

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

Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури

Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки

Пояснювальна записка

до дипломного проєкту (роботи)

бакалавра

на тему:

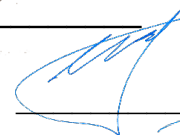
**«Використання асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі
генератора вітроустановки 320 кВт»**

Виконав: студент 4 курсу,
групи НВДЕ-2022
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка
(Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії)



Д.С. Гужва

Керівник



О.Б. Єгоров

Рецензент



М.Л. Глєбова

Харків - 2026

ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА

ННІ Енергетичної, інформаційної та транспортної інфраструктури

Кафедра Альтернативної електроенергетики та електротехніки

Освітньо-кваліфікаційний рівень Бакалавр

Спеціальність 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Освітня програма Нетрадиційні та відновлювальні джерела енергії

«ЗАТВЕРДЖУЮ»

завідувач кафедри АЕЕ



доц. **О.Б. Єгоров**

“ 15 ” 06 2026 року

З А В Д А Н Н Я

НА ДИПЛОМНИЙ ПРОЄКТ СТУДЕНТУ

Гужві Денису Сергійовичу

1. Тема проєкту: «Використання асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі генератора вітроустановки 320 кВт»

керівник проєкту Єгоров Олексій Борисович, к.т.н., доцент

затверджені наказом вищого навчального закладу 22.05. 2026 року № 440-03

2. Строк подання студентом проєкту 14 червня 2026 року.
3. Вихідні дані до проєкту (роботи): Дані режимів роботи генераторів, характеристики постійних магнітів, ДСТУ 2843-94, ДСТУ 3440-96 Системи енергетичні, Правила улаштування електроустановок, Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів.
4. Зміст розрахунково-пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Дослідження обмотки збудження асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в синхронному генераторному режимі, Аналіз роботи асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в режимі синхронного генератора, Синхронне самозбудження асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора, Асинхронне самозбудження асинхронного двигуна, Охорона праці.
5. Перелік графічного матеріалу (з точним зазначенням обов'язкових креслень):
1) Цілі та завдання проєктування.

2) Класифікація асинхронних генераторів

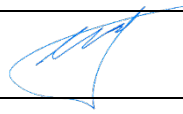
3) Методи стабілізації напруги

4) Схеми приєднання трифазної обмотки ротора до джерела постійного струму.

5) Максимально реалізована потужність генераторного режиму

6) Результати моделювання

6. Консультанти розділів проєкту

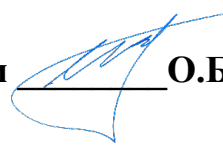
Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
Розрахункова частина	Єгоров О.Б., доц. каф. АЕЕ		
Охорона праці	Серіков Я.О., доц. каф. ОП та БЖД		

7. Дата видачі завдання 25 травня 2026 року

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів дипломного проєкту (роботи)	Строк виконання етапів проєкту (роботи)	Примітка
1	2	3	4
1	Дослідження обмотки збудження асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в синхронному генераторному режимі	25.05.2026-30.05. 2026	
2	Аналіз роботи асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в режимі синхронного генератора,	31.05.2026-05.06. 2026	
3	Розробка заходів з охорони праці	07.06.2026-10.06. 2026	
4	Підготовка та подання дипломного проєкту до захисту.	11.06. 2025-14.06. 2025	

Студент  Д.С. Гужва

Керівник роботи  О.Б. Єгоров

Зміст

Вступ	6
Глава 1. Дослідження обмотки збудження асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в синхронному генераторному режимі	14
1.1. Схеми обмотки збудження	14
1.2. Гармонічний аналіз кривих розподілу НР обмотки збудження, при її обтіканні постійним струмом	17
1.3. Співвідношення, що характеризують роботу асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора	20
1.4. Максимально реалізована потужність генераторного режиму	30
Висновки	35
Глава 2. Аналіз роботи асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в режимі синхронного генератора	37
2.1. Аналіз характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора	37
2.2. Синхронне самозбудження асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора	50
2.3. Асинхронне самозбудження асинхронного двигуна	53
2.4. Диференціальні рівняння та розрахунок перехідних процесів асинхронного генератора з урахуванням насичення	57
Висновки	61
Глава 3. Охорона праці	63
Висновки до роботи	75
Список літератури	77
Додатки	80

Умовні скорочення

АДФ	-	Асинхронний двигун із фазним ротором
СДФ	-	Синхронний фазовий генератор
АВГ	-	Асинхронні вентильні генератори
АД	-	Асинхронний двигун
АГ	-	Асинхронний генератор
ОЗ	-	Обмотка збудження
ЕТС	-	еквівалентна теплова схема
КТВ	-	Коефіцієнт тепловіддачі

Вступ

Як показує міжнародний досвід, пом'якшити наслідки енергетичної кризи в Україні можна за рахунок розвитку малої гідроенергетики та вітроенергетики.

У розвинених країнах, де відсутній гострий дефіцит електроенергії, розвиток малих гідроелектростанцій більшою мірою визначається економічними та екологічними факторами. Наприклад, у США активне будівництво малих ГЕС почалося після енергетичної кризи 1970-х років, коли зростання цін на енергоносії стимулювало державну підтримку цієї галузі. У період з 1990 до 2025 року було введено в експлуатацію понад 1500 таких об'єктів.

У Європі також приділяється значна увага розвитку малої енергетики. Зокрема, до кінця 2025 року 187 проектів малих ГЕС отримали фінансування в рамках програми ЄС THERMIE на суму 55,9 млн. доларів, що становить 12,3% від загального бюджету, спрямованого на розвиток нових технологій у промисловості.

