік у нейтральному перетині магніту; Φ_σ – повний розрахунковий потік розсіювання. Відзначимо, що потокам Φ_M , Φ_δ , і Φ_σ відповідають магнітні індукції B_M , $B_{\delta M}$, и B_σ . При цьому $B_{\delta M}$ – індукція в повітряному зазорі (δ), наведена до нейтрального перетину:

$$B_{\delta M} = B_\delta \frac{Q_\delta}{Q_m} = B_\delta \frac{\alpha_\delta t l_\delta}{b_m l_m}. \quad (1.17)$$

Стан магніту залежно від магнітної провідності зовнішнього ланцюга може бути визначений за кривою розмагнічування і прямою повернення. Точки P' і K (рис. 1.7) характеризують стан магніту при двох граничних значеннях повної провідності $\Lambda(\lambda)$, причому перехід з першої точки в другу відбудеться, якщо після попереднього намагнічування магніту в зібраній конструкції вилучити зовнішній магнітопровід. Тому що повна відносна провідність Λ_* (λ_*) являє собою тангенс кута нахилу відповідний до прямої до осі абсцис, то точка P' і K визначаються перетином променів OP' і OK , проведеним із точки O під

кутами α і $\alpha_{\sigma CB}$ до згаданої осі, із кривої розмагнічування (рис. 1.7). Як відзначалося вище, стан магніту залежить не тільки від магнітної провідності зовнішнього ланцюга, але й від впливу зовнішнього поля. Дійсно, зсув униз точки P' по кривій розмагнічування може бути здійснене безпосередньо в зібраній конструкції, якщо створити за допомогою обмотки, розташованої на магнітопроводі, зовнішнє поле, що розмагнічує.

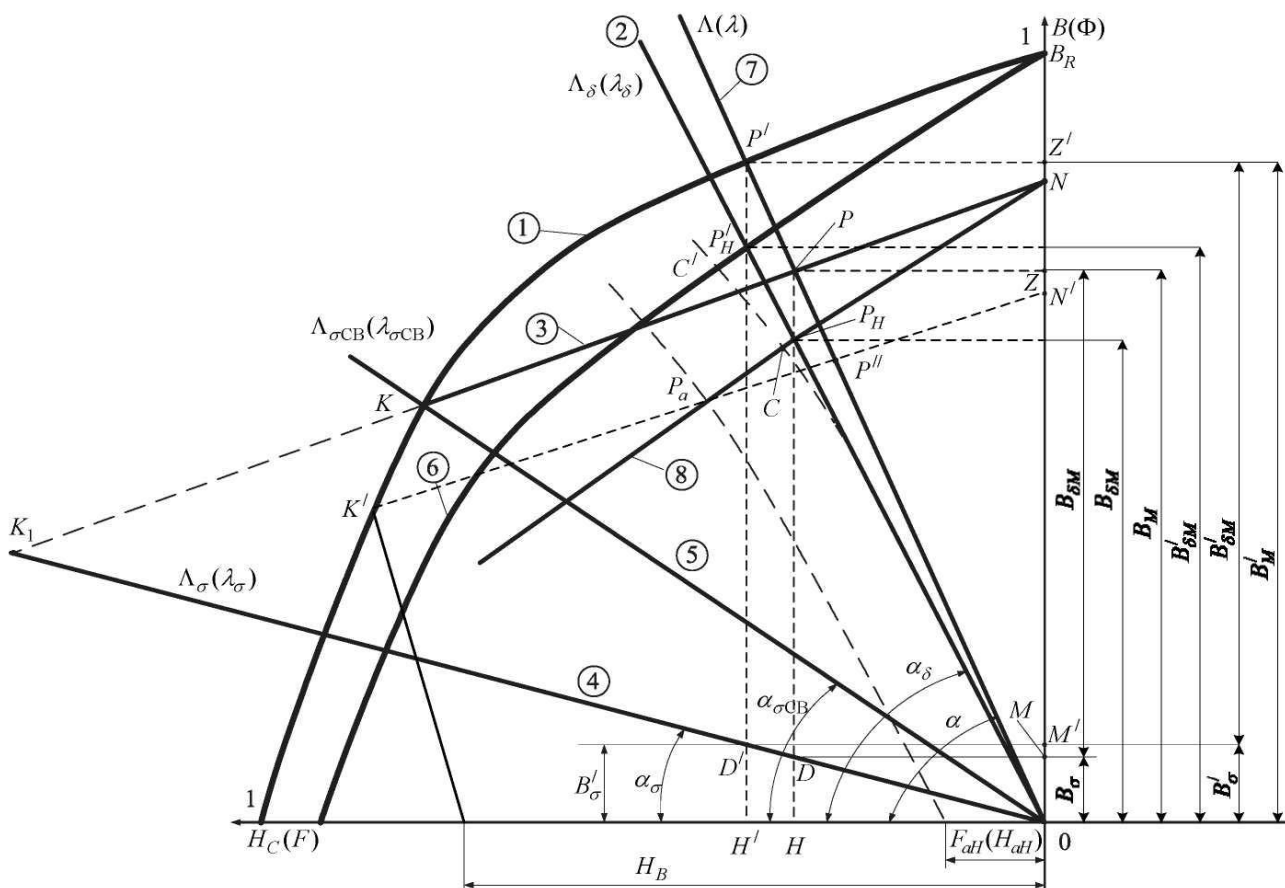


Рисунок 1.7 – Робоча діаграма магніту

При цьому залежно від величини поля точка магнітного стану може виявитися вище або нижче точки K . На діаграмі (рис. 1.7) точка K' відповідає магнітному стану магніту при наявності зовнішнього поля напруженістю H_B . Вона є точкою відходу нової прямої повернення $K'N'$. Після відновлення конструкції або зняття зовнішнього поля магнітний стан магніту зміниться по прямій повернення KN або $K'N'$ і буде характеризуватися точкою P або P'' (перетинання названих прямих із променем).

В електричних машинах робоча точка, що характеризує магнітний стан магніту, як правило, перебуває на прямій повернення, точка відходу якої визначається мінімальним значенням зовнішньої провідності магнітного ланцюга або максимальним значенням дії, що розмагнічує, зовнішнього поля. З метою підвищення стійкості властивостей постійних магнітів їх піддають стабілізації. Стабілізація здійснюється розмагнічуванням, яке трохи перевершує максимально можливе розмагнічування магніту в процесі його експлуатації.

Опис робочої діаграми магніту (рис. 1.7):

1. Крива розмагнічування в в. о.
2. Пряма корисної провідності $\Lambda_{\delta}(\lambda_{\delta})$.
3. Пряма повернення КN магніту, стабілізованого повітрям.
4. Пряма провідності розсіювання магніту в зібраній конструкції $\Lambda_{\sigma}(\lambda_{\sigma})$.
5. Пряма провідності розсіювання вільного магніту $\Lambda_{\sigma CB}(\lambda_{\sigma CB})$.
6. Крива корисного потоку магніту в зібраній конструкції (в в.о.).
7. Пряма повної провідності магніту в зібраній конструкції $\Lambda = \Lambda_{\delta} + \Lambda_{\sigma}$.
8. Пряма корисного потоку магніту стабілізованого повітрям.

На рисунку пунктиром зображена пряма повернення К'N', що виходить після додатка, що розмагнічує дію зовнішнього поля (H_B, F_B).

Суть і необхідність стабілізації магніту, що працює на прямій повернення:

а) точки на діаграмі магніту (рис. 1.7) :

PP – точка, що визначає стан магніту, намагніченого в зібраній конструкції (B'_M);

P – H – точка, що визначає корисний потік нестабілізованого магніту ($B'_{\delta M}$);

P – точка, що визначає стан магніту, стабілізованого повітрям (B_M);

PH – точка, що визначає корисний потік магніту, стабілізованого повітря (B_{SM});

C^1 – точка, що визначає корисний потік нестабілізованого магніту при обліку насичення зовнішнього магнітного ланцюга;

C – точка, що визначає корисний потік магніту, стабілізованого повітрям, при обліку насичення зовнішньому магнітному ланцюга;

P_a – точка, що визначає корисний потік магніту, стабілізованого повітрям, при обліку дії, що розмагнічує, реакції якоря;

K^1 – точка відходу прямій повернення при стабілізації магніту зовнішнім полем, що розмагнічує;

б) характерні величини:

B_M^1 – індукція в нейтральному перетині нестабілізованого магніту;

B_{SM}^1 – індукція в повітряному зазорі нестабілізованого магніту, наведена до нейтрального перетину;

B_a^1 – індукція розсіювання нестабілізованого магніту;

B_M – індукція в нейтральному перетині магніту, стабілізованого повітрям;

B_{SM} – індукція в повітряному зазорі магніту, стабілізованого повітрям, наведена до нейтрального перетину;

B_a – індукція розсіювання нестабілізованого магніту.

1.1.6 Застосування робочої діаграми магніту для розрахунків генераторів з постійними магнітами

Критерієм правильності вибору основних розмірів магнітопроводів електричних машин із збудженням від постійних магнітів може бути величина питомої магнітної енергії в повітряному зазорі (корисної енергії). Для магніту, стабілізованого в повітрі і працюючого на прямій повернення (рис. 1.7), ця енергія, виражена у відносних одиницях, дорівнює площі прямокутника $DPZM$, тобто

$$W_\delta = B_{\delta M} H = \frac{B_M H}{k_\sigma},$$

де k_σ – коефіцієнт магнітного розсіювання,

$$k_\sigma = \frac{\lambda_\delta + \lambda_\sigma}{\lambda_\delta} = \frac{\lambda}{\lambda_\delta}.$$

Максимуму зазначена площа досягає, коли точка ділить відрізок K_1N навпіл [3]. Таке положення робочої точки на прямій повернення може бути

забезпечене шляхом відповідного вибору величини повітряного зазору. При цьому передбачається, що зміна розмірів останнього не відбивається на провідності розсіювання. Якщо магніт намагнічений у зібраній конструкції й не зазнає сторонньому впливу, що розмагнічує (нестабілізований магніт), то корисна магнітна енергія рівна площі прямокутника $D_1P_1Z_1M_7$, тобто:

$$W'_\delta = B'_{\delta M} H' = \frac{B'_M H'}{k_\sigma}.$$

Максимальне значення цієї площі й, отже, оптимальне положення робочої точки P^1 може бути визначене графічно шляхом декількох проб при різних розмірах повітряного проміжку.

При проектуванні електричної машини завдання раціонального вибору її основних розмірів і геометрії окремих частин вирішується з урахуванням конкретних вимог технічного завдання й забезпечення належного теплового режиму. З іншого боку, габарити машини і її геометрія можуть бути задані, і в процесі розрахунків потрібно здійснити оптимізацію по тому або іншому показнику. У цих умовах конфігурація індуктора часто визначається конструктивними міркуваннями, і завдання зводиться лише до вибору розмірів і матеріалу, що забезпечують його мінімальний обсяг, тобто до відшукування оптимальної робочої точки, відповідної до максимуму магнітної енергії. Однак конструктивні й інші обмеження не завжди дозволяють розв'язати поставлене завдання, і тоді доводиться миритися лише з наближенням до роботи магніту в оптимальній точці. Вибір геометрії постійного магніту в розглянутому випадку проводиться в припущенні, що розміри повітряного зазору попередньо визначені й задані в ході розрахунків електричної машини. Це дозволяє знайти зразкові відносні значення наведеної провідності повітряного зазору і повної провідності виходячи з формул (1.14), (1.15):

$$\Lambda_{\delta*} = \frac{H_C}{B_r} \frac{2h_m}{Q_m} \Lambda_\delta = tg\alpha; \quad \lambda_* = k_\sigma \lambda_{\delta*} = tg\alpha,$$

де коефіцієнт розсіювання k_σ попередньо задається або розраховується орієнтовно.

Робоча точка магніту, відповідно вище викладеному, перебуває на перетинанні променю $O\lambda$ із кривої розмагнічування (P^1) або прямій повернення

(Р) залежно від умов роботи магніту. Відносні значення потоку в нейтральному перетині й вільної МРС повинні в цьому випадку задовольняти наступним співвідношенням:

$$\Phi_{M*} = B_{M*} = k_{\sigma} \Phi_{\delta*} = k_{\sigma} B_{\delta M*} = k_{\sigma} B_{\delta M*} \frac{Q_{\delta}}{Q_m}; \quad (1.18)$$

$$F_{\delta*} = H_{\delta*} \frac{\delta'}{h_m} = \frac{B_{\delta*}}{\mu_{0*}} \frac{\delta'}{h_m}, \quad (1.19)$$

де $\Phi_{\delta*}$ і $B_{\delta*}$ – задані або попередньо розраховані відносні значення потоку й індукції в повітряному зазорі: $\delta' = k_{\delta} \delta$.

Якщо рівності (1.18) і (1.19) не задовольняються, то проводиться коректування розмірів постійного магніту, а при необхідності заміна марки магнітотвердого матеріалу.

Викладений порядок розрахунків постійного магніту ставиться до випадку, коли зовнішній магнітний ланцюг, що полягає з повітряного зазору й сталевго магнітопроводу, не насичена. При наявності насичення магнітному ланцюга для графічного визначення робочої точки магніту на його робочій діаграмі (рис. 1.7) будують криву намагнічування (магнітну характеристику) зовнішнього магнітного ланцюга у відносних одиницях, тобто залежність $\Phi_{\delta*} = f(F_{\delta*})$, розраховану за відомою методикою [5] і зображену у вигляді штрихової кривої. Точки перетинання останньої С і С¹ із прямої 8 і кривої 6 представляють робочі точки стабілізованого й нестабілізованого магніту, визначають потік (магнітну індукцію) у повітряному зазорі з урахуванням насичення. При наявності в машині реакції якоря, що розмагнічує, індукція й потік у повітряному зазорі стабілізованого магніту визначаються точкою перетинання Ра магнітної характеристики, зміщеної паралельно самої собі на величину МРС реакції якоря F_{aH} , із прямої 8.

Однак у приблизних розрахунках нерідко дійсну магнітну характеристику заміняють лінією магнітної провідності еквівалентного повітряного зазору, відносне значення якої визначається із (1.14):

$$\Lambda_{\delta e*} = \lambda_{\delta e*} = \frac{H_C}{B_r} \frac{2h_m}{Q_m} \Lambda_{\delta e} = \frac{H_C}{B_r} = \lambda_{\delta e}, \quad (1.20)$$

де

$$\Lambda_{\delta\sigma} = \mu_0 \frac{Q_{\delta}}{2\delta_e} = \mu_0 \frac{\alpha_{\delta}\tau l_{\delta}}{2\delta_e}, \quad (1.21)$$

де $\delta_e = k_{\delta} k_{\mu} \delta$ – еквівалентний повітряний зазор;

k_{μ} – коефіцієнт насичення.

У цьому випадку, усі наведені вище побудови залишаються без зміни, причому пряма 2 проводиться під кутом до осі абсцис.

1.1.7 Схема заміщення магнітному ланцюга з постійними магнітами

При розрахунках магнітного ланцюга генератора, що містить постійний магніт, нерідко цей ланцюг представляють у вигляді схеми заміщення [4].

Зобразимо найпростіший магнітний ланцюг з постійним магнітом (рис. 1.8, а) і введемо поняття фіктивної коерцитивної сили й фіктивної МРС магніту, що дозволяє замінити його джерелом МРС із внутрішнім опором $R_M = 1 / \Lambda_M = 1 / \rho_B$. Попутно відзначимо, що всі величини виражаються у відносних одиницях. Припустимо, що магніт стабілізований у вільному стані у точці К відходу прямій повернення якої відповідають параметри B_K, Φ_K, H_K, F_K . Якщо продовжити пряму повернення вліво (рис. 1.8, б), то вона перетне вісь абсцис у точці $H_{MO}(F_{MO})$. Напруженість H_{MO} називають фіктивною коерцитивною силою, а F_{MO} – фіктивною МРС магніту. При цьому:

$$H_{MO} = H_K + B_K / \Lambda_M, \quad (1.22)$$

$$F_{MO} = F_K + \Phi_K / \Lambda_M. \quad (1.23)$$

При холостому ході, тобто при $I = 0$, робоча точка Р (рис. 1.8, б) перебуває на прямій повернення, причому $F_M = F_{\delta} = F_{\sigma}$ і $\Lambda_p = \Lambda_{\delta} + \Lambda_{\sigma}$. При навантаженні ($I \neq 0$) і $F_{MN} = F_{\delta} \pm F_B$, де F_B зовнішня МРС («+» відповідає, що МРС розмагнічує, «-», що МРС намагнічує). Схема заміщення магнітного ланцюга, зображеного у вигляді найпростішої моделі на рисунку 1.8, а, наведена на рисунку 1.8, в. Тут $R_s = 1 / \Lambda_s$ – ураховує потік розсіювання обмотки сердечника (якоря) Φ_s . Схема заміщення при стабілізованому магніті є аналогом електричного ланцюга, отже, може бути розрахована на основі теорії електричних кіл.

Безпосередньо зі схеми заміщення будемо мати:

$$F_{MO} = F_{MN} (R_M + R_\sigma) - \Phi_\delta R_\sigma, \quad (1.24)$$

$$-F_B = -\Phi_{MN} R_\sigma + \Phi_\delta (R_\delta + R_\sigma), \quad (1.25)$$

або

$$F_{MO} = \Phi_{MN} \left(\frac{\Lambda_M + \Lambda_\sigma}{\Lambda_M \Lambda_\sigma} \right) - \Phi_\delta \frac{1}{\Lambda_\sigma}, \quad (1.26)$$

$$-F_B = -\Phi_{MN} \frac{1}{\Lambda_\sigma} + \Phi_\delta \left(\frac{\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma}{\Lambda_\delta \Lambda_\sigma} \right). \quad (1.27)$$

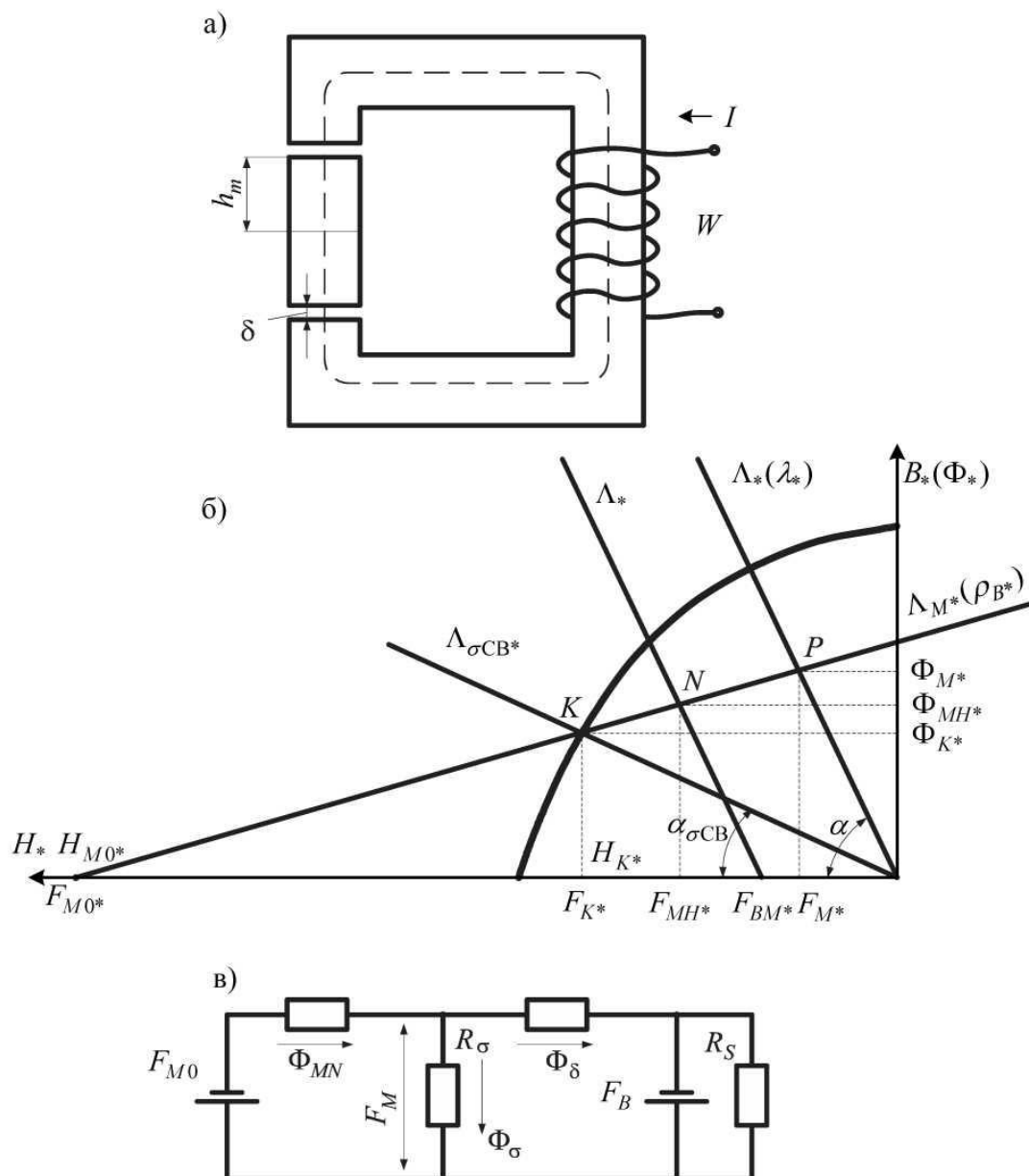


Рисунок 1.8 – Найпростіший магнітний ланцюг з постійним магнітом

У результаті спільного розв'язку рівнянь (1.26) і (1.27) можна визначити магнітний потік у нейтральному перетині магніту Φ_{MN} і відповідну йому МРС F_{MN} при наявності зовнішньої МРС F_B , наприклад, МРС реакції якоря, тобто координати робочої точки магніту N:

$$\Phi_{MN} = (F_{MN} - F_{BM}) \left(\frac{\Lambda_M \Lambda}{\Lambda_M + \Lambda} \right), \quad (1.28)$$

$$F_{MN} = \left(F_{MO} + F_{BM} \frac{\Lambda}{\Lambda_M} \right) \left(\frac{\Lambda_M}{\Lambda + \Lambda_M} \right), \quad (1.29)$$

де $F_{BM} = F_b \Lambda_\delta / (\Lambda_\delta + \Lambda_\sigma)$ – зовнішня МРС, прикладена безпосередньо до полюсам магніту.

Магнітний потік у повітряному зазорі:

$$\Phi_\delta = \left(F_{MO} - F_{BM} \frac{\Lambda(\Lambda_M + \Lambda_\sigma)}{\Lambda_M \Lambda_\delta} \right) \frac{\Lambda_\delta \Lambda_M}{\Lambda_M + \Lambda}. \quad (1.30)$$

Корисна енергія, що створюється магнітом у зовнішньому просторі, з урахуванням впливу зовнішньої МРС буде:

$$W_\delta = \Phi_\delta F_{MN} = \left(F_{MO} - F_{BM} \frac{\Lambda_\sigma + \Lambda_M}{\Lambda_\delta \Lambda_M} \Lambda \right) \left(F_{MO} + F_{BM} \frac{\Lambda}{\Lambda_M} \right) \frac{\Lambda_\delta \Lambda_M^2}{(\Lambda + \Lambda_M)^2}. \quad (1.31)$$

1.1.8 Апроксимація кривої розмагнічування й характеристики магнітного повернення. Аналітичне визначення робочої точки постійного магніту

При апроксимації кривої розмагнічування необхідно виконати умови, щоб ця крива проходила через три точки, координати яких (H_c , B_r , H_d , B_d) визначені відповідними стандартами. У наш час поширення набула апроксимуюча формула:

$$B = B_r \frac{H_c - H}{H_c - a_0 H}, \quad (1.32)$$

де

$$a_0 = 2 \sqrt{\frac{B_r H_c}{B_d H_d}} - \frac{B_r H_c}{B_d H_d}, \quad (1.33)$$

де H і B – поточне значення напруженості магнітного поля й індукції;

H_c – коерцитивна сила по індукції;

B_r – залишкова індукція;

H_d і B_d – координатні точки, що визначають максимум питомої енергії.

Усі величини розраховуються в абсолютних одиницях системи СІ .

Однак ця формула не відрізняється великою точністю, тому що вона є спробою знайти аналітичне вираження кривих $B = f(H)$, що відрізняються в різних матеріалів більшою різноманітністю. Характеристика $B = f(H)$ є деформованою характеристикою $M = f(H)$, а форма кривих $M = f(H)$ у всіх магнітів майже однакова. Тому більш точною є апроксимація характеристики $M = f(H)$. Апроксимуюче вираження в цьому випадку має такий вигляд:

$$M = M_R \frac{H_{CM} - H}{H_{CM} - kH}, \quad (1.34)$$

де

$$k = 2 \sqrt{\frac{M_R H_{CM}}{M_d H_d}} - \frac{M_r H_{CM}}{M_d H_d}, \quad (1.35)$$

де H_{CM} – коерцитивна сила по намагніченості;

$M_r = B_r / \mu_0$ – залишкова намагніченість.

При цьому M_d і H_d – координати точки а перетинання кривій $M = f(H)$ з діагоналлю ОА (рис. 1.9) прямокутника зі сторонами M_r і H_{CM} .

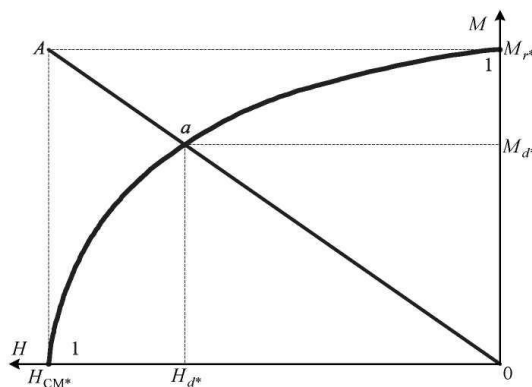


Рисунок 1.9 – Визначення намагніченості

На підставі існуючої залежності між M і B апроксимуюча формула для кривої розмагнічування $B = f(H)$ набуває такого вигляду:

$$B = B_r \frac{H_{CM} - H}{H_{CM} - kH} - H \mu_0. \quad (1.36)$$

Нерідко для визначення коефіцієнта k і напруженості H_{CM} використовуються такі формули [29]:

$$k = \frac{q+f-1}{(q+c)(d+f-c)-d}; \quad (1.37)$$

$$H_{CM} = H_C \frac{1+kd}{1-d}. \quad (1.38)$$

Що стосується характеристики магнітного повернення, то при аналітичних розрахунках вона апроксимується виразом:

$$B_\rho = B_K + \rho_B (H_K - H), \quad (1.39)$$

де B_K і H_K – координати точки відходу прямій повернення;

ρ_B – коефіцієнт повернення, обумовлений по наближеній формулі:

$$\rho_B = \frac{B_r}{H_C} (1 - a_0) \quad (1.40)$$

або по формулі, що враховує параметри кривої $M = f_I(H)$:

$$\rho_B = \mu_0 + \frac{B_r}{H_{CM}} ab, \quad (1.41)$$

де

$$a = 0,635(1 - k)^{0,423}; b = 0,8 + h [0,289 + h(1,38 - 2,08h)];$$

$$h = \frac{M}{M_r} = \frac{H_{CM} - H}{H_{CM} - kH} = \frac{H_{CM} - 0,5(H_C + H_d)}{H_{CM} - 0,5k(H_C + H_d)}.$$

Координати точки відходу прямій повернення при стабілізації повітрям (рис. 1.8, б) розраховуються наступним чином:

$$a_1 = \frac{1}{k} \left(H_{CM} + \frac{B_r}{\mu_0 + \lambda_{0CB}} \right); a_2 = \frac{1}{k} \frac{H_{CM} B_r}{k \mu_0 + \lambda_{0CB}}. \quad (1.42)$$

Координати робочої точки на наведеній вище діаграмі магніту (рис. 1.7, 1.8, б) визначаються в результаті спільного розв'язку відповідних рівнянь. У випадку магніту стабілізованого повітрям:

$$B_M = \lambda H = B_K + \rho_B (H_K - H), \quad (1.43)$$

звідки

$$H = \frac{B_K + \rho_B H_K}{\lambda + \rho_B} = \frac{B_K + \rho_B H_K}{\lambda_\delta \lambda_\sigma \rho_B}. \quad (1.44)$$

При намагнічуванні:

$$H' = 0,5a_3 - \sqrt{(0,5a_3)^2 a_4}, \quad (1.45)$$

де

$$q = \frac{B_d}{B_r}; f = \frac{H_d}{H_C}; c = \mu_0 \frac{H_d}{B-r}; d = \mu_0 \frac{H_C}{B_R};$$

$$H_K = 0,5 a_1 - \sqrt{(0,5 a_1)^2 - a_2}; B_K = \lambda_{0CB} H_K;$$

$$a_3 = \frac{1}{k} \left(H_{CM} + \frac{B_r}{\lambda_\delta \lambda_\sigma \mu_0} \right); a_4 = \frac{1}{k} \frac{H_{CB} B_r}{\lambda_\delta \lambda_\sigma \mu_0}.$$

Індукції в повітряному зазорі стабілізованого й нестабілізованого магніту:

$$B_{\delta M} = \lambda_\delta H; B_\delta = B_{\delta M} Q_m / Q_\delta; \quad (1.46)$$

$$B'_{\delta M} = \lambda_\delta H'; B'_\delta = B'_{\delta M} Q_m / Q_\delta. \quad (1.47)$$

1.2. Розрахунки провідностей розсіювання постійних магнітів у вільному стані й у зібраній конструкції

Розрахунки провідностей постійних магнітів у вільному стані й у зібраній конструкції суттєво залежить від їхньої конфігурації й типу магнітного ланцюга. Нижче приводяться розрахункові формули для визначення магнітних провідностей стосовно до найпростіших форм постійних магнітів і найбільш уживаним різновидам магнітних систем.

1.2.1 Магнітні системи з радіальними магнітами

На рисунку 1.6 зображена зразкова картина розподілу магнітних полів розсіювання в магнітній системі машини з радіальними магнітами прямокутної форми ($p = 2$). У розглянутому випадку можна прийняти наступний порядок розрахунків магнітних провідностей, наведених до координат B і H [5]:

1. Провідність між бічними поверхнями полюсів і внутрішньою поверхнею ярма, Гн/м

$$\lambda_{\sigma l} = \frac{p}{p+1} 2\mu \frac{D_m(1-\alpha_0)+2h_m}{\pi^2 \alpha_0 D_m}, \quad (1.48)$$

де p – число пар полюсів;

$\alpha_0 = \frac{2pb_m}{\pi D_m}$ – геометричний коефіцієнт полюсного перекриття;

D_m – діаметр розточення полюсів;

h_m – висота полюса (магніту).

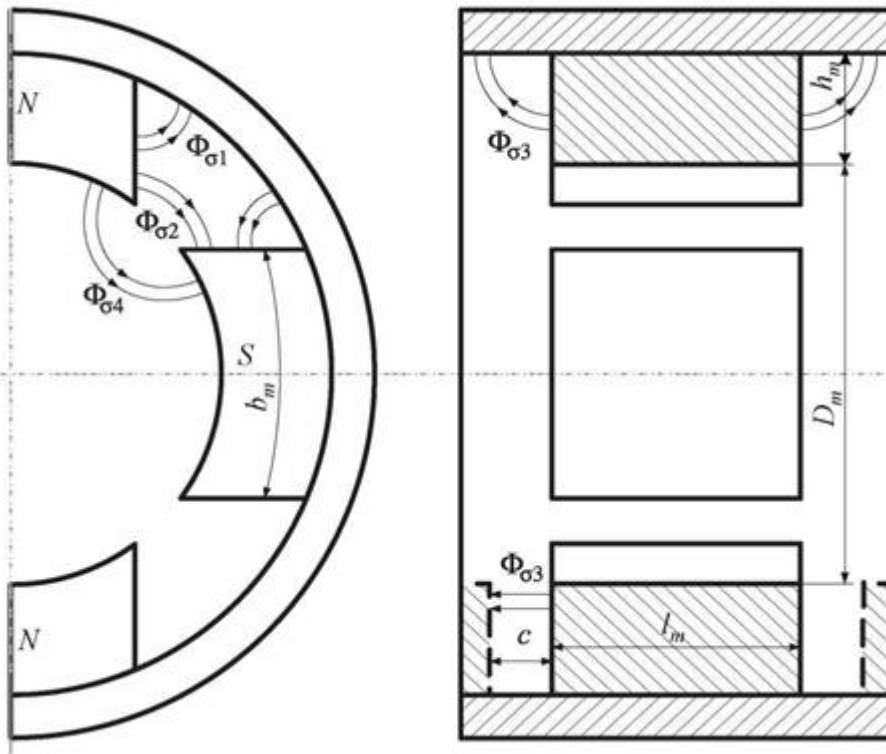


Рисунок 1.10 – Картина розподілу магнітних полів розсіювання в магнітній системі машини з магнітами прямокутної форми ($p = 2$)

2. Провідність між бічними поверхнями суміжних полюсів, Гн/м

$$\lambda_{\sigma 2} = p^2 \frac{2\mu_0}{\pi^2 \alpha_0 D_m} \times \left\{ \frac{D_m(1-\alpha_0)-2ph_m}{p+1} + [D_m(1-\alpha_0+2h_m)] \ln \frac{p}{p+1} \cdot \left[1 + \frac{h_m}{D_m(1+\alpha_0)} \right] \right\}. \quad (1.49)$$

3. Провідність між торцевими поверхнями магнітів та внутрішньою поверхнею яра, Гн/м

$$\lambda_{\sigma 3} = \frac{4}{\pi} \mu_0 \frac{h_m}{l_m}. \quad (1.50)$$

За наявності феромагнітних екранів, як, наприклад, у моментних двигунів, ця провідність, Гн/м

$$\lambda_{\sigma 3} = \frac{\mu_0 h_m^2}{2cl_m},$$

де c – зазор між екраном та магнітами (на рисунку 1.10 екрани показані пунктиром).

4. Провідність між робочими поверхнями полюсів у вільному стані, тобто. при вийнятому якорі, Гн/м:

для $p > 1$:

$$\lambda_{\sigma 4} = \frac{p^2}{p-1} \frac{\mu_0 h_m}{\pi^2 \alpha_0 D_m} \ln \frac{1}{1-\alpha_0}, \quad (1.51)$$

для $p=1$:

$$\lambda_{\sigma 4} = \frac{\mu_0 h_m}{\pi \alpha_0 D_m} \ln \frac{1}{1-\alpha_0}. \quad (1.52)$$

5. Провідність повітряного зазору, Гн/м

$$\lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{h_m}{\delta k_{\delta} k_{\mu}} \frac{Q_{\delta}}{Q_m}.$$

6. Повна наведена провідність розсіювання магніту у зібраній конструкції (на пару полюсів), Гн/м

$$\lambda_{\delta} = \lambda_{\sigma M} \approx 0,6(\lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3}). \quad (1.53)$$

7. Повна наведена провідність розсіювання магніту у вільному стані (на пару полюсів), Гн/м

$$\lambda_{\sigma CB} \approx 0,6(\lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3} + \lambda_{\sigma 4}). \quad (1.54)$$

8. Коефіцієнт розсіювання магнітної системи:

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\delta}}.$$

Передбачається лінійна зміна падіння МДС вздовж висоти магніту.

9. Повна наведена провідність магнітної системи, Гн/м

$$\lambda = \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}. \quad (1.55)$$

В електричних машинах малої потужності зазвичай висота полюсів невелика і тому другий складової провідності розсіювання можна знехтувати.

Тоді:

$$\lambda_{\sigma 1} \approx \mu_0 \frac{4p}{\pi^2} \frac{h_m}{D_m \alpha_0}. \quad (1.56)$$

Таке припущення можна вважати найбільш обґрунтованим при малій кількості пар полюсів.

Для визначення відповідних провідностей Λ слід вирази (1.48) – (1.55) помножити на співвідношення $Q_m/2h_m$, тобто:

$$\Lambda = \lambda \frac{Q_m}{2h_m}. \quad (1.57)$$

При цьому згідно з рівнянням (1.14)

$$\Lambda_* = \lambda_*$$

Як зазначалося вище, збудження найпростіших і дешевих мікродвигунів отримали застосування постійні магніти, мають форму кільцевого сегмента (рис. 1.11).

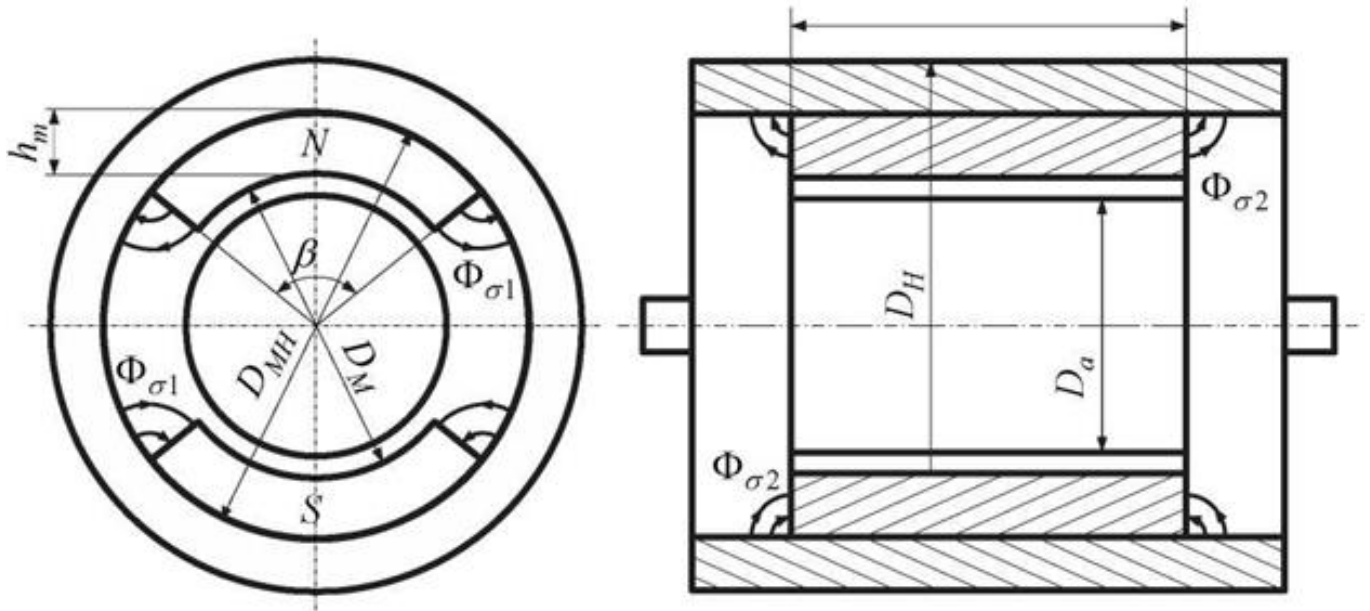


Рисунок 1.11 – Поток розсіювання з бічної та торцевої поверхні магніту

Магнітні провідності такого магніту розраховуються так:

1. Середня магнітна провідність для потоків розсіювання між бічною стороною магніту та станиною (на пару полюсів), Гн

$$\Lambda_{\sigma 1} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{Q_1}{l_{cp1}}. \quad (1.58)$$

Тут $Q_1 = h_m l_m$ – площа бокової сторони магніту, m^2 , причому – h_m і l_m висота і осьова довжина магніту, м. Якщо врахувати, що середня довжина трубки бокового потоку розсіювання:

$$l_{cp1} \approx 0,5 \frac{\pi}{2} h_m,$$

то вираз (1.58) набуває наступного вигляду:

$$\Lambda_{\sigma 1} = \mu_0 \frac{2}{\pi} l_m. \quad (1.59)$$

2. Середня магнітна провідність між торцевою стороною магніту та станиною, Гн

$$\Lambda_{\sigma 2} = \frac{1}{2} \mu_0 \frac{Q_2}{l_{cp2}}. \quad (1.60)$$

Тут Q_2 – середнє значення площі торцевої сторони магніту, м

$$Q_2 = \beta \frac{1}{2} (D_M + h_m) h_m,$$

де β – центральний кут радіального магніту, рад. Середню довжину силової трубки торцевого поля розсіювання з деяким наближенням можна прийняти рівною, м

$$l_{cp2} \approx l_{cp1} = 0,5 \frac{\pi}{2} h_m.$$

В результаті вираз (1.60) перетворюється на вигляд, Гн

$$\Lambda_{\sigma 2} = \beta \frac{\mu_0}{\pi} (D_M + h_m). \quad (1.61)$$

3. Повна магнітна провідність всіх потоків розсіювання при лінійній зміні падіння МРС за висотою (довжиною) магніту (на пару полюсів), Гн

$$\Lambda_{\sigma} = 0,5(\lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 2}). \quad (1.62)$$

4. Магнітна провідність повітряного зазору, Гн

$$\Lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{Q_{\delta}}{2\delta_e}, \quad (1.63)$$

де Q_{δ} – площа повітряного зазору, м²

$$Q_{\delta} = \alpha_{\delta} \tau l_{\delta} = \alpha_{\delta} \frac{\pi D_M}{2p} l_{\delta}. \quad (1.64)$$

При цьому $\alpha_{\delta} = 0,6 \dots 0,75$ – коефіцієнт розрахункової полюсної дуги;

$\delta_e = k_{\delta} k_{\mu} \delta$ – еквівалентний повітряний проміжок;

l_{δ} – розрахункова довжина якоря (в окремому випадку $l_{\delta} = l_m$).

5. Повна магнітна провідність у зібраній конструкції, Гн

$$\Lambda = \Lambda_{\delta} + \Lambda_{\sigma}. \quad (1.65)$$

6. Магнітна провідність повітряного простору між полюсами (при вийнятому якорі) [8], Гн

$$\Lambda'_{\delta} \approx \mu_0 \frac{2,3p\beta l_m}{[2\pi(p-1)+p\beta] \operatorname{tg}\left(\frac{\pi-\beta}{2p-\frac{\beta}{4}}\right)}. \quad (1.66)$$

7. Повна магнітна провідність розсіювання у вільному стані, Гн

$$\Lambda_{\sigma BC} = \Lambda'_{\delta} + \Lambda_{\sigma}.$$

Відповідні наведені магнітні провідності можна визначити множенням

рівнянь (1.59), (1.61), (1.62), (1.63), (1.66) на відношення $2h_m/Q_m$, де Q_m – площа нейтрального перерізу магніту.

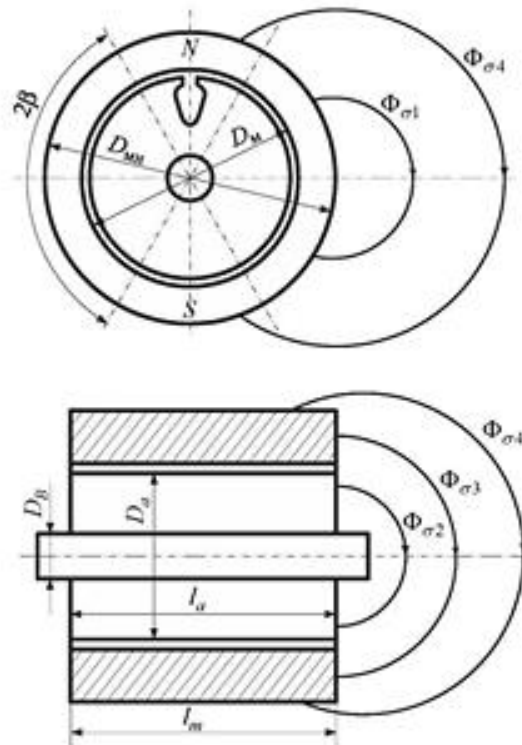


Рисунок 1.12 – Потоки розсіювання із зовнішньої циліндричної поверхні

У колекторних генераторах постійного струму індуктор нерідко виконують як кільцевого магніту, має зовнішнє розташування щодо якоря (рис. 1.12). Розрахунок магнітних провідностей (наведених до координат В і Н) у цьому випадку здійснюється в наступній послідовності [6].

1. Центральний кут, що визначає розрахункову висоту магніту, рад

$$\beta = \frac{\pi}{2}(1 - \alpha_\delta), \quad (1.67)$$

де $\alpha_\delta \approx 2/\pi$.

2. Зовнішній діаметр кільцевого магніту, м

$$D_{M3} = \frac{\Phi_\delta}{B_{\delta M} l_m} + D_M, \quad (1.68)$$

де D_M – внутрішній діаметр кільцевого магніту, що попередньо визначається в ході розрахунку машини;

$B_{\delta M}$ – індукція в повітряному зазорі, наведена до нейтрального перерізу магніту відповідно до рівняння (1.17);

Φ_δ – потік у повітряному зазорі,

$$\Phi_\delta = B_\delta Q_\delta = B_\delta \alpha_\delta \tau l_\delta \approx B_\delta \alpha_\delta \frac{\pi D_M}{2p} l_\delta. \quad (1.69)$$

3. Відношення діаметрів магніту:

$$k_M = \frac{D_M}{D_{M3}}. \quad (1.70)$$

4. Розрахункова висота магніту на пару полюсів:

$$l_m = 0,5\beta(1 - k_M)D_{M3}. \quad (1.71)$$

5. Площа у нейтральному перерізі магніту:

$$Q_m = D_{M3}l_m(1 - k_M). \quad (1.72)$$

6. Магнітна провідність повітряного зазору (тут і нижче всі магнітні провідності наведені до координат кривої розмагнічування В і Н):

$$\lambda_\delta = 0,25\mu_0\beta \frac{k_M D_M}{\delta_e} \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.73)$$

7. Провідність потоків розсіювання із зовнішньої циліндричної поверхні магніту в розчині кута 2β (рис. 1.12):

$$\lambda_{\sigma 1} = 0,15\mu_0\beta \left(1 + \frac{D_M}{l_m} \right) \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.74)$$

8. Провідність розсіювання з торцевої поверхні магніту в розчині кута 2β (рис. 1.11):

$$\lambda_{\sigma 2} = 0,5\mu_0\beta \frac{D_{MH}(0,42+0,14k_M)}{l_m(7+k_M)} \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.75)$$

9. Провідність розсіювання з торцевої поверхні магніту в розчині кута $(\pi - 2\beta)$:

$$\lambda_{\sigma 3} = \mu_0\beta \frac{D_{M3}(0,42+0,14k_M)}{l_m(7+k_M)} \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right) \quad (1.76)$$

10. Провідність розсіювання із зовнішньої циліндричної поверхні магніту в розчині кута $(\pi - 2\beta)$:

$$\lambda_{\sigma 4} = 0,5\mu_0\beta \left(0,24 + 0,14 \frac{D_{MH}}{l_m} \right) \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.77)$$

11. Провідності розсіювання з внутрішньої циліндричної поверхні кільцевого магніту без якоря (рис. 1.13) (враховуються у разі стабілізації магніту повітрям) у розчині кута 2β :

$$\lambda_{\sigma 5} = 0,25\mu_0\beta \left(0,75 + \frac{0,1}{k_M} \right) \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.78)$$

у розчині кута $(\pi - 2\beta)$:

$$\lambda_{\sigma 6} = 0,25\mu_0\beta \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right). \quad (1.79)$$

12. Повна наведена магнітна провідність розсіювання кільцевого магніту при намагнічуванні в зборі:

$$\lambda_{\sigma a} = \lambda_{\sigma 1} + 2\lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3} + \lambda_{\sigma 4}. \quad (1.80)$$

13. Повна магнітна провідність розсіювання кільцевого магніту у вільному стані (випадок стабілізації магніту повітрям):

$$\lambda_{\sigma BC} = \lambda_{\sigma a} + \lambda_{\sigma 5} + \lambda_{\sigma 6}. \quad (1.81)$$

14. Повна магнітна провідність магнітної системи у зборі:

$$\lambda = \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma a}. \quad (1.82)$$

Відповідні магнітні провідності Λ визначаються за рівнянням (1.57), причому $2h_m = l$; у відносних одиницях:

$$\Lambda_* = \lambda_*.$$

15. Коефіцієнт розсіювання магнітної системи:

$$k_{\sigma} = 1 + \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\delta}}.$$

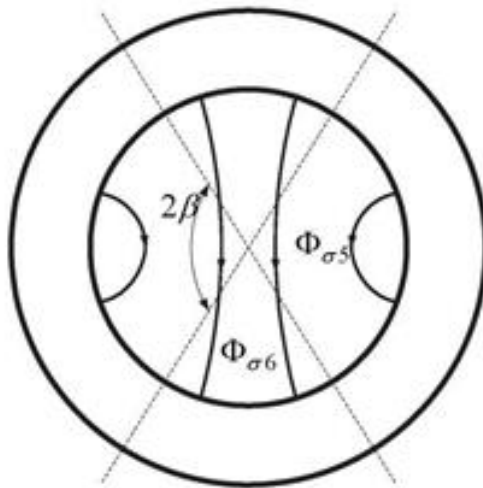


Рисунок 1.13 – Потоки розсіювання з внутрішньої поверхні кільцевого магніту

У машинах малої потужності нерідко застосовується зовнішнє розташування якоря щодо індуктора – кільцевого магніту, напесованого на немагнітний вал чи немагнітну втулку (рис. 1.4, б). Наведені магнітні провідності кільцевого магніту у разі можна приблизно визначити за

рівняннями (1.67)...(1.82). При цьому рівняння (1.73), (1.80), (1.81) слід відповідно перетворити на такий вигляд:

$$\lambda_{\delta} = 0,25\mu_0\beta \frac{D_{M3}}{\delta_3} \left(\frac{1+k_M}{1-k_M} \right); \quad (1.73^*)$$

$$\lambda_{\sigma a} = 2\lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3} + 2\lambda_{\sigma 5} + \lambda_{\sigma \delta}; \quad (1.80^*)$$

$$\lambda_{\sigma CB} = \lambda_{\sigma a} + \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 4}. \quad (1.81^*)$$

Більш точний розрахунок магнітних провідностей магнітних систем із внутрішнім розташуванням індуктора (кільцевого магніту) наведено у роботах [3, 6].

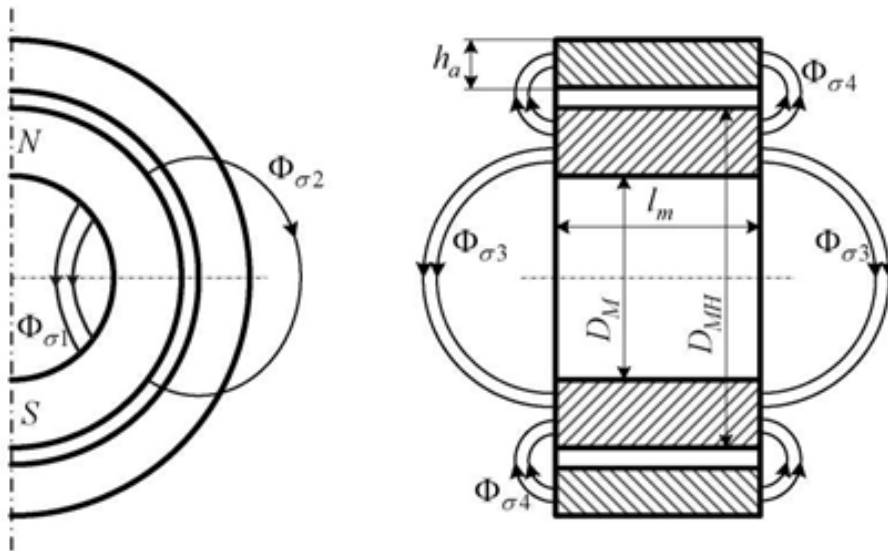


Рисунок 1.14 – Картина розподілу потоків розсіювання

При цьому у випадку двополюсної машини прийнято картину розподілу потоків розсіювання, зображеного на рисунку 1.14, на якому введені такі позначення:

– провідність розсіювання із внутрішньою циліндричною поверхнею магніту:

$$\lambda_{\sigma 1} = 0,74\mu_0 k_1, \quad (1.83)$$

де k_1 – коефіцієнт приведення довжини кільцевого двухполюсного магніта:

$$k_1 = \frac{0,713 - 0,095k_M + 0,167k_M^2}{1 - k_M}; \quad (1.84)$$

– провідність розсіювання із зовнішньою циліндричною поверхнею магніту у вільному стані:

$$\lambda_{\sigma 2} = 2 \frac{\mu_0}{\pi^2} k_1 \left(1,15 + 0,43 \frac{D_M}{l_m} \right); \quad (1.85)$$

– допоміжні розміри меж магнітних потокорозділів:

$$a = 0,5(0,5D_{M3} - h_a - \delta); b = D_{M3} + h_a + \delta, \quad (1.86)$$

де h_a – висота пакету якоря;

– поліноми апроксимації потоків розсіювання з торцевої поверхні магніту:

$$\begin{aligned} k_{T1} &= 0,028 + 0,823 \frac{a}{h_a} - 0,15 \left(\frac{a}{h_a} \right)^2 - 0,013 \left(\frac{a}{h_a} \right)^3; \\ k_{T2} &= 0,025 + 0,71 \frac{a}{h_a} - 0,13 \left(\frac{a}{h_a} \right)^2 + 0,011 \left(\frac{a}{h_a} \right)^3; \\ k_{T3} &= 0,87 + \frac{a}{h_a} - 0,45 \left(\frac{a}{h_m} \right)^2 - 0,05 \left(\frac{a}{h_m} \right)^3; \\ k_{T4} &= 1,21 - 1,24k_M + 1,16k_M^2 - 0,78k_M^3. \end{aligned} \quad (1.87)$$

Тут $h_m = 0,5(D_{M3} - D_M)$, м;

– провідність розсіювання з торцевих поверхонь магніту у вільному стані:

$$\lambda_{\sigma 3} = 2\mu_0 \frac{D_{M3}}{l_m} k_1 (1 - 0,65k_M); \quad (1.88)$$

у зібраній конструкції:

$$\lambda_{\sigma 3} = 2\mu_0 \frac{D_{M3}}{l_m} k_l k_{T3} k_{T4}; \quad (1.89)$$

– провідність розсіювання між торцевими поверхнями магніту та якоря:

$$\lambda_{\sigma 4} = 2 \frac{\mu_0 k_l}{\pi^2 l_m} \left[\left(\frac{\pi^2}{4} b - a \right) \ln \frac{h_a}{\delta} + b k_{T1} - a k_{T2} \right]; \quad (1.90)$$

– провідність робочого повітряного зазору:

$$\lambda_{\delta} = \mu_0 \frac{\pi D_{MH} k_l}{4\delta^3}; \quad (1.91)$$

– повна наведена магнітна провідність магніту у зібраній конструкції:

$$\lambda_{\sigma} = \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 3} + \lambda_{\sigma 4}; \quad (1.92)$$

– повна наведена магнітна провідність магніту у вільному стані:

$$\lambda_{\sigma CH} = \lambda_{\sigma 1} + \lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3}; \quad (1.93)$$

– коефіцієнт розсіювання:

$$\lambda_{\sigma} = 1 + \frac{\lambda_{\sigma}}{\lambda_{\delta}};$$

– повна магнітна провідність магнітної системи:

$$\lambda = \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma}. \quad (1.94)$$

1.2.2 Магнітні системи зі скобоподібними постійними магнітами

Магнітна система із скобоподібними магнітами у двополюсному виконанні представлена на рисунку 1.15. Полюси виконуються з феромагнітного матеріалу, як і у випадку мікродвигуна з електромагнітним збудженням. Магнітний потік створюється двома вставними скобоподібними магнітами.

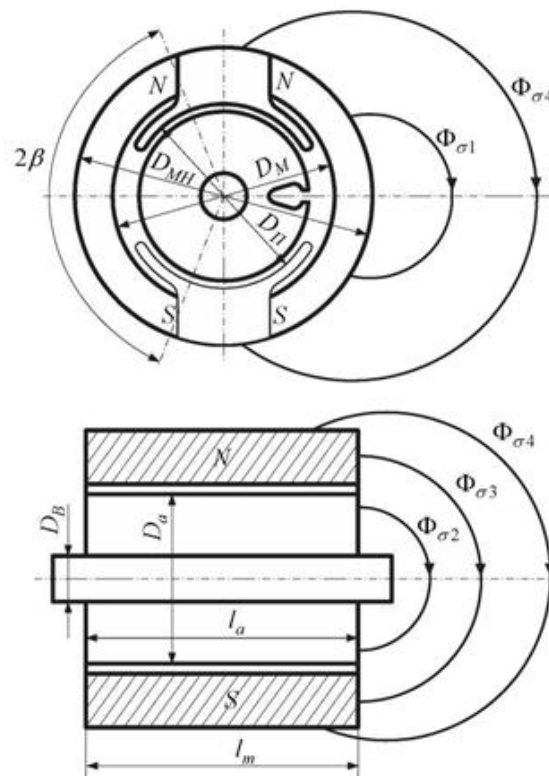


Рисунок 1.15 – Магнітна система з скобоподібними магнітами у двополюсному виконанні

Необхідні значення корисного потоку Φ_δ і індукції B_δ в повітряному зазорі визначаються в процесі електромагнітного розрахунку [5]. Далі приймається такий порядок розрахунку індуктора:

1. Дійсна полюсна дуга:

$$b = 1,02b_\delta . \quad (1.95)$$

2. Необхідна ширина полюса у мінімальному перерізі за умов насичення:

$$b_\Pi = \frac{k_\sigma \Phi_\delta}{B_\Pi l_\Pi} , \quad (1.96)$$

де $k_\sigma = 1,2$ (уточнюється у процесі розрахунку).

3. Внутрішній діаметр скобообозначених магнітів:

$$D_M \approx D_\Pi + (8 \dots 12) \cdot 10^{-3} . \quad (1.97)$$

4. Зовнішній діаметр магнітів попередньо:

$$D_{MH} = \frac{\Phi_\delta}{B'_{\delta M} l_m} . \quad (1.98)$$

Приймається $B'_{\delta M} = B_d$.

5. Відношення діаметрів магнітів:

$$k_M = D_M / D_{MH} . \quad (1.99)$$

6. Розрахункова висота магнітів однією полюс:

$$h_m = \pi/8 D_{MH} (1 + k_M) - 0,5b_\Pi . \quad (1.100)$$

7. Площа в нейтральному перерізі магнітів:

$$Q_m = D_{MH} l_m (1 - k_M) . \quad (1.101)$$

8. Центральний кут, що визначає розрахункову висоту магніту (рис 1.14),

$$\beta = \frac{\pi}{2} \left(1 - \frac{b_\Pi}{2h_m} \right) . \quad (1.102)$$

9. Магнітна провідність повітряного зазору, наведена до координат В та Н:

$$\lambda_\delta = 0,125\mu_0\alpha_\delta\pi\beta \frac{D_\Pi}{\delta k_\delta k_\mu} \frac{1+k_M}{1-k_\mu} . \quad (1.103)$$

10. Магнітні провідності потоків розсіювання $\lambda_{\delta 1}, \lambda_{\delta 2}, \lambda_{\delta 3}, \lambda_{\delta 4}, \lambda_{\delta 5}$ визначаються за формулами (1.74)...(1.78).

11. Магнітна провідність розсіювання між полюсами у вільному стані, тобто без якоря:

$$\lambda_{\sigma\delta} = 4,6\mu_0 \frac{h_m}{D_{MH}(1-k_M)tg\left[\frac{\pi}{2}(1-0,5a_\delta)\right]}. \quad (1.104)$$

12. Повна магнітна провідність розсіювання системи при намагнічуванні у зборі:

$$\lambda_{\sigma a} = \lambda_{\sigma 1} + 2\lambda_{\sigma 2} + \lambda_{\sigma 3} + \lambda_{\sigma 4} + 2\lambda_{\sigma 5}.$$

13. Повна магнітна провідність розсіювання системи у разі стабілізації магніту повітрям (у вільному стані):

$$\lambda_{\sigma BC} = \lambda_{\sigma a} + \lambda_{\sigma\delta}. \quad (1.105)$$

1.2.3 Магнітні системи із зіркоподібними магнітами

У вентильних двигунах постійного струму (ВДПС) і синхронних мікродвигунах (СМД) переважне застосування отримали магнітопроводи із зовнішнім розташуванням нерухомого якоря і індуктором, що обертається. Останній виконується у вигляді монолітної чи складової зірочки без полюсних наконечників (рис. 1.15, г). У наближених розрахунках магнітної провідності розсіювання постійного магніту зіркоподібної форми у вільному стані можна обмежитися визначенням її основних складових (рис. 1.16) [3].

$$\Lambda_{\sigma BC} = \Lambda_{\sigma 1} + \Lambda_{\sigma 2} + 2\Lambda_{\sigma 3}. \quad (1.106)$$

де $\Lambda_{\sigma 1}$ – провідність розсіювання між бічними сторонами магніту;

$\Lambda_{\sigma 2}$ – те саме між робочими циліндричними поверхнями;

$\Lambda_{\sigma 3}$ – те ж між торцевими поверхнями магніту.

При цьому магнітні провідності розсіювання на пару полюсів:

$$\Lambda_{\sigma 1} = \mu_0 \frac{p}{\pi} l_m; \quad (1.107)$$

$$\Lambda_{\sigma 2} = \mu_0 \sum \frac{Q_{\sigma i}}{L_i}; \quad (1.108)$$

$$\Lambda_{\sigma 3} = \mu_0 \frac{1}{2\pi \sin \frac{\pi}{2p}} \left(1 + \frac{1}{2} \cos \frac{\pi}{2p} + \frac{1}{2} L_M \sin \frac{\pi}{2p} \right). \quad (1.109)$$

Тут $Q_{\sigma i}$ – середній переріз силової трубки, м²;

L_i – середня довжина трубки, м;

L_M – висота магніту по середній силовій лінії, м

$$L_M \approx h_m + \frac{b_m}{2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{2p}. \quad (1.110)$$

Магнітна провідність повітряного зазору Λ_δ розраховується за рівнянням (1.63).

Повна провідність магнітопроводу із зіркоподібним магнітом у зборі:

$$\Lambda \approx \Lambda_\delta + \Lambda_{\sigma 3}. \quad (1.111)$$

Відповідні наведені магнітні провідності:

$$\lambda = \frac{2L_M}{Q_m} \Lambda. \quad (1.112)$$

Нагадаємо, що розрахунок магнітних провідностей за рівняннями (1.106) – (1.112) є наближеним і дає цілком прийнятну точність при відносній осьовій довжині магніта $\lambda_K = l_m/D_M \geq 1 \dots 2$.

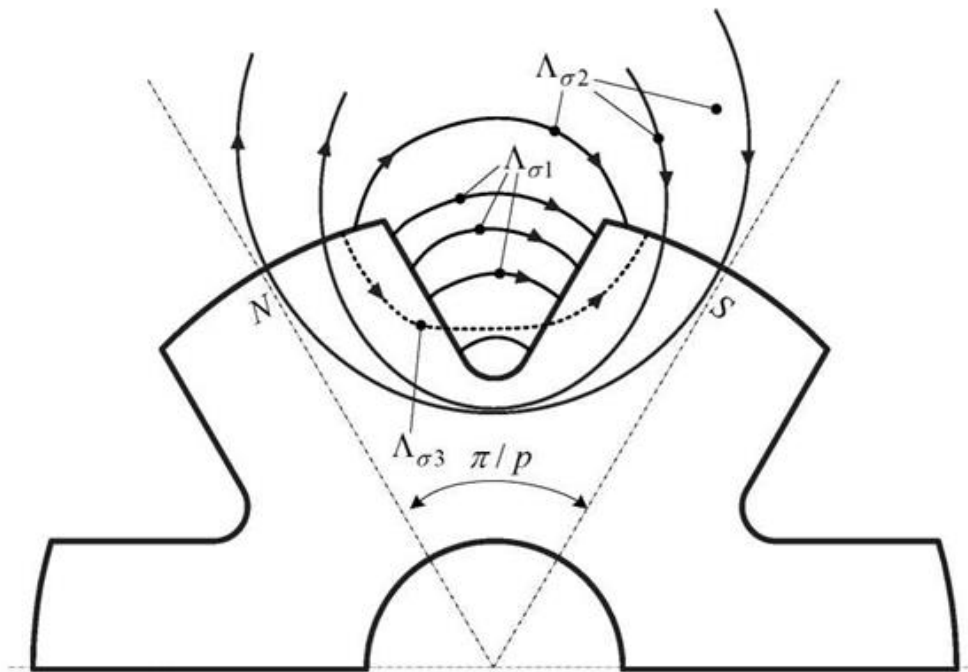


Рисунок 1.16 – Провідності розсіювання постійного магніту зіркоподібної форми

Найбільш точне визначення магнітних провідностей зіркоподібного магніту (суцільного та складеного) наведено в роботі [7]. Згідно з викладеною там методикою, крім основних складових провідностей розсіювання, враховані складові, зумовлені крайовим ефектом витріщення потоку. Останні включають провідності між ребрами циліндричної частини магніту, провідності між просторовими кутами полюсів, провідності торцевих ребер. Ці провідності

особливо помітно виявляються для плоских машин і при $\lambda_K = l_m/D_M \approx 0,5$ можуть становити 40 – 50 % при $p = 2$ та 25 – 30 % при $p = 4$ від сумарної провідності вільного розсіювання.

Методика розрахунку провідностей зіркоподібного магніту з полюсними наконечниками наведена у роботах [2, 4].

1.3 Режими роботи синхронного генератора з постійними магнітами

1.3.1 ЕРС холостого ходу та параметри синхронного генератора з постійними магнітами

Робочий потік магніту в повітряному зазорі $\Phi_{\delta 0}$ при холостому ході може бути знайдений графоаналітичним способом з використанням схеми заміщення магнітного ланцюга (рис. 1.17, а). Для цього за заданою для використовуваного матеріалу магніту кривою розмагнічування $B = f(H)$ будується залежність, $\Phi_M = f(F_M)$ яка збігається у відносних одиницях із кривою розмагнічування (рис. 1.17, б).

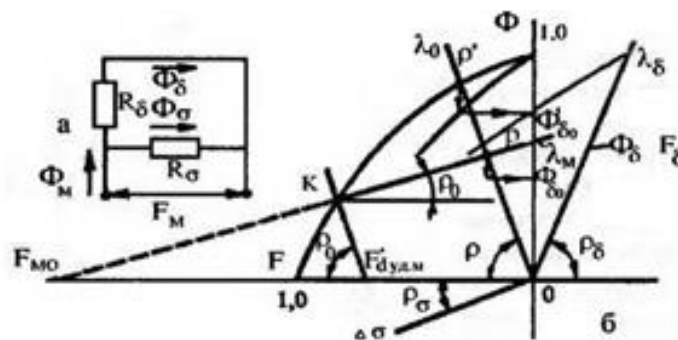


Рисунок 1.17 – До визначення потоку холостого ходу: а – схема заміщення магнітного кола; б – діаграма магніта

У третьому квадранті будується залежність потоку розсіювання магніту від МДС магніту $\Phi_{\sigma} = (F_M)$, яка становить собою пряму лінію $0 - \lambda_{\sigma}$, проведену під кутом $\rho_{\sigma} = \arctg \lambda_{\sigma}$ до осі абсцис, де λ_{σ} – відносна провідність розсіювання магніту разом з арматурою (якщо остання є). У першому квадранті будується залежність робочого потоку від МРС повітряного зазору $\Phi_{\delta} = (F_{\delta})$, яка становить собою пряму лінію $0 - \lambda_{\delta}$, проведену під кутом $\rho_{\delta} = \arctg \lambda_{\delta}$ до осі абсцис, де λ_{δ} – відносна провідність робочого зазору поздовжньої осі ротора.

Віднімаючи з ординати кривої розмагнічування ординату лінії $0 - \lambda_\delta$, а з абсциси одержаної кривої абсцису лінії $0 - \lambda_\delta$, знайдемо первічне значення потоку холостого ходу $\Phi_{\delta 0}$ (рис. 1.17, б). Відповідне цьому потоку чинне значення ЕРС:

$$E_0 = 4k_B f_1 W_1 k_{01} (\Phi_\sigma + \Phi_{\delta 0}), \quad (1.113)$$

де $k_B = \pi \sqrt{2/(4k_\phi)}$ – коефіцієнт форми ЕРС;

k_ϕ – коефіцієнт форми потоку збудження;

f_1 – частота ;

$\Phi_\sigma = \Phi_z$ – базисний потік магніту.

Якщо скористатися розрахунковою наведеною кривою розмагнічування – $\Phi_M = (1 - F_M)/(1 - a_0 F_M)$ і врахувати, що початкова точка відходу P^1 лінії повернення лежить одночасно на прямій $\Phi_p = \Lambda_0 F_p$, де $\Lambda_0 = 1/R_0 = \Lambda_\sigma + \Lambda_\delta$, де $\Lambda_\sigma + \Lambda_\delta$ – магнітна провідність зовнішнього ланцюга магніту, то потік при холостому ході може бути визначений аналітично:

$$\Phi_\sigma = 1/R_0 - \sqrt{(1 + R_0^2)^2 - 4a_0 R_0 / 2 a_0 R_0 (1 + R_\delta \Lambda_\sigma)}. \quad (1.114)$$

Наприклад, скористаємося робочою діаграмою магніта, представленою на рисунку 1.18. Магнітна характеристика при холостому ході $\Phi_{M0} = f(F_{M0})$ визначається характеристикою зовнішнього магнітного ланцюга та за відсутності насичення в сталевих ділянках магнітопроводу має вигляд прямої лінії. Для її побудови достатньо нанести на діаграму розрахункову точку холостого ходу A_0 з координатами, що відповідають розрахунковим значенням МРС F_{M0} і потоку Φ_{M0} магніту при холостому ході, і провести через неї пряму OA_0 .

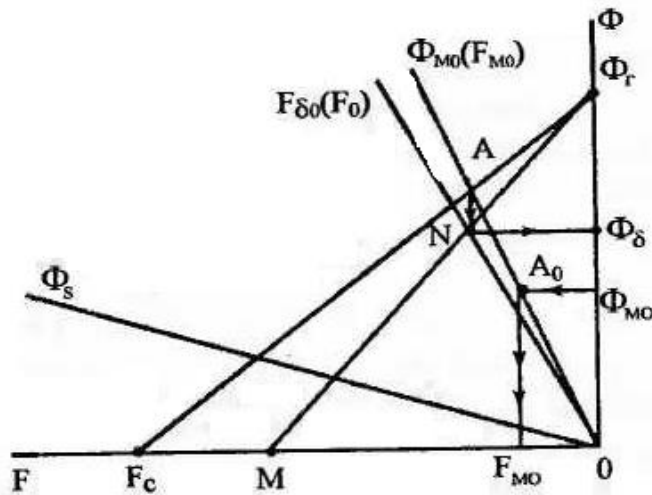


Рисунок 1.18 – Робоча діаграма магніту

Перетин характеристики холостого ходу $\Phi_{mo} = f(F_{mo})$ з прямою розмагнічування $\Phi_{mo} - F_c$ визначає точку режиму холостого ходу (точка А на рисунку 1.18). Опускаючи з неї перпендикуляр осі абсцис до перетину з лінією поздовжнього потоку $\Phi_{tr} - M$ (точка N), знаходять фактичне значення потоку холостого ходу в повітряному зазорі машини. Проводячи через точки N і 0 пряму, одержують залежність потоку в повітряному зазорі від величини МДС в режимі холостого ходу $\Phi_{\delta 0} = f(F_0)$. Дійсне значення ЕРС холостого ходу розрахованого генератора:

$$E_{o\delta} = 4,44\Phi_{\delta 0}f_n w_{cp} k_0, \quad (1.115)$$

де $\Phi_{\delta 0}$ і k_0 – уточнені значення магнітного потоку та обмотувального коефіцієнта.

Для перевірки відповідності розрахованого СГ вихідним вимогам слід знайти параметри навантаження при номінальному режимі роботи:

$$R_H = (U_{\phi H} / I_H) \cos \varphi; \quad (1.116)$$

$$X_H = (U_{\phi H} / I_H) \sin \varphi. \quad (1.117)$$

Необхідна ЕРС холостого ходу для такого навантаження:

$$E_{om} = I_H (X_{qH} X_{dH} + R_{adH}^2) / \sqrt{X_{qH}^2 + R_{adH}^2}. \quad (1.118)$$

Якщо $E_{om} < E_{o\delta}$, то машину необхідно перерахувати, збільшивши обсяг використовуваних магнітів. Якщо $E_{om} > E_{o\delta}$, то необхідно перевірити

перевантажувальну здатність генератора.

СГПМ повинні короткочасно витримувати півтора – дворазове навантаження по струму (тобто $K_I = 1,5...2,0$). При цьому напруга має залишатися лише на рівні номінальної. Необхідну ЕРС холостого ходу E_{om} з урахуванням навантаження визначають за співвідношенням (1.116)...(1.118) для значення струму $I = k_I I_H$.

Якщо розраховане значення ЕРС $E_{om} > 1,25 E_{o\partial}$, то необхідно збільшити об'єм ПМ, якщо $E_{om} < 0,8 E_{o\partial}$ – необхідно зменшити об'єм ПМ та виконати повторно електромагнітний розрахунок.

1.3.2 Робота синхронного генератора з постійними магнітами при навантаженні.

Зовнішня характеристика і векторна діаграма

При навантаженні генератора виникає реакція якоря, яка при активно-індуктивному характері створює зовнішнє по відношенню до магніту поздовжнє поле, що розмагнічує. Найбільшому розмагнічуванню магніт піддається в режимі раптового короткого замикання при МРС, що відповідає ударному струму якоря. Початкова МРС якоря, що розмагнічує, безпосередньо прикладена до полюсів магніту,

$$F'_{d_{y\partial.m}} = \left(m_1 \sqrt{2W_1 k_{01} I_{dk} k_{y\partial d}} \right) / \pi p [1 + \lambda_\sigma R_\delta],$$

де поздовжня складова початкового встановившегося струму короткого замикання:

$$I'_{dk} = \frac{E'_0 x_q}{(r_1^2 + x_d x_q)}. \quad (1.119)$$

де $k_{y\partial d}$ – розрахунковий коефіцієнт ударності поздовжньої МРС якоря, значення якого залежить від конструкції і потужності генератора.

Після розмагнічування найбільшої МРС якоря магніт стає стабілізованим, так як надалі будь-яка зміна навантаження та повторні короткі замикання не призводять до зміни його магнітних властивостей. Точка відходу К

стабілізованої лінії повернення визначається перетином кривої розмагнічування з прямою, проведеною паралельно променю $0 \sim \Lambda_0$ з точки $F'_{d \text{ уд.м}}$ (рис. 1.17, б). Для знаходження остаточного значення ЕРС холостого ходу необхідно в (1.119) підставити нове значення потоку:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{F_{m0} \lambda \lambda_m}{(\lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma} + \lambda_m)}. \quad (1.120)$$

У разі стабілізації магніту поза арматури (у вільному стані) потік холостого ходу безпосередньо визначається по (1.120). Однак і тут необхідно перевірити, чи не розмагнітиться магніт додатково при короткому замиканні. Для магнітів з прямолінійною кривою розмагнічування відносно значення потоку холостого ходу незалежно від способу стабілізації обчислюється за формулою:

$$\Phi_{\delta 0} = \frac{\lambda_{\delta}}{(1 + \lambda_{\delta} + \lambda_{\sigma})}. \quad (1.121)$$

Магнітні опори, провідності та індуктивні опори, необхідні для визначення точки відходу прямого повернення і ЕРС холостого ходу, залежать від форми магнітного поля в робочому зазорі і, отже, від конструкції ротора.

Розглянемо модель явнополюсного СГПМ із полюсними башмаками (рис. 1.19), де показані найбільш ймовірні шляхи проходження потоків реакції якоря і магніту і відповідні схеми заміщення магнітних ланцюгів. У загальному випадку МРС обмотки якоря та МРС магніту мають різний просторовий розподіл і створюють у повітряному зазорі несинусоїдальні магнітні поля.

Потік основної гармонійної індукції, створеної поздовжньої МРС якоря:

$$\Phi_{\delta d1} = (2/\pi) \tau l_{\delta} B_{\delta d1m} = (2/\pi) \tau l_{\delta} k_d B_{\delta dm},$$

де $k_d = B_{\delta d1m} / B_{\delta dm}$ – коефіцієнт форми поля якоря по поздовжній осі,

$$B_{\delta dm} = \mu_0 F_{\delta dm} / (\delta k_{\delta}), (F_{\delta dm} = F_{dm} - F_{dmm}).$$

Потік взаємної індукції від поздовжньої МРС якоря:

$$\Phi_{\delta d} = k_{\phi d} \Phi_{\delta d1} = (2/\pi) \tau l_{\delta} k_d k_{\phi d} B_{\delta dm}, \quad (1.122)$$

де $k_{\phi d} = \Phi_{\delta d} / \Phi_{\delta d1}$ – коефіцієнт поздовжнього потоку якоря.

Звідси магнітна провідність повітряного зазору у абсолютних одиницях (Гн) для потоку $\Phi_{\delta d}$:

$$\lambda_{\delta d} = \Phi_{\delta d} / F_{\delta dm} = 2 k_g k_{\phi g} \mu_0 \tau l_{\delta} (\pi \delta k_{\delta}). \quad (1.123)$$

Аналогічно знаходять магнітну провідність повітряного зазору для потоку $\Phi_{\delta M}$, створеного поперечною МРС якоря $F_M = -F_{\delta M}$,

$$\lambda_{\delta M} = \Phi_{\delta M} / F_{\delta M} = 2k_M k_{\phi g} \mu_0 \tau l_\delta (\pi \delta k_\delta), \quad (1.124)$$

та магнітну провідність робочого зазору для потоку $\Phi_{\delta M}$, створеного МРС магніта $F_M = F_{\delta M}$,

$$\lambda_{\delta M} = \Phi_{\delta M} / F_{\delta M} = \frac{2k_M k_{\phi M} \mu_0 \tau l_\delta}{(\pi \delta k_\delta)}. \quad (1.125)$$

Тут $k_g = B_{\delta g1m} / B_{\delta gm}$ – коефіцієнт форми поля якоря по поперечній осі;

$$B_{\delta gm} = \mu F_{\delta gm} / (\delta k_\delta);$$

$$k_{\phi g} = \Phi_{\delta g} / \Phi_{\delta g1} \text{ – коефіцієнт поперечного потоку якоря;}$$

$$k_M = B_{\delta M1} / B_{\delta M} \text{ – коефіцієнт форми полюса магніту;}$$

$$k_{\phi M} = \Phi_{\delta M} / \Phi_{\delta M1} \text{ – коефіцієнт потоку магніту.}$$

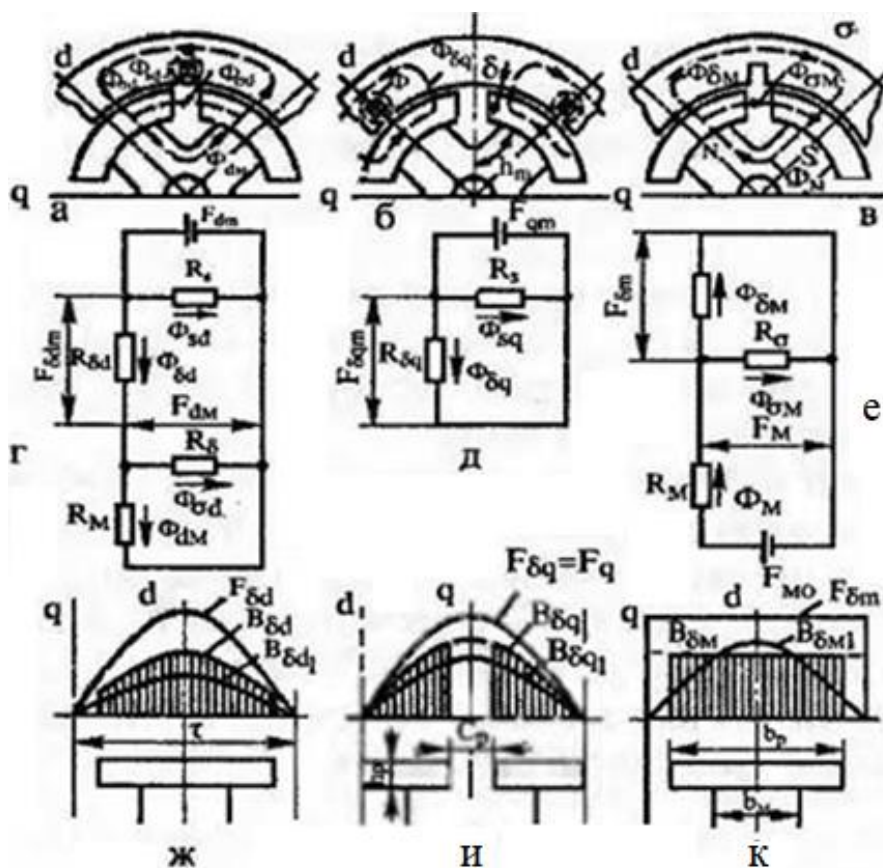


Рисунок 1.19 – Модель СГПМ: а, б, в – шляхи потоків реакції якоря та магнітів; г, д, е – схеми заміщення магнітних кіл; ж, и, к – розподіл магнітних полів реакції якоря та магніту

Для СГПМ можна прийняти, що поле в робочому зазорі в межах полюсної дуги для ротора розподілено за прямокутним законом, для статора – за синусоїдальним законом, а в проміжках між полюсами – дорівнює нулю (рис. 1.19, ж – к). При такому допущенні коефіцієнти форми поля та потоку обчислюють за формулами:

$$\begin{aligned}
 k_d &= \frac{(\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi)}{\pi}; \\
 k_{\phi d} &= \pi \sin \frac{(\frac{\alpha_p \pi}{2})}{(\alpha_p \pi + \sin \alpha_p \pi)}; \\
 k_q &= (\alpha_p \pi - \sin \alpha_p \pi) / \pi; \\
 k_{\phi q} &= \pi \frac{[1 - \cos(\frac{\alpha_p \pi}{2})]}{(\alpha_p \pi - \sin \alpha_p \pi)}; \\
 k_m &= 4 \sin(\alpha_p \pi / 2) / \pi; \\
 k_{\phi m} &= \alpha \pi^2 / [8 \sin \alpha_p \pi / 2],
 \end{aligned} \tag{1.126}$$

де $\alpha_p = v_p / \tau$ – коефіцієнт полюсного перекриття.

З (1.123) – (1.125) видно, що значення магнітної провідності повітряного зазору залежить від форми поля. Ця обставина дозволяє об'єднати схеми заміщення на рисунках 1.19, г – е. Поєднання зазначених схем може бути суворо обґрунтовано лише при однаковій формі полів від поздовжньої МРС якоря та від МРС магніта.

Потік магніта $\Phi_{\delta m1}$, утворюючи з фазою обмотки якоря потокозчеплення $\Psi_{\delta m1} = W_1 k_{01} \Phi_{\delta m1}$ наводить ЕРС холостого ходу:

$$E_0 = 4,44 f_1 W_1 k_{01} \Phi_{\delta m1}.$$

Потоки реакції якоря $\Phi_{\delta d1}$ і $\Phi_{\delta g1}$ індукують у фазах обмотки статора ЕРС:

$$\underline{E}_{ad} = -i\omega \underline{\Psi}_{\delta d1} / \sqrt{2} = -j x_{ad} \underline{I}_d; \tag{1.127}$$

$$\underline{E}_{ag} = -i\omega \underline{\Psi}_{\delta g1} / \sqrt{2} = -j x_{ag} \underline{I}_g. \tag{1.128}$$

Головний індуктивний опір якоря по поздовжній осі:

$$x_{ad} = \frac{E_{ad}}{I_d} = \frac{\omega W_1 k_{01} \Phi_{\delta d1}}{\sqrt{2} I_d} = \frac{\omega W_1 k_{01} F_{dm}}{\sqrt{2} I_d} \lambda_{ad1} = \frac{2 m_1 f_1 W_1 k_{01}^2}{p} \lambda_{ad1}, \tag{1.129}$$

де $F_{dm} = \sqrt{2} m_1 W_1 k_{01} I_d / \pi p$; $\lambda_{aq1} = \lambda_{ad} / k_{\phi d}$; λ_{ad} визначається за схемою

заміщення (рис. 1.19, г):

$$\lambda_{ad} = 1/R_{ad} = \lambda_{\delta d}(\lambda_{\sigma} + \lambda_M)/(\lambda_{\sigma d} + \lambda_{\sigma} + \lambda_M).$$

Головний індуктивний опір якоря по поперечній осі:

$$x_{aq} = \frac{E_{aq}}{I_q} = \frac{\omega W_1 k_{01} \Phi_{\delta q1}}{\sqrt{2} I_d} = \frac{\omega W_1 k_{01} F_{qm}}{\sqrt{2} I_q} \lambda_{q1} = \frac{2m_1 f_1 W_1 k_{01}^2}{p} \lambda_{q1}, \quad (1.130)$$

де $F_{am} = \sqrt{2} m_1 W_1 k_{01} I_q / \pi p$; $\lambda_{q1} = \lambda_{aq} / k_{\phi q}$; λ_{aq} – визначається за схемою заміщення (рис. 1.19, д):

$$\lambda_{aq} = I/R_{aq} = \lambda_{\delta q}. \quad (1.131)$$

Поперечний потік якоря СГПМ, як і в генераторі з електромагнітним збудженням, проходить робочий проміжок і замикається по сталевих ділянках магнітопроводу. На шляху поздовжнього потоку якоря є великий магнітний опір магніту, обумовлений малою магнітною проникністю повернення і частина поздовжнього потоку замикається по шляхах розсіювання ротора (рис. 1.19, а). Тому в СГПМ з індукторами, що містять полюсні башмаки, $\lambda_{aq} > \lambda_{ad}$ і, отже, $X_{aq} > X_{ad}$.

У генераторах без полюсних башмаків і поздовжній, і поперечний потоки якоря проходять по магніту, внаслідок чого магнітна провідність поперечної осі переважно зменшується і індуктивні опори якоря вирівнюються. Тому СГПМ з індуктором типу «зірочка» за своїми властивостями близькі до неявнополюсних генераторів і $X_{aq} \approx X_{ad}$.

Параметри схеми заміщення магнітного ланцюга (рис. 1.19, г) можуть бути розраховані виходячи з наближеної картини магнітного поля за наведеними нижче формулами.

Магнітна провідність полюса магніту по поздовжній осі:

$$\lambda_M = 1/R_M = \mu_B v_M l_M / h_M. \quad (1.132)$$

Магнітна провідність розсіювання ротора на один полюс:

$$\lambda_{\sigma} = 1/R_{\sigma} = \lambda_{\sigma M} + \lambda_{\sigma p}, \quad (1.133)$$

де магнітна провідність розсіювання полюса магніту між бічними та торцевими поверхнями:

$$\lambda_{\sigma M} = (4/\pi) \mu_0 [p l_M + v_M \sin[\pi/(2p)] + 0,5 h_M];$$

магнітна провідність розсіювання полюсних башмаків:

$$\lambda_{\sigma p} = 4\mu_0 [h_p l_p / c_p + 0,64(h_p + l'_p)\gamma_1 + 0,32l_m\gamma_2],$$

де h_p, l_p – висота та довжина полюсного башмака;

c_p – ширина міжполюсного прорізу;

b_m, h_m, l_m – ширина, висота та довжина полюса магніту;

$l'_p = (l_p - l_m)/2$ – довжина, що виступає за магніт частини башмака полюса;

$$\gamma_1 = \ln[1 + \pi b_p / (2c_p)];$$

$$\gamma_2 = \ln[1 + \pi (b_p - b_m) / (2c_p)].$$

Магнітна провідність розсіювання якоря:

$$\lambda_s = I/R_s = 2\mu_0 l_\delta \lambda_s / (pq), \quad (1.134)$$

де λ_s – сумарний коефіцієнт питомої провідності для потокозчеплення розсіювання обмотки якоря.

Повні індуктивні опори якоря визначаються відомими співвідношеннями:

$$x_d = x_{ad} + x_1; \quad x_q = x_{aq} + x_1, \quad (1.135)$$

де $x_1 = 2\pi f_1 W_1^2 \lambda_s$ – індуктивний опір розсіювання обмотки якоря.

Розрахунок магнітного ланцюга СГПМ виконується, як правило, для режиму холостого ходу для магнітного потоку $\Phi_{\delta m}$, визначеного за схемою заміщення (рис.1.17, е), без урахування насичення. В результаті розрахунку знаходять коефіцієнт насичення $k_m = (F_\delta + F_{cm})/F_\delta$. Падіння магнітного потенціалу на сталевих ділянках F_{cm} приблизно може бути враховано введенням розрахункового зазору $\delta'' = \delta' k_\mu = \delta k_\delta k_\mu$.

При роботі на навантаження в режимі, що встановився, рівняння електричної рівноваги СГПМ має типовий для синхронних генераторів вид :

$$\underline{U} = \underline{E}_0 - jx_d I_d - jx_q I_q - r_1 I. \quad (1.136)$$

Цьому рівнянню відповідає векторна діаграма СГПМ (рис. 1.20), побудована для активно-індуктивного навантаження. У машинах малої потужності іноді розрізняють кути навантаження θ та θ_e . Кут θ_e характеризує зсув по фазі між ЕРС холостого ходу E_0 і напругою генератора, а кут θ – між ЕРС E_0 та результуючою ЕРС E_δ (ЕРС від результуючого потоку Φ_δ). Кут θ_e характеризує також просторовий зсув між поздовжньою віссю магніту та віссю результуючого потоку. При холостому ході генератора $\theta = \theta_e = 0$, при

навантаженні $\theta > \theta_e$.

Так як пряме регулювання потоку магніту не є можливим, основною характеристикою СГПМ є зовнішня характеристика – залежність вихідної напруги генератора від струму навантаження при постійних кутовий швидкості обертання ротора і характері навантаження: $U = f(I_a)$ при $\Omega = const$, $\cos \varphi = const$. Для явнополюсного генератора зовнішня характеристика будується графоаналітичним методом. Якщо навантаження задано у вигляді $z_H = r_H + jx_H$, то $\varphi = \arccos r_H/x_H$, а кут β розраховується за співвідношенням:

$$\beta = \arctg \frac{x_H + x_q}{r_H + r_1}$$

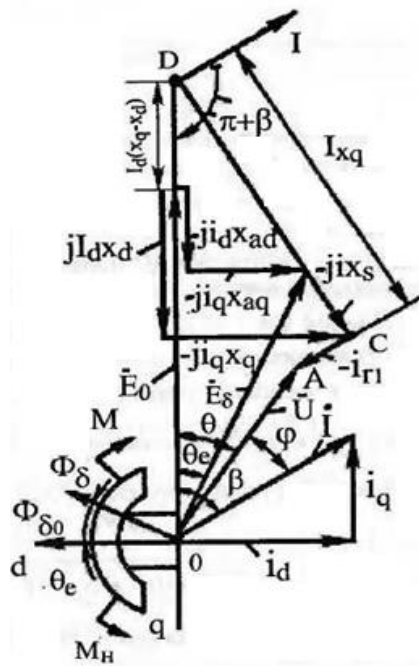


Рисунок 1.20 – Векторна діаграма СГПМ

Порядок побудови. Вибирають масштаб струму навантаження і з довільної точки D проводять у довільному напрямку вектор I . Під кутом $-\pi/2$ до нього в масштабі напруги відкладають відрізок $DC = Ix_q$, а під кутом $-(\pi + \beta)$ – відрізок $DO = E_0 + I_d(x_q - x_d)$, отримуємо точку O – центр векторної діаграми. Під кутом β до відрізка DO проводять вектор струму I , а під кутом φ до нього напрям вектора \dot{U} . З точки C під кутом $-\pi/2$ до відрізка DC відкладають відрізок $CA = I r_1$. Точка A визначає величину напруги U. Зазвичай обмежуються такою побудовою для струму $I = I_H$, оскільки дві інші точки

зовнішньої характеристики (точка холостого ходу $U_0 = E_0$ та $I = 0$ і точка

короткого замикання $U = 0$ і $I_k = \frac{E_0 \sqrt{r_1^2 + r_q^2}}{(r_1^2 + x_d x_q)}$ відомі. Для

неявнополюсного генератора справедливі співвідношення:

$$x_d = x_q = x_c,$$

$$E_0 = \sqrt{(U \cos \varphi + rI)^2 + (U \sin \varphi + x_c I)^2}$$

Його зовнішня характеристика може бути виражена аналітично:

$$U = \sqrt{E_0^2 + I^2(r_1 \cos \varphi + x_c \sin \varphi)^2 - I^2(r_1^2 + x_c^2)} - I(r_1 \cos \varphi + x_c \sin \varphi) \quad (1.137)$$

На рисунку 1.20 показані зовнішні характеристики СГПМ при активному ($\cos \varphi = 1$), активно-індуктивному ($\cos \varphi < 1$; $\varphi > 0$) та активно-ємнісному ($\cos \varphi < 1$; $\varphi < 0$) навантаженнях. При активному навантаженні вихідна напруга зменшується за рахунок падіння напруги активного опору обмотки якоря. Крім того, обмотка статора має індуктивний опір, що обумовлює появу поздовжньо-розмагнічуючої складової реакції якоря, що зменшує результуючий потік Φ_δ , ЕРС E_0 і, отже, вихідну напругу.

Найбільшого значення поздовжньо – розмагнічуюча МРС реакції якоря досягає при чисто індуктивному навантаженні ($\cos \varphi = 0$). Вихідна напруга при такому навантаженні та номінальному струмі зменшується на 30...50 % від ЕРС холостого ходу. При активно-ємнісному навантаженні поздовжня реакція якоря має підмагнічуючу дію і напруга може навіть перевищити ЕРС E_0 .

Активна потужність, що передається генератором навантаженню,

$$P = m_1 UI \cos \varphi. \quad (1.138)$$

Якщо не враховувати втрати у сталі, то електромагнітна потужність, що передається з ротора на статор, складається з активної потужності P і електричних втрат в обмотці якоря $P_{ел}$:

$$P_{ем} = P + P_{ел} = m_1 I(U \cos \varphi + Ir_1). \quad (1.139)$$

1.3.3 Побудова зовнішньої характеристики синхронного генератора з постійними магнітами

Як зазначалося, особливістю генераторів із збудженням від постійних

магнітів і те, що із зміною струму навантаження змінюється стан магнітів і значення корисного потоку повітряному зазорі машини. Тому зовнішні характеристики будують із використанням робочої діаграми магнітів (рис. 1.22) та векторної діаграми напруг (рис. 1.20). Відповідно до такого подання магніти можуть бути замінені еквівалентною обмоткою збудження без втрат, підключеною до джерела струму що створює МРС F_{m0} . Така заміна дозволяє уявити рівняння рівноваги напруг СГПМ за аналогією з рівняннями звичайної синхронної машини в наступному вигляді:

$$\begin{aligned} U_d &= d\Psi_d/dt - \omega\Psi_q + r_1 i_d; \\ U_q &= d\Psi_q/dt - \omega\Psi_d + r_1 i_q; \\ \Psi_d &= L_d i_d + L_{dM} I_{M0}; \\ \Psi_q &= L_q i_q; \quad I_{M0} = const. \end{aligned} \quad (1.140)$$

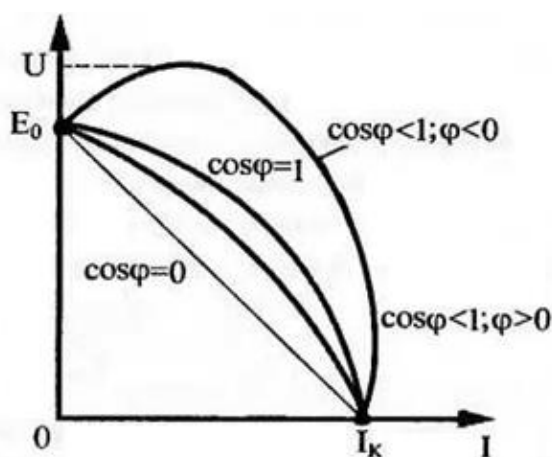


Рисунок 1.21 – Зовнішні характеристики генератора з постійними магнітами

Рівняння (1.140) записані для моделі СГПМ без демпферної обмотки. Напруги U_d та U_q прикладені до затискачів обмотки якоря (для генераторного режиму $U_d < 0$ та $U_q < 0$). Всі параметри наведені до фаз і числа витків обмотки якоря.

Повні індуктивності обмотки якоря $L_d = x_d \omega$; $L_q = x_q \omega$, взаємна індуктивність між обмоткою якоря та магнітом $L_{dM} = x_{dM} \omega$, де

$$x_{dM} = \frac{\sqrt{2E_0}}{I_{M0}} = \frac{\omega W_1 k_{01} F_{MM}}{I_{M0}} \lambda_{dM1} = \frac{2m_1 f_1 (W_1 k_{01})^2}{p} \lambda_{dM1}. \quad (1.141)$$

Тут амплітудне значення еквівалентного струму збудження, наведеного до числа витків і числа фаз обмотки статора:

$$I_{M0} = \pi r F_{M0} / (m_1 W_1 k_{01}), \quad (1.142)$$

та магнітна провідність $\lambda_{dM1} = \lambda_{dM} k_{\phi M}$, де λ_{dM} визначається за схемою заміщення (рис. 1.23, е):

$$\lambda_{dM} = \Phi_{\delta M} / F_{M0} = \lambda_{\delta M} \lambda_M / (\lambda_{\delta M} + \lambda_{\delta} + \lambda_M)$$

Користуючись діаграмою стану магнітів індуктора, можна для будь-якого режиму роботи генератора знайти значення магнітного потоку в повітряному зазорі і поздовжньої складової реакції якоря F_{ad} . У режимі холостого ходу (точка N на рисунку. 1.21) $I = 0$, $F_{ad} = 0$ і $U = E_{od}$. При збільшенні струму навантаження робоча точка генератора зміщується по лінії NM вліво - вниз.

Задамося кількома робочими точками (1, 2, 3 і т.д.) на зазначеній прямій і визначимо відповідні цим режимам значення струму навантаження та напруги генератора (рис. 1,21).

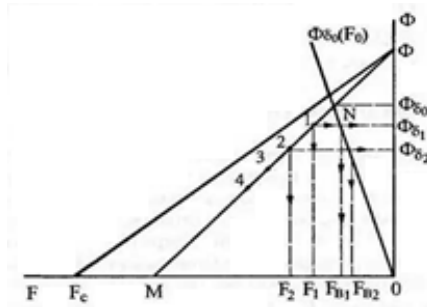


Рисунок 1.22 – Для розрахунку зовнішньої характеристики СГПМ

Наприклад, точці 1 відповідає значення потоку в повітряному зазорі $\Phi_{\delta 1}$ і деяке значення МРС $F_{\delta 1}$, що витрачається на проведення цього потоку по магнітному колу генератора і подолання розмагнічуючої поздовжньої складової реакції якоря F_{ad} . За характеристикою $\Phi_{\delta 0} = f(F)$ (пряма ON), потоку $\Phi_{\delta 1}$ відповідає падіння МРС у зовнішньому для індуктора магнітному колі $F_{\delta 1}$. Поздовжня складова реакції якоря у цьому режимі:

$$F_{ad} = F_1 - F_{\delta 1} .$$

ЕРС навантаженого генератора у точці 1:

$$E_1 = 4,44 k_0 W_{\phi} f_H \Phi_{\delta 1}$$

За розрахованими раніше параметрами генератора і величинами F_{ad} і E_H , що характеризують режим його роботи, кут між струмом і ЕРС можна визначити аналітично:

$$\Psi = \arctg \left[\frac{tg\varphi(1+q)}{2} + \sqrt{\frac{tg^2\varphi(1+q)^2}{4} + q} \right],$$

де

$$q = \frac{x_q - R_a tg\varphi}{s E_H / F_{ad} - x_\sigma + R_a tg\varphi};$$

$$s = 0,9mK_0(W_\phi/p)K_{ad}.$$

Отримане значення кута ψ дозволяє визначити струм:

$$I = \frac{F_{ad}}{s \sin \varphi}, \quad (1.143)$$

та фазну напругу:

$$U = \frac{E_H - I(x_\sigma \sin \Psi + R_a \cos \Psi)}{\cos(\Psi - \varphi)}, \quad (1.144)$$

відповідні енергії у робочій точці на діаграмі магнітів (рис. 1.18).

Проводячи розрахунки за викладеним алгоритмом для інших точок (2, 3 і т.д.) робочої діаграми, отримаємо сукупність значень струму навантаження та відповідної фазної напруги генератора. У режимі короткого замикання при використанні в СГ магнітів на базі рідкісноземельних матеріалів $F_{ad} \cong 0,5F_c$ $U = 0$, а струм I_k визначається за (1.143) за умови:

$$\Psi_k = \arctg(x_q/R_a) \quad (1.145)$$

1.3.4 Активна потужність та електромагнітний момент синхронного генератора з постійними магнітами

Активна потужність, що передається генератором навантаженню:

$$P = m_1 UI \cos \varphi = m_1 UI \cos(\beta - \theta) = m_1 U(I_q \cos \theta + I_d \sin \theta), \quad (1.146)$$

де $I_q = I \cos \beta$; $I_d = I \sin \beta$; $\beta > 0$ при струмі, що відстає від ЕРС; $\theta > 0$ при відстаючій від ЕРС напрузі.

Проектуючи вектори напруги діаграми по рисунку 1.18 на напрямі струмів I_d и I_q , запишемо:

$$U \sin \theta = x_q I_q - r_1 I_d; \quad U \cos \theta = E_0 - x_d I_d - r_1 I_q. \quad (1.147)$$

Вирішуючи ці рівняння щодо струмів, знайдемо:

$$\begin{cases} I_d = [E_0 x_q - U(x_q \cos \theta + r_1 \sin \theta)] / (r_1^2 + x_d x_q) \\ I_q = [E_0 r_1 + U(x_d \sin \theta - r_1 \cos \theta)] / (r_1^2 + x_d x_q) \end{cases}. \quad (1.148)$$

Підставляючи (1.148) у (1.147), отримаємо:

$$P = \frac{m_1 U E_0}{r_1^2 + x_d x_q} (x_q \sin \theta + r_1 \cos \theta) + \frac{m_1 U^2 (x_d - x_q)}{2(r_1^2 + x_d x_q)} \sin 2\theta - \frac{m_1 U^2 r_1}{r_1^2 + x_d x_q}. \quad (1.149)$$

Якщо не враховувати втрати сталі, то електромагнітна потужність, що передається з ротора на статор, складається з активної потужності P і електричних втрат в обмотці якоря $P_{\text{ел}}$:

$$P_{\text{ем}} = P + P_{\text{ел}} = m_1 I (U \cos \varphi + I r_1). \quad (1.150)$$

З векторної діаграми (рис. 1.20):

$$U \cos \varphi + I r_1 = [E_0 + I_d (x_d + x_q)] \cos \beta. \quad (1.151)$$

Звідси:

$$P_{\text{ем}} = m_1 [E_0 I_q + I_d I_q (x_d - x_q)]. \quad (1.152)$$

Електромагнітної потужності відповідає електромагнітний момент $M_{\text{ем}}$, $M_{\text{ем}} = P_{\text{ем}}/\Omega$ який при постійній частоті обертання ротора врівноважує зовнішній механічний крутний момент $M_{\text{кр}}$.

1.3.5 Визначення маси активних матеріалів, втрат та ККД генератора

Маса міді обмотки якоря:

$$M_{oa} = m W_{\phi} l_{\text{ср}} q_{\text{пр}} \gamma_m, \quad (1.153)$$

де $q_{\text{пр}}$ – площа поперечного перерізу фази обмотки якоря;

$\gamma_m = (8.3 \dots 8.9) \cdot 10^3$ кг/м³ – щільність міді;

m – число фаз обмотки.

Маса зубців якоря:

$$M_z = \left\{ \frac{\pi}{4} [(D + 2h_n + 2h_k)^2 - D^2] - Z_{B_n} h_n \right\} l k_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}}, \quad (1.154)$$

де $k_{\text{зс}}$ – коефіцієнт заповнення сталі;

$\gamma_{\text{ст}} \cong 7,8 \cdot 10^3$ кг/м³ – щільність сталі.

Маса ярма (спинки) якоря:

$$M_{a1} = \pi (D + 2h_n + 2h_k + h_a) h_a l k_{\text{зс}} \gamma_{\text{ст}}. \quad (1.155)$$

Маса активних матеріалів статора:

$$M_1 = M_{oa} + M_z + M_{a1}. \quad (1.156)$$

Розрахункові співвідношення визначення маси активних матеріалів ротора залежить від його типу.

Ротор типу «збірна зірочка». В цьому випадку маса активних матеріалів ротора:

$$M_2 = M_{nm} + M_{a2} + M_{\sigma}, \quad (1.157)$$

де M_{nm} – маса постійних магнітів,

$$M_{nm} = 2\rho_{B_M} h_M l_M \gamma_{nm}, \quad (1.158)$$

де γ_{nm} – щільність матеріалу ПМ;

M_{a2} – маса ярма індуктора:

$$M_{a2} = \frac{\pi}{4} [(D_B + h_{BT})^2 - D_B^2] l k_{\phi} \gamma_{CT} \quad (1.159)$$

де $k_{\phi} \cong 1,2...1,3$ -- коефіцієнт, що враховує відмінність форми ярма від циліндра.

Маса бандажу:

$$M_B = \frac{\pi}{4} [D_p^2 - (D_p - h_B)^2] l_p \gamma_B, \quad (1.160)$$

де D_p – діаметр ротора;

γ_B – середня щільність матеріалу бандажу (при металевому бандажі $\gamma_B \approx 8 \cdot 10^3$ кг/м³).

Ротор колекторного типу.

Маса активних матеріалів ротора

$$M_2 = M_{nm} + M_{\Pi} + M_{\sigma} \quad (1.161)$$

де M_{nm} – маса постійних магнітів, що визначається за (1.158);

M_n – маса полюсів:

$$M_n = \left\{ \frac{\pi}{4} [D_p^2 - (D_p - 2h_{B_M})^2 - 2\rho h_{B_M}] \right\} l \delta_{CT} \quad (1.162)$$

M_{δ} – маса зварного бандажу.

Маса активних матеріалів генератора:

$$M_{aM} = M_1 + M_2. \quad (1.163)$$

Відносна маса активних матеріалів

$$m_{aM} = M_{aM} / S_H. \quad (1.164)$$

Повна маса генератора:

$$M_{\sigma} = k_{\text{кон}} M_{\text{ам}}, \quad (1.165)$$

де $k_{\text{кон}} \cong 1,5 \dots 1,7$ – конструктивний коефіцієнт для генераторів із збудженням від ПМ.

Втрати та ККД генератора визначають для номінального режиму роботи.

Втрати у міді обмотки якоря:

$$\Delta P_M = m I_H^2 R_a. \quad (1.166)$$

Втрати в сталі зубців якоря:

$$\Delta P_Z = p_0 k_{TZ} B_Z^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} M_Z. \quad (1.166)$$

Втрати сталі ярма якоря (статора):

$$\Delta P_a = p_0 k_{Ta} B_a^2 \left(\frac{f}{400} \right)^{1,5} M_{a1}. \quad (1.167)$$

У цих виразах p_0 – питомі втрати сталі при $f = 400$ Гц та $B = 1,0$ Тл; $k_{TZ} = 2 \dots 2,2$ і $k_{Ta} = 1,4 \dots 1,6$ – технологічні коефіцієнти для зубців та спинки якоря, що враховують збільшення втрат.

Поверхневі втрати у бандажі ротора:

$$\Delta P_{\text{пов}} = 465 \pi D \alpha_p l_p k_{\text{пов}} \sqrt{n^3} [\pi D B_{\delta} (k_{\delta} - 1)]^2 / \sqrt{Z}, \quad (1.168)$$

де $k_{\text{пов}}$ – коефіцієнт, що враховує структуру поверхні ротора (для суцільного циліндра $k_{\text{пов}} = 2,3$).

Механічні втрати складаються із втрат у підшипниках та аеродинамічних втрат:

$$\Delta P_{\text{мех}} = (0,01 \dots 0,03) S_H \cos \varphi, \quad (1.170)$$

причому великі значення втрат відповідають меншим потужностям.

Додаткові втрати, зумовлені вищими гармоніками магнітного поля, вихровими струмами від полів розсіювання та іншими причинами, можна визначити за співвідношенням:

$$\Delta P_{\text{доб}} \cong 0,01 S_H \cos \varphi. \quad (1.171)$$

Сумарні втрати генератора:

$$\Sigma \Delta P = \Delta P_M + P_Z + \Delta P_a + P_{\text{пов}} + \Delta P_{\text{мех}} + \Delta P_{\text{доб}}. \quad (1.172)$$

Коефіцієнт корисної дії генератора:

$$\eta = \frac{S_H \cos \varphi}{S_H \cos \varphi + \Sigma \Delta P}. \quad (1.173)$$

2 АСИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ

2.1 Загальна характеристика асинхронних генераторів

Асинхронний генератор (АГ) є найбільш поширеною електричною машиною змінного струму, що застосовується переважно як двигун. Тільки низьковольтні АГ (до 500 В напруги живлення) потужністю від 0,12 до 400 кВт споживають понад 40 % всієї електроенергії, що виробляється у світі, а річний їх випуск становить сотні мільйонів, покриваючи найрізноманітніші потреби промислового і сільськогосподарського виробництва, суднових, авіаційних і транспортних систем, систем автоматики, військової та спеціальної техніки. Ці двигуни порівняно прості за конструкцією, дуже надійні в експлуатації, мають досить високі енергетичні показники та невисоку вартість. Саме тому безперервно розширюється сфера використання АГ як у нових галузях техніки, так і натомість складніших електричних машин різних конструкцій.

Наприклад, значний інтерес останніми роками викликає застосування АГ в генераторному режимі для забезпечення живленням як споживачів трифазного струму, так і споживачів постійного струму через випрямляючі пристрої. У системах автоматичного управління, в електроприводі, що стежить, в обчислювальних пристроях широко застосовуються асинхронні тахогенератори з короткозамкненим ротором для перетворення кутової швидкості в електричний сигнал.

У певних умовах експлуатації автономних джерел електроенергії застосування АГ виявляється кращим або навіть єдино можливим рішенням, як, наприклад, високошвидкісних пересувних електростанціях з безредукторним газотурбінним приводом з частотою обертання $n = (9...15)10^3$ об/хв. В даному випадку масивний ротор з поздовжніми пазами прямокутного перерізу не містить обмоток і виконується з цільного сталевого поковки, що дає можливість безпосереднього зчленування ротора артеріальної гіпертензії з газотурбінним приводом при окружній швидкості на поверхні ротора до 400 м/с. Для ротора з шихтованим сердечником та короткозамкнутою обмоткою

типу «біляча клітина» допустима окружна швидкість вбирається не більше 200...220 м/с.

Іншим прикладом ефективного застосування АГ є давнє їх використання у міні-ГЕС при стійкому режимі навантаження. АГ відрізняються простотою експлуатації та обслуговування, легко включаються на паралельну роботу, а форма кривої вихідної напруги у них ближче до синусоїдальної, ніж у СГ при роботі на те саме навантаження. Крім того, маса АГ потужністю 5...100 кВт приблизно в 1,3...1,5 рази менша за масу СГ такої ж потужності і вони несуть менший обсяг обмотувальних матеріалів. При цьому в конструктивному відношенні вони нічим не відрізняються від звичайних АД і можливе їхнє серійне виробництво на електромашинобудівних заводах, що випускають асинхронні машини.

Один із недоліків АД – це те, що вони є споживачами значної реактивної потужності (50 % і більше від повної потужності), необхідної для створення магнітного поля в машині, яка повинна надходити з мережі при паралельній роботі АГ з мережею або від іншого джерела реактивної потужності (батарея конденсаторів (БК) або синхронний компенсатор (СК)) при автономній роботі АГ. В останньому випадку найефективніше включення батареї конденсаторів у ланцюг статора паралельно до навантаження хоча в принципі можливе її включення в ланцюг ротора. Для поліпшення експлуатаційних властивостей АГ ланцюг статора додатково можуть включатися конденсатори послідовно або паралельно з навантаженням.

У всіх випадках автономної роботи АГ джерела реактивної потужності (БК або СК) повинні забезпечувати реактивною потужністю як АГ, так і навантаження, що має, як правило, реактивну (індуктивну) складову ($\cos\varphi_n < 1$, $\varphi_n > 0$).

Маса та розміри конденсаторних батарей або синхронного компенсатора можуть перевищувати масу АГ і тільки при $\cos\varphi_n = 1$ (чисто активне навантаження) розміри СК і маса БК порівняні з розміром і масою АГ.

Інший, найбільш складною проблемою є проблема стабілізації напруги та частоти автономно працюючого АГ, що має «м'яку» зовнішню характеристику.

При використанні АГ у складі автономної ВЕУ ця проблема ускладнюється ще й нестабільністю частоти обертання ротора. Можливі та застосовувані нині способи регулювання напруги АГ розглянуті у цьому розділі.

При проектуванні АГ для ВЕУ оптимізаційні розрахунки слід вести максимум ККД в широкому діапазоні зміни частоти обертання і навантаження, а також мінімум витрат з урахуванням всієї схеми управління і регулювання. Конструкція генераторів повинна враховувати кліматичні умови роботи ВЕУ, постійно діючі механічні зусилля на елементи конструкції та особливо – потужні електродинамічні та термічні впливи при перехідних процесах які виникають при пусках, перервах харчування, випадінні з синхронізму, коротких замикання та інших, а також при значних поривах вітру.

2.2 Принцип дії та конструкція асинхронних генераторів

2.2.1 Конструкція асинхронної машини

Конструкцію асинхронної машини з короткозамкненим ротором показано з прикладу генератору серії АМ (рис. 2.1).

Основними частинами АД є нерухомий статор (10) і ротор, що обертається всередині нього, відокремлений від статора повітряним зазором.

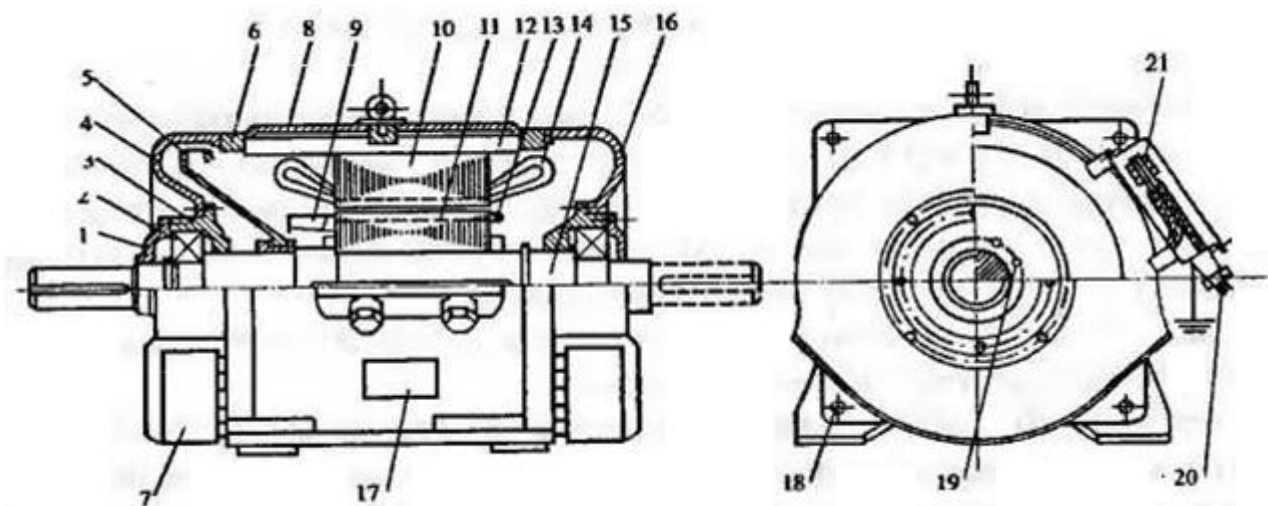


Рисунок 2.1 – Конструкція АМ із короткозамкненим ротором

Для зменшення вихрових струмів, осердя ротора і статора набираються з окремих листів, відштампованих з електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 мм. Листи оксидуються (зазнають термічної обробки), що збільшує їх поверхневий опір. Сердечник статора вбудовується в станину (12), що є зовнішньою частиною машини. На внутрішній поверхні сердечника є пази, в яких укладена обмотка (14). Статорну обмотку найчастіше роблять трифазної двошарової з окремих котушок з укороченим кроком із ізолюваного мідного дроту. Початки та кінці фаз обмотки виводять на затискачі коробки висновків і позначають так: початок – С1, С2, С3; кінці – С4, С5, С6.

Обмотку статора можна з'єднати зіркою (Y) чи трикутником (Δ). Це дає можливість застосовувати один і той же двигун при двох різних лінійних напругах, що знаходяться у відношенні $\sqrt{3}$, наприклад, 127/220 або 220/380 В. При цьому з'єднанню Y відповідає включення АГ на вищу напругу.

Сердечник ротора в зібраному вигляді наприсовується на вал гарячою посадкою і оберігається від провертання за допомогою шпонки. На зовнішній поверхні сердечник ротора має пази для укладання обмотки (13). Обмотка ротора найбільш поширених АД являє собою ряд мідних або алюмінієвих стрижнів, розташованих в пазах і замкнених по торцях кільцями. У генераторах потужністю до 100 кВт та більше обмотка ротора виконується заливкою пазів розплавленим алюмінієм під тиском. Одночасно з обмоткою відливаються і кільця, що замикають, разом з вентиляційними крилатками (9). За формою така обмотка нагадує «біличну клітину».

Для спеціальних генераторів обмотка ротора може виконуватися подібно до статорної. Ротор з такою обмоткою крім зазначених частин має три укріплені на валу контактні кільця, призначені для з'єднання обмотки із зовнішнім ланцюгом. АД у разі називається двигуном з фазним ротором чи з контактними кільцями. Вал ротора (15) об'єднує всі елементи ротора та служить для з'єднання АД з виконавчим механізмом.

Повітряний зазор між ротором та статором становить від 0,4 ... 0,6 мм для машин малої потужності та до 1,5 мм у машин великої потужності.

Підшипникові щити генератору (4) і (16) є опорою для підшипників ротора. Охолодження генератору здійснюється за принципом самообдування вентилятором (5). Підшипники (2) і (3) закриті зовні кришками (1) мають лабіринтові ущільнення. На корпусі статора встановлюється коробка (21) з висновками обмотки статора (20). На корпусі прикріплюється табличка (17), де вказуються основні дані АГ. На рисунку 2.1 позначено також: 6 – посадкове гніздо щита; 7 – кожух; 8 – корпус; 18 – лапа; 19 – вентиляційний канал.

2.2.2 Принцип дії та основні співвідношення в асинхронному двигуні

Фізична сутність електромагнітних взаємодій в асинхронному генераторі, співвідношення основних параметрів, схема заміщення та векторна діаграма мають багато спільного з асинхронним двигуном, тому доцільно розпочати вивчення АГ з опису роботи АД.

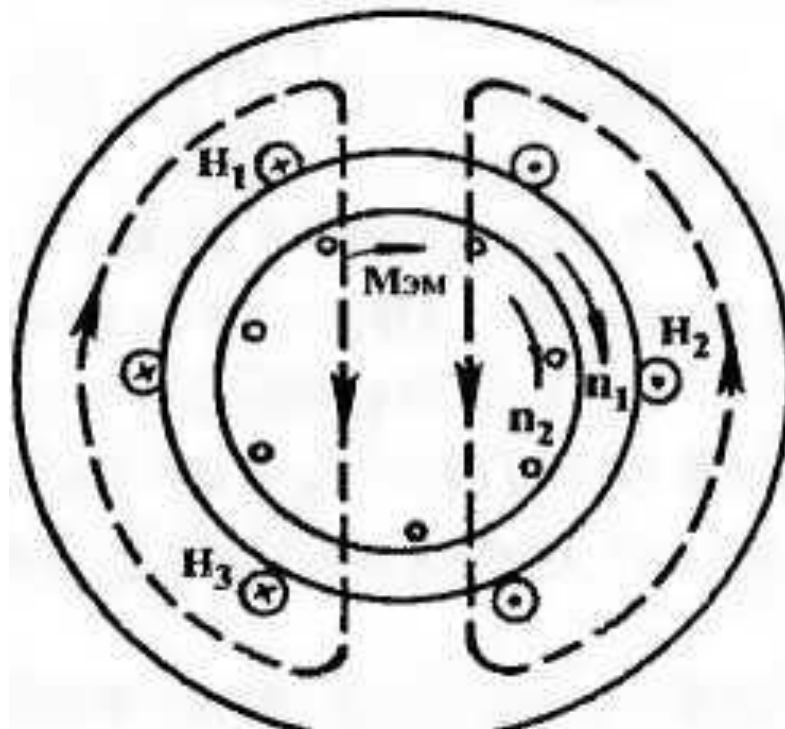


Рисунок 2.2 – До пояснення принципу дії АД

У трифазному АД кругове магнітне поле, що обертається, створюване підключеною до мережі трифазною обмоткою статора (рис. 2.2), перетинає провідники обмотки нерухомого ротора і індукуює в них електрорушійну силу ЕРС, яка розраховується відповідно до закону електромагнітної індукції:

$$e = -W \frac{d\Phi}{dt} \quad (2.1)$$

або

$$E = B \cdot l \cdot v_1, \quad (2.2)$$

де Φ – магнітний потік;

B – магнітна індукція, Тл;

v_1 – лінійна швидкість руху поля;

l – активна довжина провідника ротора.

Струм обмотки ротора збігається у напрямку з ЕРС, а на провідник зі струмом діє сила:

$$F_{em} = B \cdot l \cdot I. \quad (2.3)$$

Сукупність сил, що діють на всі провідники ротора, створює електромагнітний момент:

$$M_{эм} = \sum F_{пр} \frac{D_p}{2}, \quad (2.4)$$

що приводить ротор в обертання зі швидкістю v_2 . Таким чином, споживана обмоткою статора з мережі електрична енергія перетворюється в механічну.

З початком обертання ротора ЕРС провідника ротора зменшується:

$$e'_{пр} = Bl(v_1 - v_2), \quad (2.5)$$

тобто чим вища швидкість v_2 , тим менше ЕРС $e'_{пр}$, струм ротора I і момент $M_{ем}$.

При досягненні ротором швидкості поля (при $v_2 = v_1$), що можливо при пуску вхолосту за рахунок сил інерції, дія $M_{ем}$ припиняється, обертання ротора під дією сил тертя сповільнюється і, коли v_2 стане менше v_1 , знову почне діяти електромагнітний момент. Отже, у схемі, що розглядається, можлива взаємодія провідників ротора з обертовим магнітним полем тільки при їх несинхронному (асинхронному) обертанні.

У АД крутний момент $M_{ем}$ врівноважується моментом опору M_c виконавчого механізму. Чим більше M_c , тим більше повинен бути $M_{ем}$, який зростає тільки за рахунок збільшення струму ротора, а струм за сталості опорів обмотки пропорційний ЕРС. ЕРС ротора, як видно з формули (2.5), залежить від швидкості перетину провідників ротора магнітним полем, що обертається.

Отже, чим більший момент опору M_c , тим меншою повинна бути швидкість обертання ротора, і навпаки.

Важливою величиною, що характеризує роботу асинхронного генератора, є різниця між частотами обертання статора і ротора, виражена у відносних одиницях:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}. \quad (2.6)$$

Ця величина називається ковзанням. Досить часто ковзання асинхронної машини виражають у процентах:

$$S = \frac{(n_1 - n_2)100}{n_1} [\%],$$

де $n_2 = \frac{60f_1}{p}$ – швидкість обертання поля статора (синхронна швидкість),

n_1 – швидкість (частота) обертання ротора, об/хв;

P – число пар полюсів поля;

f_1 – частота мережі, Гц.

При нерухомому роторі ковзання $s = 1,0$ (або 100 %), при холостому ході (при $M_c = 0$) ковзання близько до нуля. Ковзання, що відповідає номінальному режиму АД, називається номінальним і становить 0,02...0,05.

Магнітне поле статора, що обертається, перетинає обмотку ротора зі швидкістю:

$$n = n_1 - n_2 = \frac{n_1 - n_2}{n_1} n_1 = sn_1. \quad (2.7)$$

Частота ЕРС та струмів, що наводяться цим полем в обмотці ротора:

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{pn_1}{60} s = f_1 s, \quad (2.8)$$

тобто пропорційна ковзанню.

Магнітне поле, що створюється МРС обмотки ротора, обертається щодо ротора зі швидкістю:

$$n'_2 = \frac{60f_2}{p} = \frac{60f_1}{p} s = n_1 s, \quad (2.9)$$

а швидкість обертання ротора, виражена через ковзання (2.6),

$$n_2 = n_1(1 - s). \quad (2.10)$$

Сумарна швидкість обертання поля ротора щодо нерухомого статора визначається сумою:

$$n_2' + n_2 = n_1 s + n_1(1 - s) = n_1, \quad (2.11)$$

тобто магнітне поле ротора обертається в статорі з тією ж швидкістю і в тому напрямку, що і магнітне поле статора. Отже, вони нерухомі щодо один одного. Це виконується в будь-якому режимі роботи АМ – у руховому, гальмівному та генераторному.

Для аналізу та розрахунку роботи АМ у руховому режимі використовують електричну схему заміщення (рис. 2.3), в якій параметри обмотки нерухомого ротора наведено до обмотки статора, а обертання ротора та пов'язані з ним зміни ЕРС, струму та параметрів враховані через ковзання S .

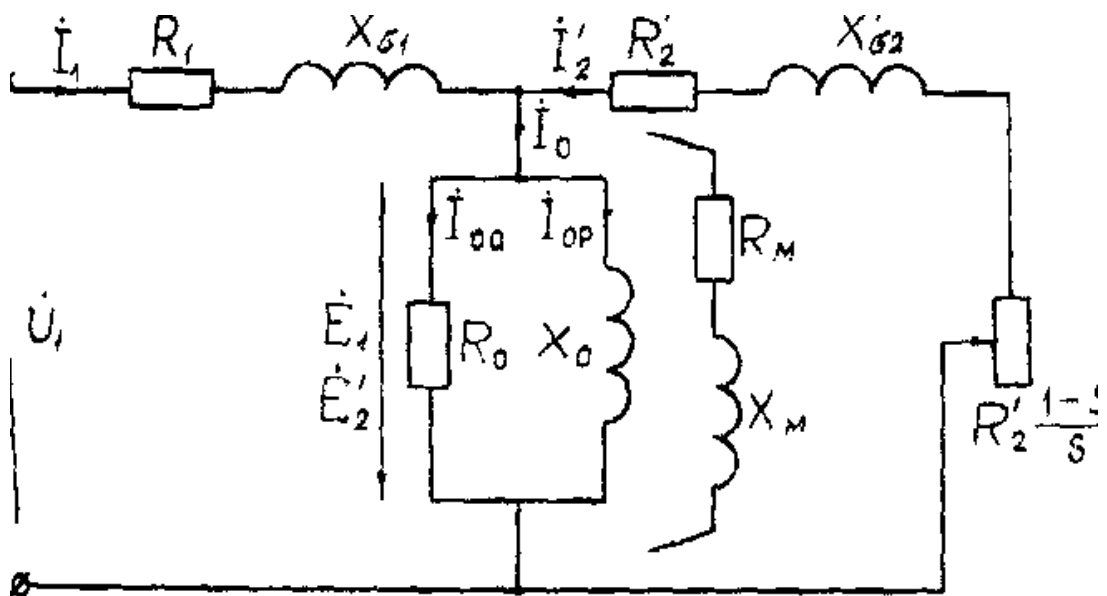


Рисунок 2.3 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

На схемі заміщення асинхронного двигуна зазначено:

R_1, X_1 – активний та індуктивний опір фази обмотки статора;

$\frac{R_2'}{s}, X_2'$ – наведені активний та індуктивний опір фази обмотки ротора;

R_m, X_m – активний та індуктивний опір вітки намагнічування;

\dot{U}_1 – фазна напруга мережі;

E_1, E_2' – ЕРС, що індуковані у фазах обмотки статора та наведеної

обмотки ротора;

\dot{I}_1, \dot{I}_2' – струми у фазі обмотки статора та наведеної обмотки ротора.

ЕРС E_1 і E_2' рівні за величиною, при цьому:

$$E_1 = E_2' = 4,44f_1W_1k_{o61}\Phi_0, \quad (2.12)$$

де W_1 – число послідовно з'єднаних витків фази статора;

k_{o61} – обмотковий коефіцієнт;

Φ_0 – повний магнітний потік на пару полюсів магнітної системи.

Наведений активний опір фази обмотки ротора розкладаємо на дві складові:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \frac{1-s}{s}. \quad (2.13)$$

Розрахунок реальних значень параметрів, ЕРС та струму ротора проводиться за співвідношенням:

$$E_2 = E_1/k_e; \quad I_2 = I_2' \cdot k_i; \quad r_2 = \frac{r_2'}{k_e k_i}; \quad x_2 = \frac{x_2'}{k_e k_i},$$

де $k_e = W_1 k_{o61} / W_2 k_{o62}$ – коефіцієнт трансформації ЕРС;

$k_i = m_2 W k_{o62} / m_1 W_1 k_{o61}$ – коефіцієнт трансформації струму;

m_1, m_2 – число фаз статора і ротора.

Рівняння електричної рівноваги АД відповідно до схеми заміщення (рис. 2.3) записуються у вигляді:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 \\ 0 = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' / s - j\dot{I}_2' X_2' \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \end{cases} \quad (2.14)$$

Враховуючи (2.13), рівняння ЕРС зведеної обмотки ротора виглядає як:

$$\dot{I}_2' R_2' \frac{1-s}{s} = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' - j\dot{I}_2' X_2'.$$

ЕРС E_1 спрямована зустрічно щодо прикладеної до обмотки статора напруги і називається проти ЕРС, а ЕРС E_2' є активною, підтримує струм \dot{I}_2' в замкнутій обмотці ротора.

Графічним розв'язком рівнянь (2.14) є векторна діаграма наведеного АД, представлена на рисунку 2.4. Діаграму будують для заданого навантаження, тобто,

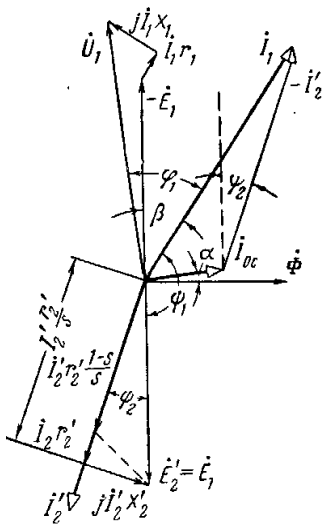


Рисунок 2.4 – Векторна діаграма АД

при відомому ковзанні генератору s . Вектор ЕРС $\dot{E}_2' = \dot{E}_1'$ є результируючим вектором, що з'єднує початок координат з кінцем вектора $j\dot{I}_2' X_2'$. Магнітний потік Φ_0 , що відстає від намагнічуючого струму \dot{I}_0 на кут магнітного запізнення α , в свою чергу, на прямий кут випереджає ЕРС, яку він створює. Побудувавши, з вже відомих векторів, рівняння струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$, отримаємо струм обмотки статора, за напрямом якого визначають напрями падіння напруги в колі обмотки статора і саму напругу \dot{U}_1 , прикладену до машини. Кути між величинами обмоток статора φ_1

та ротора ψ_2 отримують побудовою, проте кут зсуву струму \dot{I}_2' відносно ЕРС, що його створює, \dot{E}_2' може бути отриманий і аналітичним шляхом:

$$\psi_2 = \arctg(X_2' s / R_2). \quad (2.15)$$

Активна та реактивна складові наведеного струму ротора розраховуються наступним чином:

$$I_{2a}' = I_2' \cos \psi_2; \quad (2.16)$$

$$I_{2p}' = I_2' \sin \psi_2.$$

Вектор струму статора \dot{I}_1 відстає від вектора U_1 на кут φ а його складові визначаються зі співвідношень:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi; \quad (2.17)$$

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi.$$

Потужності, що споживаються з мережі:

$$P_1 = m U_1 I_1 \cos \varphi_1 [\text{Вт}]; \quad (2.18)$$

$$Q_1 = m U_1 I_1 \sin \varphi_1 [\text{ВАр}]; \quad (2.19)$$

$$S = mU_1 I_1 \text{ [ВА]}. \quad (2.20)$$

Електромагнітна потужність АД, що передається зі статора в ротор електромагнітним шляхом, на підставі схеми заміщення (рис. 2.3) може бути записана у вигляді:

$$P_{\text{ем}} = 3I_2' E_2' \cos \Psi_2 = 3I_2' \frac{R_2'}{s}. \quad (2.21)$$

Величина електромагнітного моменту визначається співвідношенням:

$$M_{\text{ем}} = \frac{P_{\text{ем}}}{\Omega_1} = \frac{3(I_2')^2 \frac{R_2'}{s} p}{2\pi f_1}, \quad (2.22)$$

де Ω_1 – кутова швидкість обертання ротора:

$$\Omega_1 = \frac{\omega_1}{p} = \frac{2\pi f_1}{p}.$$

Струм ротора:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{[R_1 + R_2' + R_2'(1-s)/s]^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (2.23)$$

або з урахуванням (2.13) отримують:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{[R_1 + R_2'/s]^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (2.24)$$

тоді величину електромагнітного моменту визначають за співвідношенням:

$$M_{\text{ем}} = \frac{m_1 p U_1 R_2' / s}{2\pi f [(R_1 + R_2'/s)^2 + (X_1 + X_2')^2]}. \quad (2.25)$$

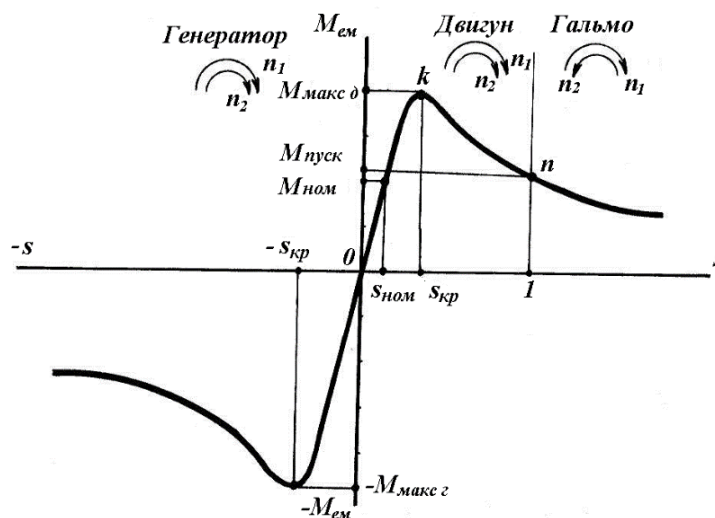


Рисунок 2.5 – Залежність $M_{\text{ем}} = f(s)$ для асинхронної машини

Таким чином, крутний момент АД пропорційний квадрату напруги фази, що підводиться, і складним чином залежить від ковзання і параметрів статора і ротора.

Залежність $M_{em} = f(s)$, іноді називається механічною характеристикою АД, показано на рисунку 2.5, а (у першому квадранті).

Найчастіше механічну характеристику зображують залежністю $n = f(M_{em})$ або $s = f(M_{em})$ (рис. 2.6).

При пуску ($n_2 = 0, s = 1$) АД розвиває пусковий момент. Тоді із виразу (2.25), підставивши значення $s = 1$, отримують формулу пускового моменту:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f [(R_1 + R_2') + (X_1 + X_2')^2]} \quad (2.26)$$

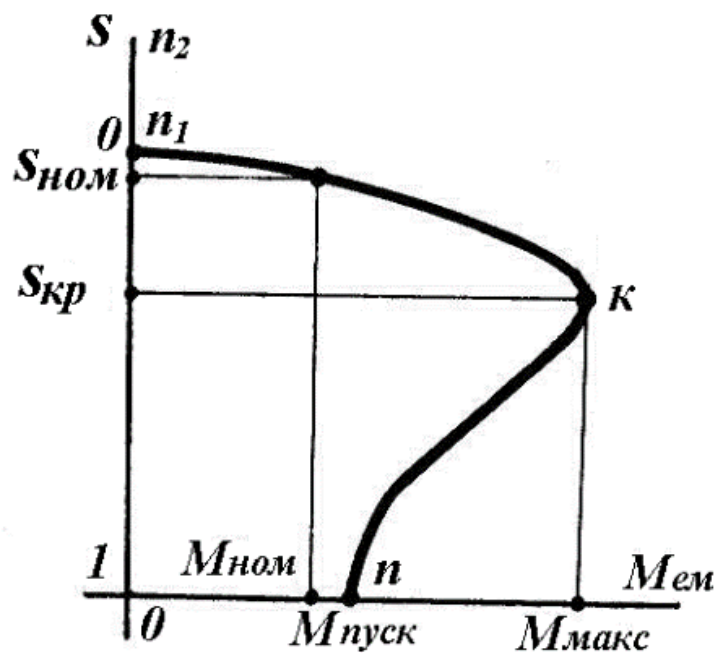


Рисунок 2.6 – Залежність частоти обертання (ковзання) від електромагнітного моменту асинхронного двигуна

У міру розгону ротора M_{em} спочатку збільшується, при деякому критичному ковзанні $s_{кр}$ досягає максимального значення $M_{макс}$, а потім зменшується. Частота обертання ротора, що встановилася, досягається при $M_{em} = M_c$ (M_c – момент опору виконавчого механізму).

Ковзання, що відповідає точкам в яких момент максимальний називається критичним ковзанням. Його значення отримують, взявши першу похідну dM_{em}/ds і прирівнявши її до нуля:

$$s_{кр} = \pm R'_2 / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}. \quad (2.27)$$

Підставивши (2.27) в (2.25), отримують значення максимального моменту:

$$M_{макс} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X'_2)^2}]}, \quad (2.28)$$

де знак плюс відповідає режиму двигуна, а мінус – генератора.

Для асинхронних двигунів загального призначення активний опір обмотки статора набагато менший ніж сума індуктивних опорів $R_1 \ll X_1 + X'_2$, тому, нехтуючи опором R_1 , критичне ковзання визначають приблизно:

$$s_{кр} \approx \pm R'_2 / (X_1 + X'_2), \quad (2.29)$$

аналогічно і максимальний момент

$$M_{макс} \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X'_2)}. \quad (2.30)$$

Слід зазначити, що згідно з (2.28) максимальний момент генераторного режиму, дещо більший, ніж режиму генератора ($M_{макс г} > M_{макс д}$).

Номінальний режим роботи АД на механічній характеристиці визначається точкою з координатами $M_{ном}$ (номінальний момент) та $s_{ном}$ (номінальне ковзання).

Номінальний режим характеризується величинами: $P_{ном}$ – номінальна потужність (кВт); $I_{ном}$ – номінальний струм статора (А); $\eta_{ном}$ – ККД номінального режиму; $n_{ном}$ – номінальна частота обертання ротора (об/хв); $\cos \varphi_{ном}$ – коефіцієнт потужності в номінальному режимі.

Коефіцієнт потужності АМ завжди менше одиниці, тому що вона споживає з мережі значну реактивну потужність, що майже не залежить від величини навантаження.

На рисунках 2.5, 2.6 механічна характеристика генератору має дві ділянки. Перша [ок] – ділянка стійкої роботи машини, тому що зростання навантаження (збільшення s та зниження n_2) приводить до збільшення моменту, який розвиває двигун, що дає йому змогу обертати збільшене навантаження.

На другій ділянці характеристики [кп] – зростання навантаження приводить до зниження моменту генератору, тому ця ділянка називається ділянкою нестійкої роботи. Відношення максимального моменту, який розвиває двигун, до номінального ($\lambda_m = M_{\max} / M_{\text{ном}}$) називається перевантажувальною здатністю двигуна. Для двигунів загального призначення $\lambda_m = 1,6 \dots 2,5$.

Як правило, номінальний момент машини менший від пускового, що дозволяє здійснити пуск двигуна з номінальним навантаженням, цю властивість двигуна називають пусковою здатністю або кратністю пускового моменту ($\lambda_n = M_{\text{пуск}} / M_{\text{ном}}$), звичайно $\lambda = 0,8 \dots 1,7$.

2.3 Робота асинхронної машини, підключеної до мережі, у генераторному режимі

2.3.1 Фізичні процеси та співвідношення в асинхронному генераторі

Якщо ротор АМ, підімкнений до мережі, за допомогою додаткового приводного генератору привести у обертання в напрямку обертання поля статора зі швидкістю $v_2 > v_1$ (рис. 2.2), то ЕРС $e'_{\text{пр}}$ у співвідношенні (2.5) змінить свій напрямок на протилежне порівняно з руховим режимом. Внаслідок цього змінить свій напрямок і струм ротора I_2 (його активна складова I'_{2a}), отже, змінить напрямок і струм статора I_1 а це означає, що зміниться напрямок перетворення енергії і АМ віддаватиме активну потужність у мережу, тобто. працювати в режимі генератора – перетворювати механічну енергію, що підводиться к валу в електричну. Напрямок електромагнітного моменту $M_{\text{ем}}$ також змінюється на зворотне – він стає гальмівним і врівноважує крутний момент приводного генератору.

Повна механічна характеристика типової АМ із короткозамкненим ротором показано на рисунку 2.5.

Як видно, ковзання у генераторному режимі:

$$S_r = \frac{n_1 - n_2}{n_1} < 0,$$

і теоретично може змінюватися в межах $0 > s > -\infty$. На практиці, однак, висока швидкість неприпустима як з умов механічної міцності, так і з міркувань обмеження втрат.

З точки зору збереження номінального ККД та обмеження нагріву, номінальне ковзання АГ $S_{Гном}$ має відповідати номінальному ковзанню АД $S_{Дном}$ і становить $S_{Гном} = 0,02 \dots 0,05$ залежно від типу та потужності АМ.

Для асинхронного генератора справедливі такі самі схеми заміщення, що і для асинхронного генератора. Параметри схеми заміщення, коефіцієнти приведення k_e і k_i визначаються так само, як і в режимі генератора.

На рисунку 2.7 показана схема заміщення АГ, яка називається Г-подібною і використовується при розрахунках, в якій вітка намагнічування винесена на затискачі, а напрями струмів I'_2 та I_1 змінені на зворотні порівняно зі схемою заміщення АД (рис.2.3).

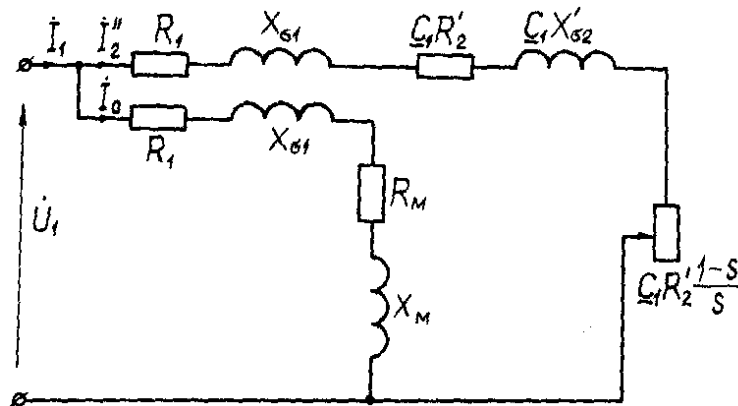


Рисунок 2.7 – Г- подібна схема заміщення АГ

Поправочний коефіцієнт C_1 , що враховує зміни параметрів схеми при винесенні гілки намагнічування, визначається із співвідношення $C_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}$.

Величина коефіцієнта C_1 мало відрізняється від одиниці і складає 1,02...1,06.

Показані на рисунку 2.7 параметри $s_{кр}$ та M_{max} розраховуються за більш точними, ніж (2.27), (2.28), співвідношеннями:

$$s_{кр} = \pm C_1 R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2} ; \quad (2.31)$$

$$M_{макс} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 C_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + C_1 X_2')^2}]} . \quad (2.32)$$

Знак (+) відноситься до рухового режиму, знак (–) – до генераторного. Якщо в (2.31) і (2.32) не враховувати C_1 і знехтувати опором R_1 , який набагато менший за $X_1 + X_2'$, ($R_1 \ll X_1 + X_2'$), то виходять співвідношення (2.29) і (2.30).

Як видно з (2.32), величина максимального моменту АМ у генераторному режимі дещо вища, ніж у руховому. У середньому значення критичних параметрів для АМ становить $s_{кр} \approx 0,12 \dots 0,20$; $M_{max} = (1,9 \dots 2,7) M_{ном}$.

Характер зміни струму статора I_1 для широкого діапазону зміни ковзання АМ наведено на рисунку 2.8.



Рисунок 2.8 – Зміна струму статора АМ

Струм холостого ходу, що є майже суто реактивним, становить $I_0 \approx (0,25 \dots 0,45) I_{ном}$, проте в тихохідних машинах (зі швидкістю обертання 375 об/хв і менше) він може досягати $(0,8 \dots 0,9) I_{ном}$. Струм при ковзанні $s = \pm 1,0$ становить $I_n = (5,5 \dots 7,0) I_{ном}$.

Векторна діаграма для АГ наведена на рисунку 2.9. Тут струм ротора I_2' зрушений по відношенню до ЕРС E_2' на кут ψ_2 , вектор струму статора I_1 , як і

в руховому режимі, визначається векторною сумою $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$. Внаслідок повороту струму \dot{I}_2' (разом з ЕРС \dot{E}'_2) майже на 180° струм статора \dot{I}_1 також повертається за годинниковою стрілкою, при цьому кут $\varphi_1 > 90$ а активна складова струму статора:

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 < 0. \quad (2.33)$$

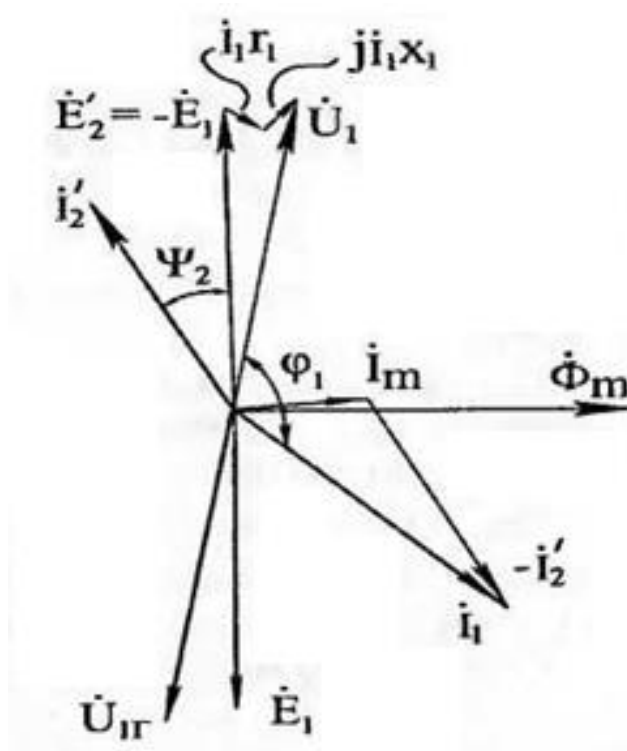


Рисунок 2.9 – Векторна діаграма АГ

Тоді потужність

$$P_2 = U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0, \quad (2.34)$$

що символізує зміну знака активної складової струму статора (порівняно з АД) та напрямку потоку потужності – механічна потужність перетворюється на електричну і віддається в мережу.

Величина реактивної потужності АГ визначається зі співвідношення:

$$Q_1 = m U_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.35)$$

і складається з реактивної потужності, необхідної для створення основного магнітного поля,

$$Q_m = m_1 I_{0\mu}^2 x_m \quad (2.36)$$

і потужності, що припадає на потоки розсіювання обмоток статора та ротора:

$$\begin{aligned} Q_{\text{ст}} &= m_1 I_1^2 x_1 \\ Q_{\text{рот}} &= m_1 (I_2')^2 x_2' \end{aligned} \quad (2.37)$$

З векторної діаграми (рис. 2.9) випливає також, що реактивна складова струму статора

$$I_{1p} = I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.38)$$

і реактивна потужність Q при переході АМ з рухового режиму в генераторний режим зберігають свої знаки. Це означає, що асинхронний генератор споживає з мережі реактивну потужність та індуктивний струм. Тому АГ може працювати лише на мережу, яка має джерела реактивної потужності.

2.3.2 Особливості паралельної роботи асинхронних генераторів із мережею. Порівняння з синхронним генератором

Для того щоб запобігти появі в момент умикання генератора до мережі значних струмів (так званих, кидків струмів), необхідно виконати умови ввімкнення генератора на паралельну роботу. Для синхронних генераторів цих умов чотири:

- ЕРС генератора E_0 і напруга мережі U_m повинні бути рівними і протилежно направлені ($E_0 = -U_m$);
- частота генератора f_r повинна бути рівна частоті мережі ($f_r = f_m = 50 \text{ Гц}$);
- чергування фаз ЕРС генератора і напруги мережі повинне бути однаковим.

Приведення генератора до стану, коли всі три умови виконані, і сам процес умикання на паралельну роботу називається синхронізацією генератора з мережею.

Порушення трьох перших умов супроводжується значними електромагнітними навантаженнями, коливаннями енергії або механічними поштовхами на лінії «приводний двигун – синхронний генератор», «биттям» напруг, а недотримання четвертої умови загрожує руйнуванням генератора.

Тяжкі наслідки для СГ можуть бути пов'язані з короткими замиканнями на шинах, що супроводжуються потужними перехідними процесами з великими ударними струмами $I_y = (10...20)I_{ном}$, електродинамічними і термічними навантаженнями на обмотках і вузлах кріплення.

Додатковою особливістю паралельної роботи ВЕУ з СГ на мережу є постійно діючий пульсуючий момент вітротурбини, що пов'язано з мінливістю вітрового потоку i , як наслідок, – пульсації струму і складових потужності. Система регулювання кута установки лопатей, маючи досить високу постійну частоту, працює із запізненням і синхронна машина перебуває у стані перехідного процесу з випадковими коливаннями кута θ та навантаження. Напружений режим роботи у зв'язку із цим створюється для демпферної системи ротора.

При значних поривах вітру створюється небезпека випадання СГ із синхронізму з мережею та переходу їх у асинхронний режим, що створить додаткові передумови руйнування демпферної обмотки.

Всі ці обставини разом знижують надійність роботи СГ, терміни його безаварійної експлуатації, нерідко призводять до розплавлення та руйнування демпферної обмотки та аварії СГ.

Загальними перевагами паралельної роботи АГ є:

- АГ вимагає менш жорстких умов включення на паралельну роботу з мережею або з іншим АГ або СГ, він може бути включений навіть при значній різниці в частотах обертання АГ та «узагальненого» СГ мережі. Фактично АГ виключають проблему синхронізації з мережею (крім умови дотримання порядку чергування фаз) і випадання з синхронізму;

- АГ не вимагає захисту від коротких замикань, тому що в цьому режимі він негайно втрачає збудження (саморазбуджується);

- АГ забезпечує кращі якості вихідної напруги;

- при паралельній роботі з мережею відпадає необхідність у системі самозбудження та регулювання напруги.

2.4 Робота асинхронного генератора в автономному режимі

2.4.1 Принцип дії асинхронного генератора

При розгляді принципу дії АД та фізичних процесів при його переході в генераторний режим було показано, що у всіх випадках АМ споживає з мережі реактивну потужність, необхідну для створення магнітного поля. При автономній роботі АМ в генераторному режимі магнітне поле у повітряному зазорі створюється в результаті взаємодії МРС всіх фаз обмотки статора і МРС обмотки ротора. Характер розподілу МРС такий самий, як і в АД, він також визначає характер розподілу магнітного поля на полюсному розподілі. В АГ цей потік дуже близький до синусоїдального і при обертанні ротора індукує у фазах статора та в обмотці ротора ЕРС E_1 та E_2 , які можна прийняти синусоїдальними.

На відміну від АД в АГ в даному випадку ЕРС E_1 і E_2 є активними, підтримують струм у відповідних ланцюгах і навантаженні, підключеної до вихідних затискачів.

У встановленому режимі роботи основні співвідношення для АГ з самозбудженням визначаються зі схеми заміщення (рис.2.10) аналогічної схемі на рисунку 2.7. Основна відмінність тільки в тому, що до її затискачів підключено опір навантаження $Z_H = R_H + jX_H$ і конденсатори для забезпечення самозбудження та регулювання напруги при зміні навантаження АГ із опорами $X_C = 1/\omega C$ і $X_{CK} = 1/\omega C_K$, а рівняння електричної рівноваги мають вигляд:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_1 - \dot{I}_1 R_1 - j\dot{I}_1 X_1, \quad (2.39)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2'). \quad (2.40)$$

При цьому

$$E_1 = E_2' = 4,44 f_1 W_1 k_{061} \Phi_0. \quad (2.41)$$

Як бачимо, напруга U_1 при роботі під навантаженням змінюється як за рахунок падіння напруги на опорах R_1 та X_1 , так і за рахунок зниження магнітного потоку Φ_{0m} , пов'язаного з дією МРС ротора, що розмагнічує.

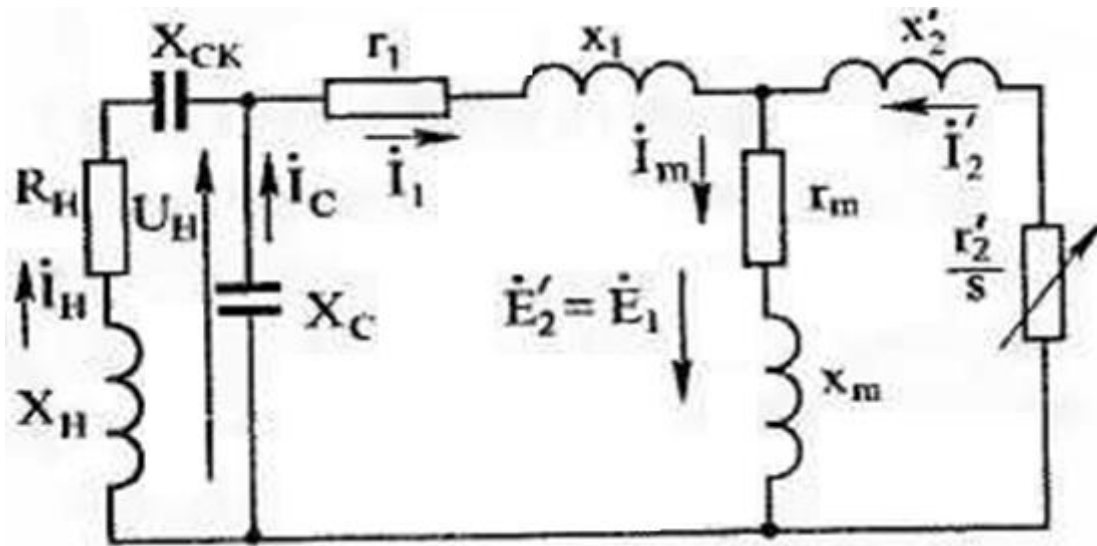


Рисунок 2.10 – Електрична схема заміщення автономного АГ

Якщо магнітний ланцюг АГ виконано з достатньо сильним насиченням, то потік Φ_{0m} залишається майже постійним і напруга U_1 при збільшенні навантаження змінюється в меншій мірі, а його зовнішня характеристика виходить більш «жорсткою».

2.4.2 Самозбудження асинхронного генератора

Особливості самозбудження АГ. Як описано вище, АД, підключений до трифазної мережі змінного струму, при частоті обертання ротора, більше, ніж частота обертання поля статора, переходить у генераторний режим і віддає в мережу активну потужність, споживаючи з мережі реактивну потужність, необхідну для створення обертового магнітного поля взаємної індукції. Гальмівний електромагнітний момент, діючий на роторі, долається приводним двигуном – дизелем, гідротурбіною, вітрогенератором.

Для збудження автономно працюючого АГ необхідна наявність джерела реактивної потужності - батареї конденсаторів або синхронного компенсатора, підключених до статорної обмотки. При цьому майже природною представляється робота АГ при надсинхронному ковзанні, коли швидкість обертання ротора вище швидкості обертового магнітного поля. Однак практично АГ може збуджуватися при частоті обертання ротора, значно меншій синхронній, причому значення напруги та частоти струму виявляються

пропорційними частоті обертання ротора і, крім того, залежать від схеми з'єднання конденсаторів.

Збільшення частоти обертання ротора до синхронної (1500 об/хв) спостерігалось збільшення частоти струму до 400Гц. У деяких випадках, навпаки, не здавалося домогтися стійкого збудження АГ навіть при надсинхронної частоті обертання ротора. Наприклад, для намагнічених гладких сталевих масивного та шихтованого роторів самозбудження не виникало за будь-яких величин приєднаної ємності.

Для масивного сталевих ротора з тонким екраном з міді, а також для масивного зубчастого сталевих ротора з торцевими мідними кінцями АГ стійко збуджується при розрахунковому значенні ємності. Асинхронна машина з гладкими роторами із міді або алюмінію збуджується без будь-яких додаткових впливів ззовні.

Фізичні процеси самозбудження АГ з повною основою можна віднести до недостатньо вивчених, що пов'язано з переважним використанням до теперішнього часу АМ як генератору, з розробкою для нього теорії, розрахункових методик та проєктування, а для генераторного режиму ці машини проєктувалися та випускалися досить рідко.

У малопотужних системах генерування застосовуються, як правило, АМ, призначені для роботи в руховому режимі з конденсаторним збудженням, проте застосовуються інші рішення, які будуть розглянуті в цьому розділі.

Опис процесу самозбудження на принципі залишкової намагніченості магнітного ланцюга. Сучасні роботи із самозбудження АГ за допомогою статичних конденсаторів побудовані на трьох підходах. Один з них базується на принципі залишкової намагніченості магнітного ланцюга машини, початкова ЕРС, від якої потім посилюється ємнісним струмом в статорі .

Розглянемо цей підхід.

Автономна робота АГ в режимі самозбудження від потоку залишкового намагнічування можлива, якщо до затискачів обмотки статора підключити конденсатори, необхідні як джерело реактивної потужності Q_g для збудження магнітного поля АГ, а при його роботі на активно-індуктивне навантаження ці

конденсатори повинні служити джерелом реактивної потужності Q_H і для навантаження (рис. 2.11).

Процес самозбудження АГ відбувається так само, як у генератора постійного струму, за наявності магнітного потоку залишкового намагнічування $\Phi_{ост}$. При обертанні ротора від приводного генератора (ПД) цей потік індукує в обмотці статора ЕРС $E_{ост} \approx (0,02...0,03)U_H$, яка викликає в конденсаторах С струм.

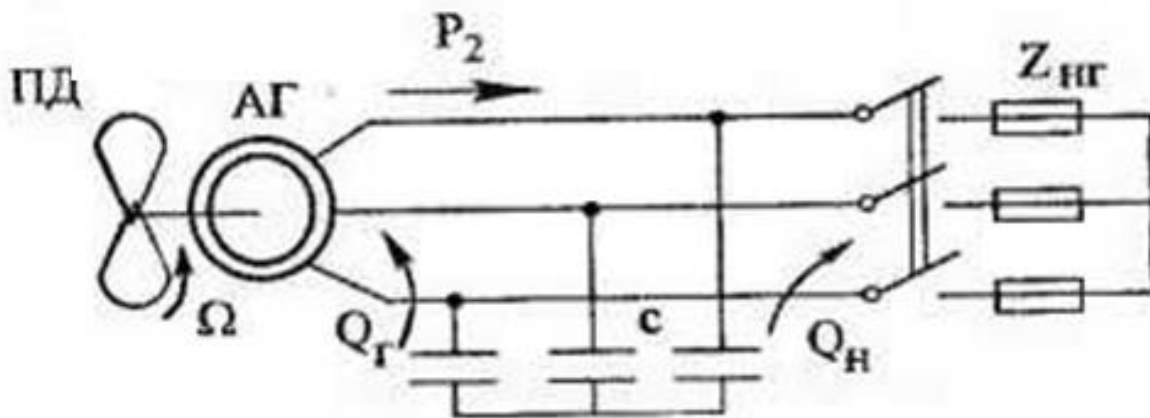


Рисунок 2.11 – Схема конденсаторного збудження асинхронного генератора

Цей струм, будучи ємнісним (випереджаючим), протікаючи по обмотці статора, підмагнічує АГ, посилює $\Phi_{ост}$, що призводить до зростання ЕРС $E_{ост}$, подальшого зростання струму та потоку (рис. 2.12, а). Закінчення процесу самозбудження відповідає точці A_0 перетину характеристики холостого ходу (характеристики намагнічування) АГ з вольт-амперною характеристикою конденсаторної батареї ($I_c X_c$) при ЕРС E_0 та струму статора I_{c0} . Напруга на генераторі залежить від ємності конденсаторів: чим менше ємність С, тим більше кут α_0 . При малих значеннях ємності $S_{кр}$ характеристика $I_c X_c$ не перетинається з характеристикою холостого ходу та генератор не збуджується.

У ряді випадків початок процесу самозбудження АГ може бути забезпечено шляхом розряду на обмотку попередньо зарядженої конденсаторної батареї.

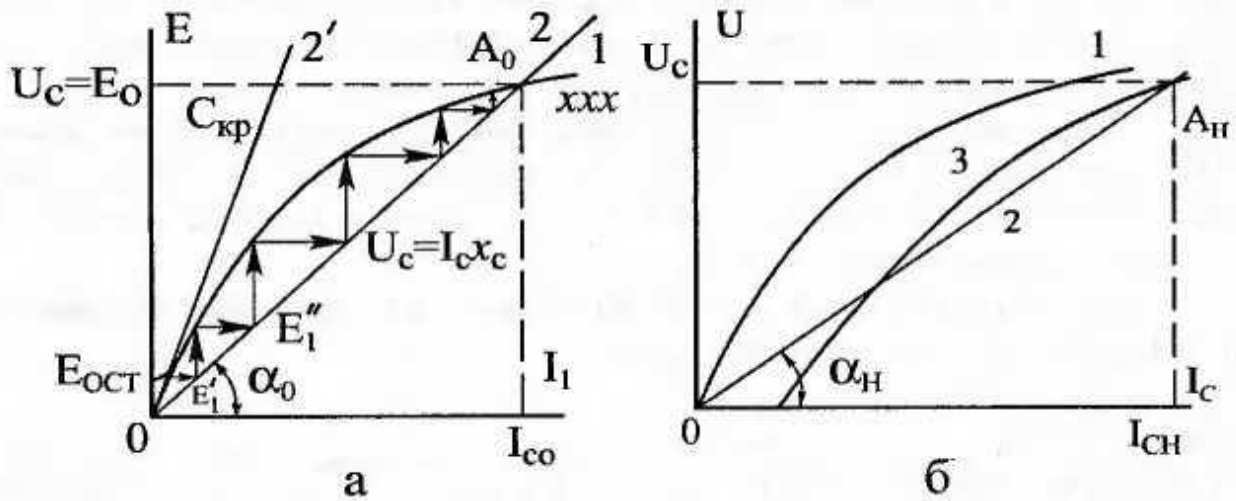


Рисунок 2.12 – Процес самозбудження асинхронного генератора від конденсаторної батареї

Кут α_0 визначається із співвідношення

$$\operatorname{tg} \alpha_0 = \frac{U_c}{I_{c0}} = \frac{x_{c0} I_{c0}}{I_{c0}} = x_{c0} = \frac{1}{\omega_1 C_0} \quad (2.42)$$

Самозбудження АГ під навантаженням вимагає збільшення ємності, що добре ілюструє рисунок 2.12, б, де крива 3 – це навантажувальна характеристика АГ. Точка A_H – точка закінчення самозбудження. При цьому:

$$\operatorname{tg} \alpha_H = \frac{U_c}{I_{cH}} = \frac{x_{c0} I_{c0}}{I_{cH}} = x_{cH} = \frac{1}{\omega_1 C_H}. \quad (2.43)$$

Оскільки $\operatorname{tg} \alpha_0 > \operatorname{tg} \alpha_H$, то $C_H > C_0$.

Реактивна потужність конденсаторів визначається сумою реактивних потужностей генератора Q_G і навантаження Q_H , тобто:

$$Q_c = m U_c I_c = Q_r + Q_H = P_r \operatorname{tg} \varphi_r + P_H \operatorname{tg} \varphi_H = P_H (\operatorname{tg} \varphi_r + \operatorname{tg} \varphi_H). \quad (2.44)$$

Необхідна ємність конденсаторів буде розрахована із співвідношень:

$$x_c = \frac{1}{\omega_1 C} = \frac{U_c}{I_c} = \frac{m_1 U_c^2}{Q_c}, \quad (2.45)$$

або

$$C = \frac{Q_c}{m_1 \omega_1 U_c^2} = \frac{P_H (\operatorname{tg} \varphi_r + \operatorname{tg} \varphi_H)}{m_1 \omega_1 U_c^2}, \quad (2.46)$$

де $\omega_1 = 2\pi f_1$ – кутова частота.

Як бачимо з (2.46), за зміни величини навантаження АГ ємність конденсаторів необхідно регулювати при зміні кута φ_H навантаження.

Маса та розміри конденсаторної батареї, необхідної для автономного АГ, як правило, можуть перевершувати масу АГ і тільки при $\cos \varphi_n = 1$ масу конденсаторів можна порівняти з масою АГ.

Масогабаритні та вартісні показники конденсаторних систем самозбудження та регулювання напруги автономних АГ не видаються непереборними – в останні роки розроблені поліпропіленові плівкові конденсатори типів ПЖ та ПТ, що мають цілком придатні питомі показники: $m_{y\delta} = (0,1 \dots 0,2)$ кг/кВАр при $f = 400$ Гц та приблизно $m_{y\delta} = (0,4 \dots 0,5)$ кг/кВАр при $f = 50$ Гц. Найкращі вітчизняні конденсатори мають $m_{y\delta} = 0,32$ кг/кВАр, а з урахуванням конструктивних факторів $m_{y\delta} = 0,65$ кг/кВАр.

На рисунку 2.13 показані осцилограми наростання фазної напруги для перехідного процесу самозбудження АГ на основі АД типу Sq100L-4В з наступними даними: $P_n = 3$ кВт, $U_n = 220/380$ В, $I_n = 12,0/6,9$ А, $n_1 = 1415$ об/хв, $\cos \varphi_n = 0,81$, $\eta_n = 81\%$. Ємність батареї збудливих конденсаторів на фазу $C_b = 75$ мкФ (рис. 2.13, а); $C_b = 125$ мкФ (рис. 2.13, б). З метою обмеження впливу магнітного стану АМ на перебіг перехідного процесу конденсатор однієї з фаз був попередньо заряджений до $U = 150$ В. Як бачимо з цих рисунків, характер наростання напруги в основному відповідає процесу, показаному графічно на рисунку 2.12, а.

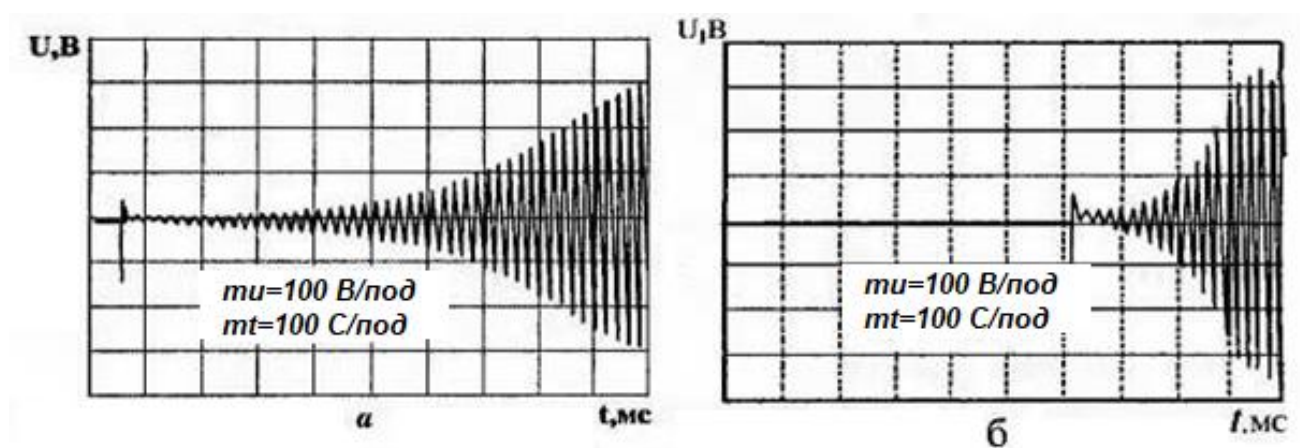


Рисунок 2.13 – Осцилограми процесу самозбудження автономного АГ

Процес самозбудження як явище параметричного резонансу. Процес самозбудження може виникати і за повної відсутності потоку залишкового

намагнічування $\Phi_{\text{ост}}$, коли, наприклад, ротор виготовлений з немагнітних матеріалів. Залишковий магнітний потік лише один з можливих факторів, які сприяють початку процесу самозбудження, а сам він відбувається за законами параметричного резонансу – явищем зростання струму в коливальній системі за відсутністю видимих джерел ЕРС та при періодичній зміні будь-якого із її параметрів.

Асинхронна машина з симетричним ротором і ємністю на виході являє собою контур R–L–C з взаємоіндуктивністю обмоток, що періодично змінюється, в якому можуть виникати електромагнітні коливання, що мають параметричну природу.

На рисунку 2.14 показано характер зміни індуктивності фази у часі, який може бути записаний у вигляді

$$L_3(t) = L(1 - m \cos 2\omega t), \quad (2.47)$$

де

$$L = L_1 - (L_1 - L_0)e^{-\pi/4\omega T_2}, \quad (2.48)$$

де $L_0 = \frac{x_1 + x'}{2\omega}$ – початкова середня індуктивність фази;

L – середня перехідна індуктивність;

m – перехідна модуляція,

$$m = \frac{m_0}{1 + \gamma(e^{-\pi/4\omega T_2} - 1)}, \quad (2.49)$$

де m_0 – максимальна глибина перехідної модуляції індуктивності;

$\gamma = 1,2 \dots 1,9$ – постійний коефіцієнт;

T_2 – постійна часу згасання перехідних струмів, що екранують;

$X' = X_{1s} + X'_{2s}$; $X_1 = X_{1s} + X_m$ – мінімальні та максимальні значення опорів.

У цьому контурі під дією зовнішніх механічних сил можуть виникнути коливання струму:

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi), \quad (2.50)$$

та активна потужність:

$$P = \frac{1}{T_p} \int_0^{T_p} i(t)[L_0(t) \cdot i(t)]dt \neq 0, \quad (2.51)$$

або

$$P = \frac{1}{4} m I_m^2 \omega L \sin 2\varphi. \quad (2.52)$$

Фазовий зсув

$$0 < \varphi < \frac{\pi}{2}, \quad (2.53)$$

визначає можливість електромагнітного перетворення енергії.

Умовою розвитку параметричних коливань та самозбудження АД виступає нерівність:

$$\frac{m I_m^2 \omega L}{4} \sin 2\varphi > \frac{I_m^2 R}{2} \sin 2\varphi, \quad (2.54)$$

яка може бути записана у вигляді:

$$m > \frac{2R}{\omega L} = 2k_1, \quad (2.55)$$

де $k_1 = R/\omega L$ – коефіцієнт втрат.

Ця нерівність визначає граничне ставлення подвоєного активного опору фази статора та ємності до середнього перехідного індуктивного опору цього контуру, при якому можливе порушення коливань основної частоти.

Ця умова з урахуванням співвідношень (5.53) і (5.54) може бути записана у вигляді двох нерівностей:

- при опорі ротора, що дорівнює нулю ($T_2 = \infty$):

$$m_0 > 2R/\omega L_0; \quad (2.56)$$

- при $T_2 \neq 0$:

$$m_0 > \frac{2R}{\omega L} \left[1 + \gamma (e^{\pi/4 \omega T_2} - 1) \right]. \quad (2.57)$$

З (2.57) визначається мінімальне значення T_2 , при якому загасання перехідної модуляції мало і виявляється достатнім для розвитку самозбудження:

$$T_2 > \left\{ 8f \ln \left[\frac{m_0 \omega L}{2\gamma R} + \frac{(\gamma-1)}{\gamma} \right] \right\}^{-1}, \quad (2.58)$$

де f – частота коливань;

L – перехідна індуктивність (2.48).

Якщо $m_0 > 0$, $R = 0$, то $T_2 > 0$, тобто за відсутності втрат у контурі самозбудження АД забезпечується за будь-яких співвідношень R і L контурів ротора по поздовжній осі. За наявності втрат (при $R \neq 0$) співвідношення R і L обмежується мінімально допустимою величиною T_2 .

Крім того, самозбудження АГ на основній частоті виникає в межах деякої області безрозмірних параметрів ω_{01}^2 . Межі ω_{01}^2 визначають граничні відношення частоти власних коливань до половини кутової частоти зміни його індуктивності або межі зміни параметрів (наприклад ємності), при яких можливе самозбудження. Для глибини модуляції (0,2 ... 0,25) доцільним є збільшення ємності при незмінній частоті обертання ротора n_p або зміна n_p при незмінній ємності.

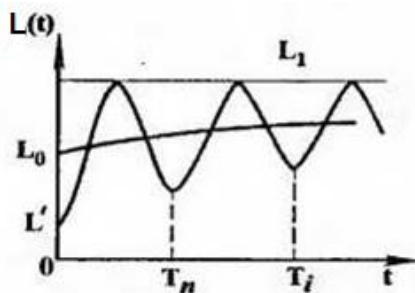


Рисунок 2.14 – Зміна індуктивності фази у часі: T_n – період зміни параметра; T_i – період зміни струму

2.5 Характеристики асинхронного генератора в автономному режимі

2.5.1 Робочі характеристики автономного АГ

Під робочими характеристиками АГ маються на увазі залежності струму, потужності, коефіцієнта потужності та ККД від основного параметра навантаження – ковзання. Загалом ці характеристики для АГ, працюючого паралельно з мережею, показані на рисунку 2.15.

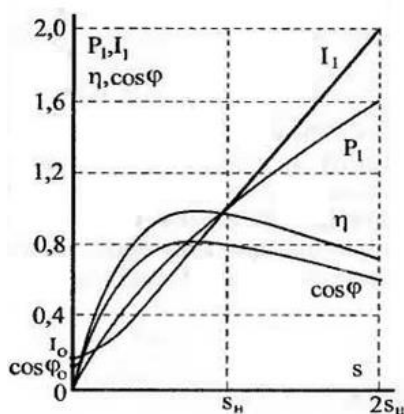


Рисунок 2.15 – Теоретичні робочі характеристики асинхронного генератора

Залежність $\eta = f(S)$ типова; як і для інших електричних машин ККД досягає максимального значення при ковзанні, близькому до номінального, а потім зменшується. Коефіцієнт потужності при холостому ході становить 0,1...0,2 і більше (для багатополюсних машин), досягає найбільшого значення 0,7...0,8 при навантаженнях, близьких до номінального, а потім знижується. Величина струму статора при холостому ході також значною мірою залежить від потужності та полюсності АГ, а при збільшенні ковзання безперервно збільшується аж до $S_{кр}$, як було показано раніше на рисунку 2.7. Характер зміни потужності, що віддається АГ у мережу, визначається співвідношенням втрат.

Для автономна працюючого асинхронного генератора як джерела електричної енергії головне значення мають зовнішня характеристика – залежність напруги U на виході генератора від корисної потужності P_2 (або від струму навантаження $I_{нав}$) при незмінних частоті f_1 , швидкості обертання n_2 , коефіцієнті потужності навантаження $\cos \varphi_n$ і ємності C – та регульовальна, тобто. залежність струму конденсатора I_c (або величини ємності) від струму навантаження $I_{нав}$ при незмінних U , f , $\cos \varphi_n$, та n_2 .

Автономна робота АГ можлива у чотирьох режимах:

- при постійної швидкості обертання ($n_2 = const, f_1 = var$);
- при стабільній частоті за рахунок регулювання швидкості ($f_1 = const, n_2 = var$);
- при змінній n_2 та стабілізації частоти f_1 за допомогою регулювання АГ;
- при змінних значеннях швидкості n_2 та частоти f_1 .

Частота ЕРС і струму АГ при холостому ході визначається частотою обертання ротора $n_2 \approx n_1$, тобто $f_1 = \frac{pn_1}{60} = \frac{pn_2}{60}$. При навантаженні АГ і при незмінному значенні n_2 частота обертання магнітного поля $n_1 = n_2/(1 - s)$ зменшується, тому що в генераторному режимі ковзання $s < 0$. Таким чином, зміна частоти f_1 при переході АГ від холостого ходу до режиму навантаження визначається зміною ковзання та враховується при розрахунку індуктивних та ємнісних опорів схеми заміщення, які залежать від частоти. Так, величина ємності, необхідної для компенсації реактивної потужності АГ та навантаження, обернено пропорційна частоті, тому що $x_c = 1/\omega C = 1/2\pi f_1 C$.

У роботі [4] наведено основні співвідношення, що дозволяють розрахувати робочі характеристики АГ при різних режимах роботи, складені на підставі балансу активних та реактивних потужностей.

Характеристики автономного асинхронного генератора можуть бути отримані на підставі модифікованої схеми заміщення (рис.2.16) за співвідношеннями, які найбільш доступною формою викладені в роботі [4].

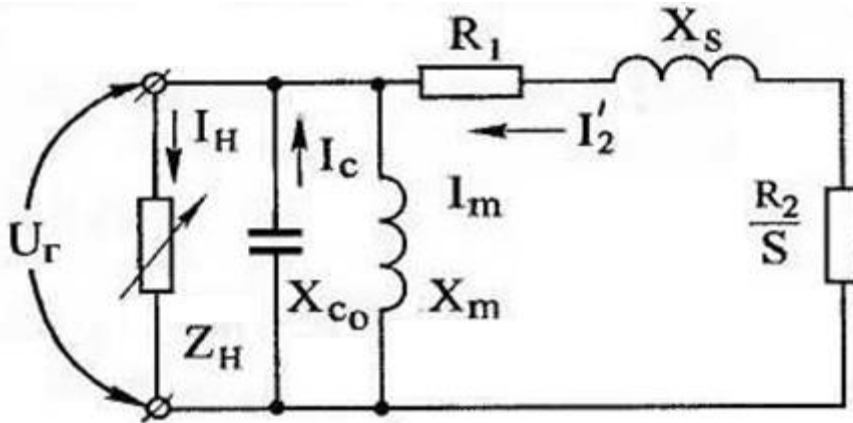


Рисунок 2.16 – Модифікована схема заміщення автономного АГ

У схемі зазначено:

$$R_1 = r_1 c_1; \quad R_2 = r_2' c_1^2;$$

$$X_s = x_1 c_1 + x_2' c_1^2; \quad X_m = x_1 + x_0; \quad X_c = 1/\omega_1 C_0; \quad c_1 \approx 1 + x_1/x_0;$$

$$Z_H = r_H + jx_H; \quad \operatorname{tg} \varphi_H = x_H/r_H; \quad \cos \varphi_H = r_H/Z_H.$$

Параметри r_1 , x_1 , r_2' , x_2' і кутова частота $\omega_1=2\pi f_1$ для встановленого номінального режиму приймаються постійними, ємність збудження для початкового збудження має цілком певне значення. Опір вітки намагнічування X_m , що визначає величину струму I_m , суттєво нелінійне і знаходиться за результатами розрахунку магнітного ланцюга та побудови характеристики намагнічування $\Phi = f(F_{ml})$ (в іншому масштабі $U_G = f(I_m)$) або з досвіду холостого ходу.

Початкова напруга U_{G0} на затискачах АГ при холостому ході визначається перетином характеристики намагнічування та вольт-амперної характеристики ланцюга збудження $U_c = I_c X_c$, що було показано раніше на рисунку 2.12.

При роботі АГ на активно-індуктивне навантаження перша умова стійкості визначається балансом реактивних потужностей джерела (Q_s – конденсаторної батареї), АГ (Q_m – вітки намагнічування та Q_s – розсіювання) та навантаження Q_H тобто:

$$Q_c = Q_m + Q_s + Q_H, \quad (2.59)$$

або

$$\frac{U_\Gamma^2}{X_c} = \frac{U_\Gamma^2}{X_m} + \frac{U_\Gamma^2}{Z_2^2(s)} X_s + \frac{U_\Gamma^2}{Z_H^2} X_H, \quad (2.60)$$

де

$$Z_2^2(s) = \left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_s^2, \quad Z_H^2 = R_H^2 + X_H^2.$$

Рівняння (2.60) можна також записати як:

$$I_c U_\Gamma = I_m U_\Gamma + (I_2')^2 X_s + I_H^2 X_H.$$

Помноживши обидві частини рівняння (2.60) на U_Γ^2 і врахувавши, що $\sin \varphi = X/Z$ його можна переписати у вигляді:

$$\frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_m} = \frac{1}{Z_2(s)} \sin \varphi + \frac{1}{Z_H} \sin \varphi, \quad (2.61)$$

і таким чином отримати певний зв'язок між параметрами навантаження, генератора та конденсаторної батареї.

Ліва частина (2.61) являє собою результуючу реактивну провідність гілок з опорами X_c та X_m , з'єднаних паралельно:

$$B_{mc} = \frac{1}{X_c} - \frac{1}{X_m} = \frac{I_c - I_m}{U_\Gamma}. \quad (2.62)$$

Ця величина також нелінійна і для кожного значення U_Γ може бути визначена різницею струмів, взятих з кривих $I_m = f(U_\Gamma)$ та $I_c = f(U_\Gamma)$. Усі ці криві показані на рисунку 2.17.

Права частина (2.61) – це сума реактивних провідностей робочого ланцюга АГ:

$$b_2 = \frac{\sin \varphi_2}{Z_2(s)} = \frac{X_s}{\left(R_1 + \frac{R_2}{s} \right)^2 + X_s^2} \quad (2.63)$$

і навантаження

$$b_H = \frac{\sin \varphi_2}{Z_H} = \frac{X_H}{R_H^2 + X_H^2}. \quad (2.64)$$

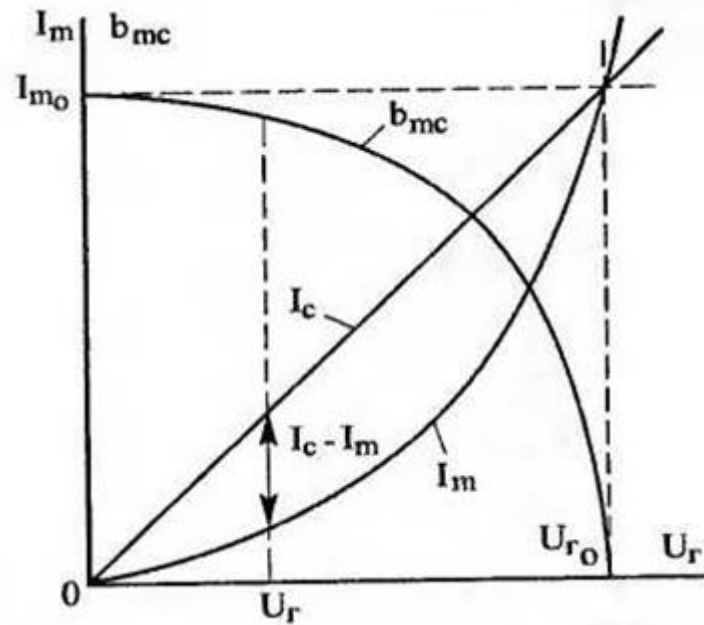


Рисунок 2.17 – До розрахунку робочих характеристик автономного АГ

Таким чином, рівняння може бути записано у вигляді:

$$b_{мл} = b_2 + b_H . \quad (2.65)$$

Рівняння балансу активних потужностей має вигляд:

$$P_{ем} - \Delta P_{м1} = P_H , \quad (2.66)$$

або

$$(I'_2)^2 \frac{R_2}{s} - (I'_2)^2 R_1 = I_H^2 R_H . \quad (2.67)$$

Рівняння легко перетворюється на вигляд:

$$\frac{1}{Z_2^2(s)} \left(\frac{R_2}{s} - R_1 \right) = \frac{1}{Z_H^2} R_H , \quad (2.68)$$

звідки

$$Z_H = Z_2(s) \sqrt{\frac{R_H}{\frac{R_2}{s} - R_1}} , \quad (2.69)$$

або

$$Z_H = Z_2^2(s) \frac{\cos \varphi_H}{\frac{R_2}{s} - R_1} . \quad (2.70)$$

Підставляючи значення Z_H в рівняння (2.63); (2.64) і далі в (2.65) визначають залежність:

$$b_{mc} = \frac{1}{Z_2^2(s)} \left[X_s + \left(\frac{R_2}{s} - R_1 \right) \operatorname{tg} \varphi_2 \right] . \quad (2.71)$$

Далі за значенням розрахованим для певного ковзання s по кривим (рис. 2.17) знаходять напругу U_{Γ} даного та характеристики даного режиму АГ для заданої ємності збудження та певного активно-індуктивного навантаження.

У роботі [4] наведено алгоритм розрахунку характеристик АГ, який при відомій характеристиці намагнічування магнітного ланцюга та параметрах схеми заміщення зводиться до наступної послідовності:

1. Задається довільне ковзання s .
2. Визначається попереднє значення поправного коефіцієнта

$$C_{10} \approx 1 + \frac{X_1}{X_{m0}}, \text{ де } X_{m0} = \frac{U_{\Gamma 0}}{I_0}.$$

3. Розраховуються опір та опір робочої вітки $Z_2(s)$.
4. По (2.71) знаходиться величина b_{mc} .
5. За кривою $b_{mc} = f(U_{\Gamma})$ (рис. 2.17) визначається величина напруги U_{Γ} .
6. Уточнюється значення: $X_m = \frac{U_{\Gamma}}{I_m}$.

Якщо виконується заздалегідь задана умова $(X_{m0} - X_m)/X_m \leq \varepsilon$, то розрахунок продовжується, якщо ні, то розрахунок повторюється від п. 2 до виконання зазначеної умови.

7. За співвідношенням (2.69) визначається опір навантаження, що відповідає розрахованому значенню $Z_2(s)$ та заданому $\cos \varphi_H$.

8. Розраховуються параметри робочого режиму АГ, що відповідають ковзанню s :

$$\text{Струм навантаження: } I_H = \frac{U_{\Gamma}}{Z_H}, \quad I_{Ha} = I_H \cos \varphi_H, \quad I_{Hp} = I_H \sin \varphi_H.$$

$$\text{Струм збудження: } I_c = \frac{U_{\Gamma}}{X_c}.$$

$$\text{Загальний струм АГ: } I_{\Gamma} = \sqrt{I_{Ha}^2 + (I_c - I_{Hp})^2}.$$

$$\text{Корисна потужність АГ: } P_2 = 3I_r^2 R_H = 3U_H I_{\Gamma} \cos \varphi_H.$$

$$\text{Втрати: } \sum \Delta P = \Delta P_{m1} + \Delta P_{m2} + \Delta P_{ст} + \Delta P_{доб} + \Delta P_{мех}.$$

$$\text{Потужність, що підводиться до АГ: } P_1 = P_2 + \sum \Delta P.$$

$$\text{ККД: } \eta = \frac{P_2}{P_1} 100\%.$$

9. Даний розрахунок повторюється для інших ковзань, і за результатами розрахунку будуються робочі характеристики I , Q , s , η і $\cos \varphi_{\Gamma} = f(P_2)$ та зовнішня характеристика АГ $U_{\Gamma} = f(I_H)$.

Наприклад на рисунку 2.18 ці характеристики побудовані для АГ потужністю 40 кВт з масивним ротором при $\cos \varphi_H = 1$ та для різного ступеня насичення магнітного ланцюга ($1 - \kappa_{\mu} = 2$; $2 - \kappa_{\mu} = 3$; $3 - \kappa_{\mu} = 4$) [88].

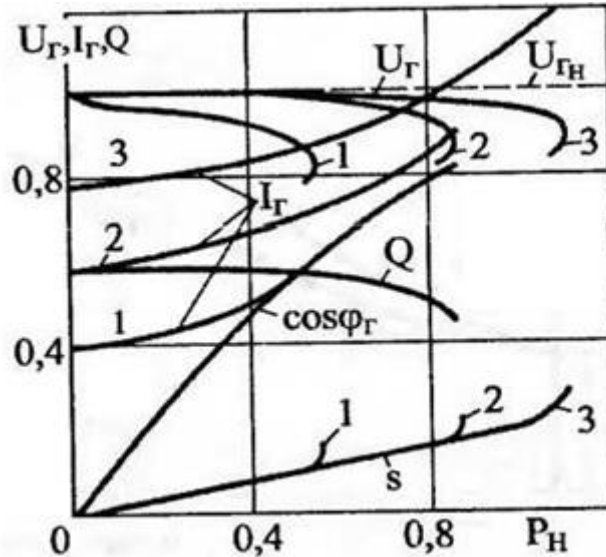


Рисунок 2.18 – Характеристики асинхронного генератора потужністю 40кВт з масивним ротором при різному ступені насичення магнітного ланцюга

У роботі [4] сформульовані також дуже важливі висновки щодо якості автономної роботи АГ:

1. Стабільність напруги АГ та достатня перевантажувальна здатність забезпечуються:

- при значному насиченні магнітного ланцюга АГ ($\kappa_{\mu} = 2,8 \dots 4,0$),
- при мінімальних параметрах розсіювання та активних опорах обмоток:

$$X_1^* \approx X_2'^* \leq (0,08 - 0,1);$$

$$r_1^* \approx r_2'^* \leq (0,01 - 0,03);$$

- при високому значенні $\cos \varphi_H$, близькому до одиниці.

2. Підвищене насичення магнітного ланцюга має бути забезпечене за рахунок зубців та ярма ротора за мінімального насичення статора.

3. Необхідний рівень насичення може бути отриманий в АГ при $2p \leq 4$. При $2p > 4$ гранично можливе насичення магнітного ланцюга $k_{\mu} \leq 2,8$ і має місце зниження перевантажувальної здатності, а номінальна потужність АГ зменшується.

4. Більш висока стабільність напруги і перевантажувальна здатність досягаються при роботі АГ з ємнісним збудженням на напівпровідниковий випрямляч.

Наведені вище співвідношення можуть бути використані і для розрахунку характеристик автономного АГ при включенні послідовно з навантаженням компаундуєної ємності C_k [4]. В цьому випадку в рівнянні балансу реактивної потужності (5.66) необхідно врахувати потужність Q_{Ck} , а співвідношення (2.65) записується у вигляді:

$$b_{mc} = \frac{X_s}{Z_2^2(s)} + \frac{X_H - X_{Ck}}{Z_{H\Sigma}^2}, \quad (2.72)$$

де

$$Z_{H\Sigma}^2 = R_H^2 + (X_H - X_{Ck})^2.$$

Рівняння балансу активних потужностей набуває вигляду:

$$\frac{U_{\Gamma}^2}{Z_2^2(s)} \left(\frac{R_2}{s} - R_1 \right) = \frac{U_{\Gamma}^2}{Z_{H\Sigma}^2} R_H. \quad (2.73)$$

Залежність активного опору навантаження R_H від параметрів робочого ланцюга, ковзання та величини C_k виходить у вигляді

$$R_H = \left(X_{Ck} \operatorname{tg} \varphi_H + \frac{1}{2G_2} \right) \cos^2 \varphi_H + \sqrt{\left(X_{Ck} \operatorname{tg} \varphi_H + \frac{1}{2G_2} \right) \cos^4 \varphi_H - X_{Ck} \cos^2 \varphi_H} \quad (2.74)$$

де

$$G_2 = \frac{R_s}{R_s^2 + X_s^2}, \quad R_s = \frac{R_2}{s} - R_1$$

Головне призначення послідовно включеної компаундуєної ємності – стабілізація напруги АГ зі збільшенням навантаження. Для повної стабілізації необхідно, щоб виконувалось співвідношення:

$$X_{CK} \approx X_S + X_H \quad \text{або} \quad X_{CK} \approx X_S + Z_H \sin \varphi \quad (2.75)$$

В АГ з короткозамкненим ротором опір X_S при зміні ковзання залишається майже постійним, тому справедлива рівність:

$$X_{CK} \approx Z_H \sin \varphi . \quad (2.76)$$

Збільшення навантаження еквівалентно зменшенню опору Z_H і, відповідно, зменшенню X_H , отже, величина компаундуєчої ємності, що дорівнює $C_K = 1/\omega X_{CK}$, повинна збільшуватися пропорційно величині навантаження.

Якщо $\cos \varphi_H = 1$, то для стабілізації напруги АГ величину X_{CK} вибирають з міркувань отримання номінальної напруги U_H при номінальному навантаженні, а дефіцит реактивної потужності АГ при малих навантаженнях, обумовлений можливим зменшенням параметра X_S , може бути компенсований вибором величини коефіцієнта насичення K_μ , який для цих умов становить $K_{\mu \text{ опт}} = 1,3 \dots 2,0$. Ця величина, однак, має бути розрахована для проектного генератора з урахуванням конкретних початкових умов – типу АГ, потужності, полюсності, характеру навантаження, діапазону зміни ковзання та інших факторів.

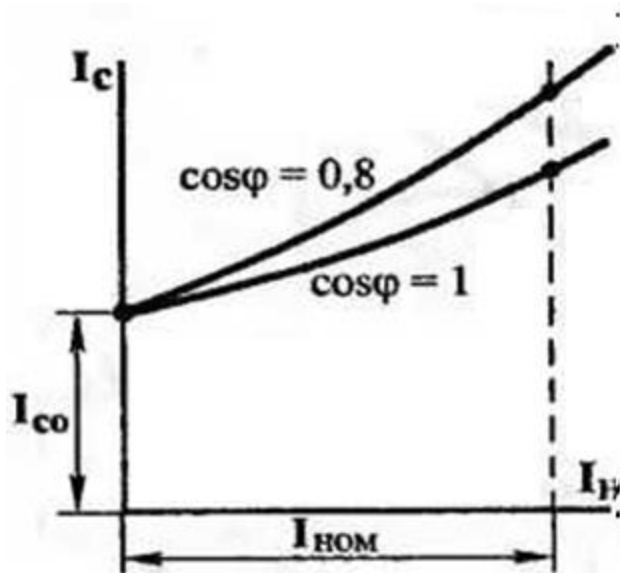


Рисунок 2.19 – Теоретична регульовальна характеристика асинхронного генератора

Регулююча характеристика визначає можливості стабілізації напруги при зміні величини та характеру навантаження. Регулювальна характеристика АГ в загальному вигляді при такому способі регулювання при різних $\cos \varphi_H$ показана на рисунку 2.19.

2.5.2 Енергетична діаграма, втрати та ККД асинхронного генератора

Процес перетворення механічної енергії в електричну, як і будь-який процес перетворення одного виду енергії в інший, супроводжується *втратами*, які перетворюючись в тепло, нагрівають активні частини машини. Енергетична діаграма (рис. 2.20) показує, як протікає процес перетворення механічної потужності в асинхронному генераторі, та які втрати мають місце при цьому. Процес перетворення енергії на АГ здійснюється у такому порядку.

Повна механічна потужність P_1 підводиться з валу від приводного генератору і перетворюється на корисну активну потужність P_2 , що віддається в мережу і визначається (2.34).

Потужність P_1 пов'язана з крутним моментом $M_{вр}$ приводного генератору співвідношенням:

$$P_1 = M_{вр} \cdot \Omega = M_{вр} \frac{2\pi n}{60}, \quad (2.77)$$

де $M_{вр}$ вимірюється в Н·м.

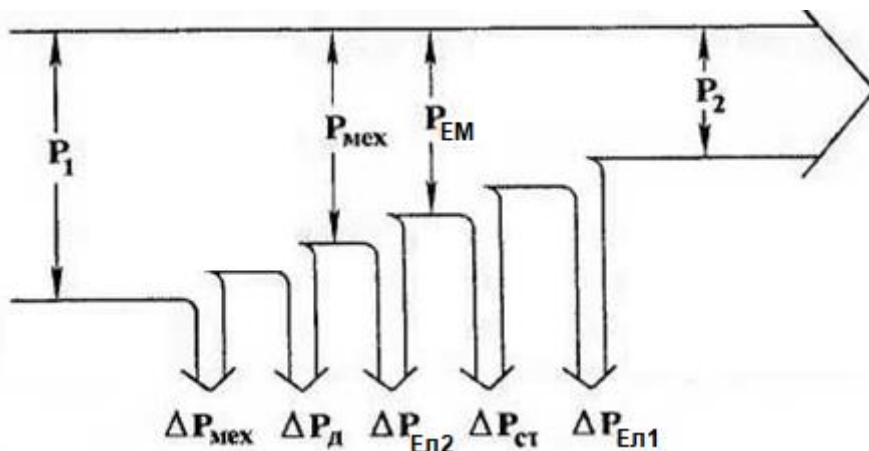


Рисунок 2.20 – Енергетична діаграма АГ

Частина потужності P_1 втрачається на валу, покриваючи механічні втрати $\Delta P_{\text{мех}}$ (на вентиляцію, на тертя в підшипниках і т.д.) і додаткові втрати ΔP_d , які обумовлені насамперед дією вищих гармонік магнітного поля, що виникають через наявність вищих гармонік МРС обмоток і зубчастої будови статора і ротора. З одного боку, ці гармоніки створюють паразитні гальмівні моменти на валу, з іншого – індукують ЕРС та струми в обмотках і створюють додаткові електричні втрати, особливо помітні за величиною у короткозамкнених обмотках ротора.

Механічні втрати в АМ з короткозамкненим ротором та вентиляційними лопатками визначаються так:

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx K_T \left(\frac{n}{1000} \right)^2 (10D_i)^3, \quad (2.78)$$

де $K_T = 5$ при $2p = 2$; $K_T = 6$ при $2p \geq 4$ – для АМ с $Da \leq 0,25\text{м}$;

$K_T = 6$ при $2p = 2$, $K_T = 7$ при $2p \geq 4$ – для АМ с $Da \geq 0,25\text{м}$.

В АМ с зовнішнім обдуванням ($0,1 \leq Da \leq 0,5\text{м}$):

$$\Delta P_{\text{мех}} \approx K_T \left(\frac{n}{10} \right)^2 Da^4 \quad (2.79)$$

де $K_T = 1$ при $2p = 2$; $K_T = 1,3 \cdot (1-D)$ при $2p \geq 4$.

Додаткові втрати виникають за рахунок дії потоків розсіювання, пульсації індукції в повітряному зазорі, ступінчастості кривої розподілу МРС обмоток статора і ротора та інших причин. У короткозамкнених роторах, що особливо мають скіс пазів, виникають додаткові втрати від поперечних струмів, що замикаються між стрижнями. Ці втрати важко піддаються розрахунку і часто приймають рівними $\Delta P_d \approx 0,05 P_1$ при номінальному навантаженні. За інших навантажень їх перераховують пропорційно квадрату струму. Фактично ці втрати більше і в сучасних високонавантажених машинах можуть досягати 2...2,5 % від P_n .

Механічна потужність $P_{\text{мех}}$, що дорівнює $P_{\text{мех}} = P_1 - \Delta P_{\text{мех}} - \Delta P_d$, за вирахуванням електричних втрат у роторі (втрат у міді ротора):

$$\Delta P_{M2} = m(I_2')^2 R_2', \quad (2.80)$$

перетворюється на електромагнітну потужність $P_{\text{ем}}$, що визначається по (2.21).

Втрати в сталі поділяються на основні та додаткові – поверхневі та пульсаційні. Основні втрати сталі статора АМ розраховуються за формулою:

$$\Delta P_{\text{ст осн}} = P_{1,0/50} \left(\frac{f_1}{50} \right)^\beta (K_a B_a^2 m_a + K_z B_{zcp}^2 m_{z1}) \quad (2.81)$$

де $\beta = 1 \dots 1,5$ залежно від марки сталі,

$K_a \approx 1,6$; $K_z \approx 1,8$ – коефіцієнти, що враховують нерівномірність розподілу магнітної індукції за перерізом магнітопроводу;

m_a і m_{z1} – маси ярма статора та зубців;

$P_{1,0/50}$ – питомі втрати сталі при індукції 1Тл і частоті 50 Гц;

B_a і B_{zcp} – магнітна індукція у ярмі та середня індукція у зубцях.

Поверхневі втрати в статорі та роторі:

$$\Delta P_{\text{пов1}} = P_{\text{пов1}} (t_1 - b_{ш1}) l_{\text{ст1}} \quad (2.82)$$

$$\Delta P_{\text{пов2}} = P_{\text{пов2}} (t_2 - b_{ш2}) l_{\text{ст2}} \quad (2.83)$$

де $P_{\text{пов1}}$, $P_{\text{пов2}}$ – питомі поверхневі втрати, що припадають на 1 м² поверхні головок зубців статора та ротора:

$$P_{\text{пов1}} = 0,5 K_{01} \left(\frac{z_2 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{01} t_2 \cdot 10^3)^2, \quad (2.84)$$

$$P_{\text{пов2}} = 0,5 K_{02} \left(\frac{z_1 n}{10000} \right)^{1,5} (B_{02} t_1 \cdot 10^3)^2, \quad (2.85)$$

де B_{01} , B_{02} – амплітуда пульсації магнітної індукції у повітряному зазорі над коронками зубців статора та ротора:

$$B_{01(2)} = \beta_{01(2)} K_\delta B_\delta \quad (2.86)$$

$\beta_{01(2)}$ – залежно від відношення (b_u / δ); $\beta_{01(2)} = 0,1 \dots 0,4$;

K_δ – коефіцієнт Картера;

B_δ – магнітна індукція у повітряному зазорі;

K_{01} , K_{02} – коефіцієнти, що враховують вплив обробки поверхонь головок зубців; $K_{01} = 1,4 \dots 1,8$; $K_{02} = 1,7 \dots 2,0$;

$t_{1(2)}$, b_u , $l_{cm1(2)}$ – зубцевий поділ, відкриття паза та активна довжина сердечника;

$n_2 = n_1(1 + s)$ – частота обертання ротора АГ.

Пульсаційні втрати у зубцях:

$$\Delta P_{\text{пул1}} \approx 0,11 \left(\frac{Z_2 n_2}{1000} B_{\text{пул1}} \right)^2 m_{z1}, \quad (2.87)$$

$$\Delta P_{\text{пул2}} \approx 0,11 \left(\frac{Z_1 n_2}{1000} B_{\text{пул2}} \right)^2 m_{z2}, \quad (2.88)$$

де

$$B_{\text{пул1}} \approx \frac{\gamma_2 \delta}{2t_1} B Z_{1\text{cp}}, \quad (2.89)$$

$$B_{\text{пул2}} \approx \frac{\gamma_1 \delta}{2t_2} B Z_{2\text{cp}}, \quad (2.90)$$

$$\gamma_{1(2)} = \frac{(b_{\text{ш1(2)}}/\delta)^2}{5 + b_{\text{ш1(2)}}/\delta}. \quad (2.91)$$

Таким чином, загальні втрати в сталі:

$$\Delta P_{\text{ст}} = \Delta P_{\text{стосн}} + \Delta P_{\text{пов1}} + \Delta P_{\text{пов2}} + \Delta P_{\text{пул1}} + \Delta P_{\text{пул2}}. \quad (2.92)$$

При практичних розрахунках можна прийняти:

$$\Delta P_{\text{ст}} \approx (1,1 \dots 1,2) \Delta P_{\text{стосн}}. \quad (2.93)$$

Електричні втрати в обмотці ротора:

$$\Delta P_{e2} = m_2 I_2^2 R_2 = m_1 I_2'^2 R_2'. \quad (2.94)$$

Як впливає із співвідношення (2.21):

$$P_{\text{ем}} = \frac{\Delta P_{e1}}{s}. \quad (2.95)$$

Електричні втрати в обмотці статора

$$\Delta P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1. \quad (2.96)$$

Решта від $P_{\text{ем}}$, являє собою корисну потужність P_2 , що віддається генератором в мережу.

Таким чином, потужність, яку необхідно підводити до валу АГ та його ККД:

$$P_1 = P_2 + \sum \Delta P \quad (2.97)$$

$$\eta = \left(1 - \frac{\sum \Delta P}{P_1} \right) 100\% \quad (2.98)$$

Величина ККД АГ, як і в асинхронних генераторах, залежить від потужності та числа полюсів і може перебувати в межах 50...85%.

2.6 Регулювання частоти та напруги автономного АГ

2.6.1 Загальні проблеми регулювання АГ

При оцінці загальних показників автономного АГ необхідно враховувати крім розглянутої вище суттєвої зміни напруги такі експлуатаційні фактори, як зміна частоти напруги, що генерується. Частота напруги змінюється зі зміною навантаження і ковзання, якщо частота обертання ротора підтримується постійною, а також з коливаннями вихідної напруги U , що з'являються внаслідок електричної та магнітної несиметрії ротора. Пульсації вихідної напруги U , обумовлені електричною несиметрією, зростають при збільшенні навантаження і можуть бути зведені до мінімуму при якісному zalиванні короткозамкнутої клітини і вибракування роторів з дефектами обмотки.

Магнітна несиметрія, 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, коливань вихідної напруги. Усунення овальності та віялове збирання пакету ротора практично повністю виключають цю причину коливань напруги.

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

Значення реактивної потужності, що витрачається на створення магнітного поля АГ з магнітною індукцією в зазорі B_m , визначається із співвідношення:

$$Q = \omega_1 W_M V_\delta = \frac{\pi f}{\mu_0} B_m^2 V_\delta, \quad (2.99)$$

де $W_M = \frac{1}{2\mu_0} B_m^2$ – питома енергія магнітного поля;

V_δ – повний об'єм повітряного зазору.

З іншого боку, величина реактивної потужності конденсаторної батареї:

$$Q_c = m\omega_1 C_k U_c^2 \quad (2.100)$$

може регулюватися або зміною ємності конденсаторів C_k , або величиною напруги U_c .

На сьогодні для практичного застосування використовують конденсатори типу К-71 з покращеними масогабаритними показниками, що мають питому масу $0,3 \dots 0,6$ кг/кВА. Якщо врахувати, що $\cos\varphi$ автономного АГ малої та середньої потужності не перевищує $0,7 \dots 0,75$, то на 1 кВт його активної потужності може припадати приблизно 1 кВА реактивної потужності конденсаторної батареї. Однак величина необхідної ємності залежить також від частоти генератора f_1 , тобто від швидкості обертання ротора n_2 . На рисунку 2.21 наведено залежності ємності C від відносної частоти обертання $n_2/n_{ном}$ за підтримки незмінної напруги АГ потужністю 4,5 кВт при роботі в режимі холостого ходу. Як бачимо, підбір необхідної ємності довелося виконувати виходячи із співвідношень:

$$C \approx C_{ном} (n_{2ном}/n_2)^2 \quad \text{при } n_2 > n_{2ном}, \quad (2.101)$$

$$C \approx C_{ном} (n_{2ном}/n_2)^4 \quad \text{при } n_2 < n_{2ном}. \quad (2.102)$$

З цих співвідношень слідує, що при значеннях швидкості обертання ротора $n_2 < 0,9n_{2ном}$ необхідна ємність швидко зростає і генератор майже повністю завантажується реактивним струмом.

2.6.2 Стабілізація напруги та частоти АГ

Стабілізувати вихідну напругу АД 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 (варикондів),
- зміною напруги на конденсаторах;
- підмагнічуванням сердечника статора.

При цьому у всіх випадках або за рахунок зміни кута нахилу вольтамперної характеристики ланцюга збудження $I_c X_c$, або за рахунок зміни насичення магнітного ланцюга змінюється положення точки А на рисунку 2.12, тобто. регулюється напруга холостого ходу, а отже і робоча напруга АГ.

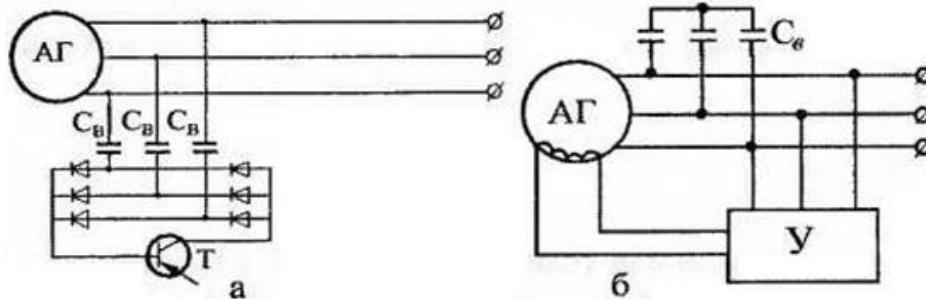


Рисунок 2.21 – Схема автоматичного регулювання АГ з керованим силовим транзистором (а) та з підмагнічуванням ярма статора (б)

Найбільш складно стабілізувати напругу АГ при змінній частоті обертання ротора та зміні навантаження, коли одночасно змінюється і величина, і частота вихідної напруги.

Нижче наведено окремі приклади можливих схем стабілізації напруги та частоти АГ.

Досить ефективними для цієї мети можуть бути названі два типи схем автоматичного регулювання АГ з короткозамкненим ротором [8].

На рисунку 2.21, а показана схема, при якій реактивна потужність АГ регулюється зміною ємності конденсаторної батареї за допомогою силового транзистора, що працює або в режимі безперервного регулювання, або в імпульсному режимі. Потужність конденсаторної батареї повинна бути достатньою для компенсації реактивної складової навантаження.

На рисунку 2.21, б наведена схема стабілізації з підмагнічуванням ярма статора АГ. Необхідний діапазон зміни опору X_0 контуру, що намагнічує, визначається з регулювальної характеристики, при цьому для ефективної стабілізації напруги при зміні навантаження в межах $0,5 \dots 1,25 P_{ном}$ необхідно

використовувати 25...30 % площі паза, що повинно бути передбачено під час проектування.

Потрібно зазначити, що це не призводить до суттєвого збільшення габаритів АГ, проте супроводжується спотворенням кривої поля в повітряному зазорі та відповідними спотвореннями у кривій напругі навіть при синусоїдальному розподілу МРС.

У роботі [8] запропоновано схему автоматичного регулювання напруги та частоти АГ на варикондах, яка працює так (рис. 2.22) .

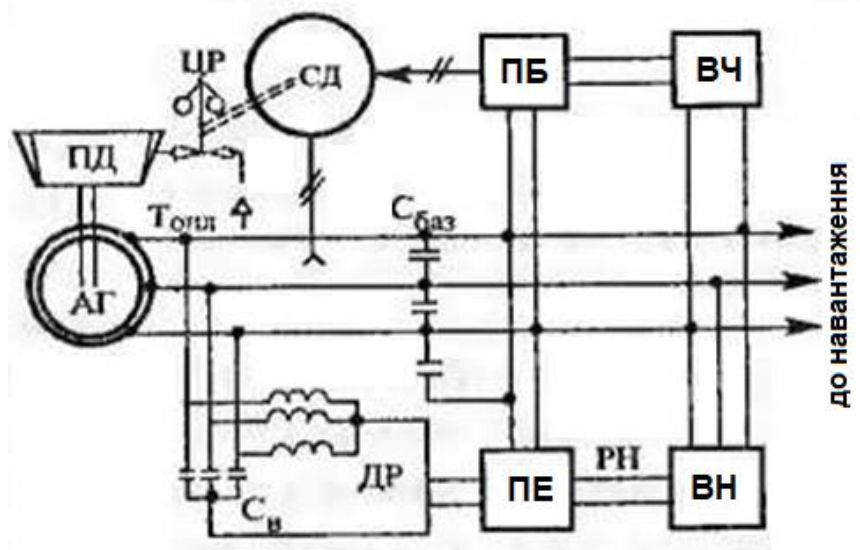


Рисунок 2.22 – Схема автоматичного регулювання АГ на варикондах

Вимірювачі частоти та напруги ВЧ та ВН фіксують відхилення цих параметрів від номінальних значень і формують сигнали на підсилювачі ПЕ та ПБ, які потім випрямляються і після перетворення подаються на вариконди. Вариконди в залежності від величини керуючого сигналу збільшують або зменшують ємнісний струм збудження, стабілізуючи напругу на виході АГ. На виході каналу частоти ВЧ – ПБ встановлений серводвигун СД, частота обертання якого змінюється та впливає на регулятор обертів приводного генератору ПД.

На рисунку 2.23 наведено схему регулювання, побудовану на застосуванні безконтактних тиристорних ключів БТК, керованих обчислювальним елементом і підключаючи окремі секції батареї конденсаторів С₁, С₂ ... С_n залежно від зміни напруги АГ.

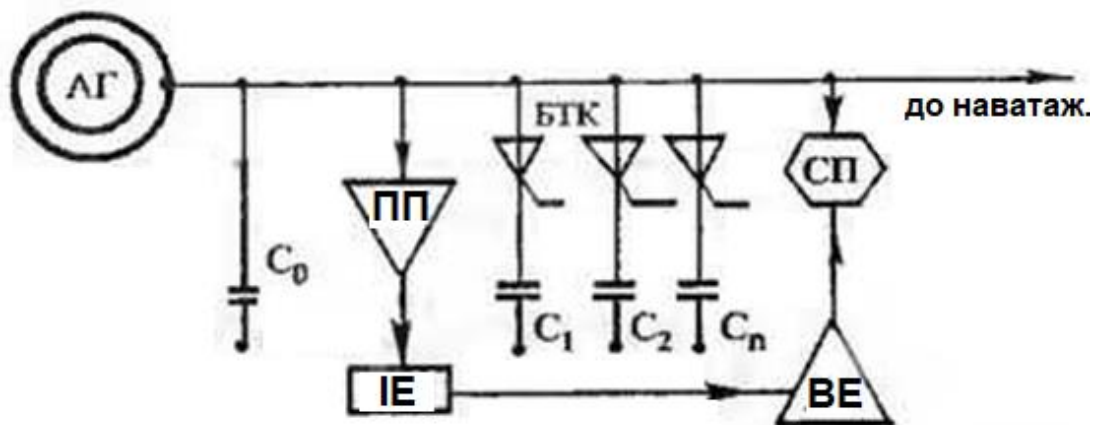


Рисунок 2.23 – Схема автоматичного регулювання АГ із використанням безконтактних тиристорних ключів

Обчислювальний комплекс включає в себе підсумовуючий процесор ПП, що формує сигнал відхилення напруги, імпульсний елемент ІЕ, який перетворює цей сигнал в імпульсний і передає на обчислювальний елемент ОЕ, що підсумовує імпульси з урахуванням знака відхилення і забезпечує певний закон регулювання напруги. Перетворений таким чином сигнал надходить на ступінчастий перетворювач і далі на БТК, кожен з яких зібраний на одному симетричному тиристорі.

Застосування варикондів у системах регулювання АГ приваблює ще однією чудовою властивістю – високим опором постійному струму, що дозволяє керувати їх ємністю з мізерно малою величиною потужності каналу управління. Така схема (рис. 2.24) регулювання варикондів постійною напругою, пропорційною ΔU – різниці заданої та фактичної напруги АГ у припущенні, що навантаження АГ залишається незмінним, а частота його обертання змінюється.

Датчик частоти обертання індукційного типу (1) формує високочастотний сигнал (60 кГц) з частотою зривів, пропорційно частоті обертання АГ. У перетворювачі (2) сигнал прямокутної форми перетворюється на імпульси зі строго певною тривалістю і в залежності від часових параметрів цих імпульсів (пауз) змінюється середнє значення струму і, отже, напруга на вході та виході формувача (3) сигналу управління варикондами.

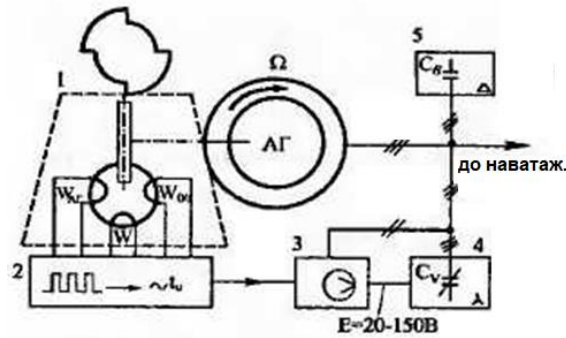


Рисунок 2.24 – Схема автоматичного регулювання АГ на варикондах с керуванням постійним струмом

Для стабілізації напруги дуже ефективним може бути використання трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації. На рисунку 2.25 наведено схему стабілізації, побудовану на зміні напруги на конденсаторах збудження .

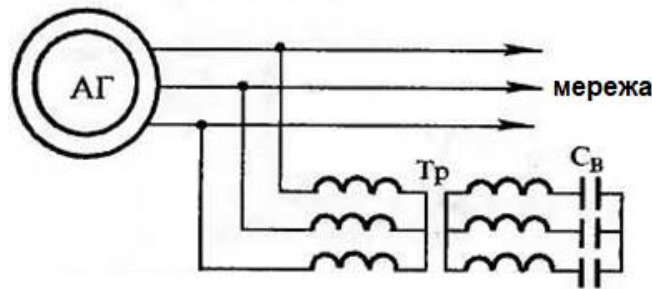


Рисунок 2.25 – Схема стабілізації напруги АГ з регульованим трансформатором

Якщо конденсатори збудження C_3 включати на підвищуючу обмотку трансформатора зі змінним коефіцієнтом трансформації, можна зменшити їх габарити і масу. При звичайній частоті (50 Гц) маса та габаритні розміри трансформатора виявляються дуже значними. Крім того, для компенсації реактивного струму трансформатора потрібні додатково ємності конденсаторів.

Стабілізувати вихідну напругу АГ можна також включенням насичувального реактора (L) (рис. 2.26).

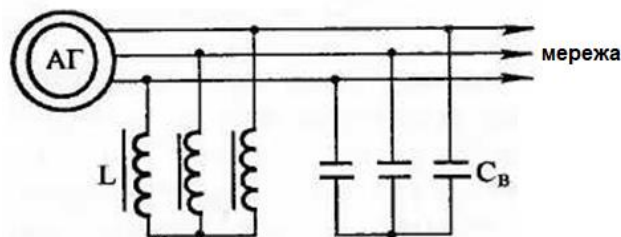


Рисунок 2.26 – Схема стабілізації напруги АГ з насичуваним реактором

При зменшенні напруги генератора, пов'язаного зі збільшенням навантаження, насичення реактора зменшується, а його індуктивність збільшується. Це призводить до зменшення індуктивного струму i , як наслідок, збільшення напруги реактора. Як і в попередній схемі, в даному випадку необхідно передбачати збільшення ємності конденсаторів.

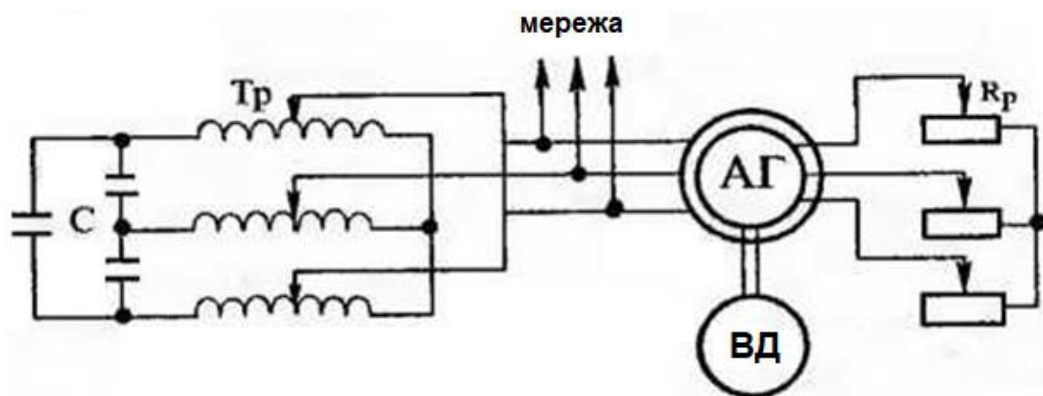


Рисунок 2.27 – Схема збудження АГ з фазним ротором

Як АГ можуть успішно застосовуватися асинхронні машини з фазним ротором [8]. При цьому можливі такі варіанти включення:

а) конденсатори збудження включаються на затискачі обмотки статора, паралельно навантаженню. Реостат через контактні кільця підключається до фазного ротора. Стабілізація частоти досягається одночасною зміною ємності конденсаторів та активного опору реостату;

б) конденсатори збудження включаються в ланцюг фазного ротора, а навантаження – в ланцюг статора. Стабілізація частоти здійснюється зміною ємності конденсаторів збудження;

в) конденсатори збудження включаються до ланцюга статора чи ротора через трансформатор чи автотрансформатор із змінним коефіцієнтом трансформації (рис. 2.27). Регулювання частоти забезпечується зміною коефіцієнта трансформації, при цьому конденсатори збудження включаються до вторинного ланцюга підвищуючого трансформатора, що значно зменшує необхідну ємність конденсаторів.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Основи вітроенергетики : підручник / Г. Півняк, Ф. Шкрабець, Н. Нойбергер, Д. Циценков ; М-во освіти і науки України, Нац. гірн. ун-т. – Дніпропетровськ : НГУ, 2015. – 335 с.
2. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Вид. Нац. університету «Львівська політехніка», 2001. – 428 с.
3. Бардик Є. І. Експлуатація та режими роботи електростанцій: нормальні, допустимі і аномальні режими синхронних генераторів / Є. І. Бардик. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 73 с.
4. Мазуренко Л. І. Асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням для автономних енергоустановок : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.09.01 – електричні машини і апарати / Мазуренко Л. І. – Київ, 2001. – 31 с.
5. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
6. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, О. Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
7. Дзензерський В. О. Вітроустановки малої потужності / В. О. Дзензерський, С. В. Тарасов, І. Ю. Костюков. – Київ : Наук. думка, 2011. – 592 с.
8. Плахтіна О. Г. Дослідження систем стабілізації напруги асинхронного генератора з самозбудженням та вибір їх раціонального варіанта / О. Г. Плахтіна, Б. Л. Копчак // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. – Вип. 84. – 2000. – 161–164 с.

Навчальне видання

ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,
ФОРКУН Яна Борисівна

СПЕЦІАЛЬНІ ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка,
освітня програма «Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії»)*

Відповідальний за випуск *М. Л. Глебова*
За авторською редакцією
Комп'ютерне верстання *М. Л. Глебова*

План 2022. поз.108Л

Підп. до друку 07.12.2022. Формат 60 × 84/16.
Електронне видання. Ум. друк. арк. 7,0

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.