Частка електроенергії, що виробляється малими ГЕС, у загальному енергобалансі становить: у Швеції – близько 2,4%, у Франції – 2%, в Іспанії – 2,8%, у Швейцарії – 8,3%, в Австрії – близько 10%.

Схожа тенденція спостерігається і у вітроенергетиці. За останніми даними, сумарна встановлена потужність вітроелектростанцій у світі досягла десятків тисяч мегават. Зокрема, у Данії та Німеччині вітроенергетика активно розвивається та щорічно нарощує потужності. Очікується подальше зростання її частки в енергобалансі багатьох країн. При цьому вартість будівництва вітропарків у Європі становить близько 1000 доларів за 1 кВт встановленої потужності, а собівартість електроенергії значно знизилася порівняно з попередніми десятиліттями.

Таким чином, світовий досвід засвідчує зростання наукового, технічного та інвестиційного інтересу до малої гідроенергетики й вітроенергетики як у розвинених країнах, так і в державах, що розвиваються. Для України, яка має значний гідроенергетичний і вітроенергетичний потенціал, розвиток об'єктів

малої енергетики може розглядатися як один із важливих напрямів підвищення енергетичної безпеки, диверсифікації енергетичного балансу та подолання наслідків енергетичної кризи. Важливою передумовою реалізації цього напрямку є формування сприятливого нормативно-правового середовища, здатного забезпечити залучення інвестицій у сферу відновлюваної енергетики.

Гідро- та вітроенергетичні установки є складними технічними комплексами, до складу яких входять різні види енергетичного, електромеханічного, силового та керуючого обладнання. Функціонування таких комплексів неможливе без електрогенераторів, які є одним із ключових елементів системи перетворення механічної енергії первинного двигуна в електричну. При цьому вартість електрогенераторів може становити близько 50–60 % загальної вартості енергетичної установки.

З техніко-економічної точки зору перспективним є використання асинхронних машин як джерел електроживлення в установках малої енергетики. Це пояснюється тим, що в Україні наявний значний парк асинхронних двигунів різної потужності, а також існує виробнича база для виготовлення асинхронних електричних машин невеликої потужності. Отже, сформовані передумови для застосування асинхронних машин у генераторному режимі, зокрема в автономних і локальних системах електропостачання.

Загальновідомо, що значна частка електричної енергії, яка виробляється у світі, перетворюється на механічну енергію переважно за допомогою асинхронних двигунів [3, 4]. Асинхронні двигуни загального призначення потужністю від 0,1 до 400 кВт на напругу до 1000 В належать до найпоширеніших електричних машин. У структурі експлуатованого парку електродвигунів їх частка за кількістю може сягати до 90 % від загальної кількості електричних машин.

Упродовж останніх десятиліть було розроблено та впроваджено підходи до оптимального проектування асинхронних машин з урахуванням технології їх виробництва. Це дало змогу зменшити матеріаломісткість машин, підвищити їх енергетичні показники, поліпшити експлуатаційні характеристики та

забезпечити більш раціональне використання конструкційних матеріалів [4–6].

Асинхронні машини досить широко застосовуються як генератори електричної енергії в автономних системах електропостачання [7]. Їх використання зумовлене конструктивною простотою, надійністю, відносно низькою вартістю, можливістю роботи в різних режимах навантаження та наявністю значної виробничої й експлуатаційної бази.

Існуючі типи асинхронних генераторів можуть бути класифіковані за такими ознаками:

- способом збудження;
- характером вихідної частоти;
- методами стабілізації напруги;
- конструктивним виконанням ротора, зокрема з короткозамкненим, фазним або порожнистим ротором;
- кількістю фаз.

Останні дві ознаки переважно характеризують конструктивне виконання електричної машини. Натомість характер вихідної частоти та способи стабілізації напруги значною мірою визначаються методом формування магнітного поля в машині.

За способом збудження асинхронні генератори поділяють на генератори із самозбудженням та генератори з незалежним збудженням.

Асинхронні генератори із самозбудженням, у свою чергу, можуть реалізовуватися:

- з використанням конденсаторів, підключених до кола статора, ротора або одночасно до обох кіл;
- із застосуванням вентильних перетворювачів зі штучною комутацією.

Генератори з незалежним збудженням отримують живлення від зовнішнього джерела змінної напруги. На практиці найбільшого поширення набув спосіб збудження за допомогою конденсаторів, увімкнених у коло статора. У цьому разі необхідна ємність конденсаторів залежить від характеру навантаження: зі збільшенням коефіцієнта потужності навантаження, тобто $\cos\varphi$,

необхідна ємність конденсаторної батареї зменшується.

Однією з ключових проблем використання асинхронних генераторів в автономних системах електропостачання є забезпечення стабільності вихідної напруги за змінного навантаження. У режимі зовнішньої характеристики за сталої швидкості обертання зміна напруги зумовлюється зміною основного магнітного потоку, а також внутрішніми падіннями напруги в елементах електричної машини. Якщо частота обертання ротора підтримується незмінною, додатковий вплив на параметри вихідної напруги може чинити зміна частоти [9].

Стабілізація напруги за умов змінного навантаження може бути забезпечена шляхом регулювання швидкості обертання ротора або зміни основного магнітного потоку. Вибір конкретного способу стабілізації залежить від типу асинхронного генератора, режиму його роботи, характеру навантаження, вимог до якості електроенергії та особливостей системи керування автономним джерелом живлення.

Розглянемо основні методи стабілізації напруги.

Підмагнічування спинки статора [9].

Даний метод дозволяє плавно регулювати напругу за постійної ємності конденсаторів. Для цього використовується додаткова обмотка на статорі, що живиться постійним струмом. Регулювання ґрунтується на зміні ступеня насичення магнітної системи. При збільшенні навантаження струм підмагнічування зменшують, що обмежує зміну реактивної провідності контура, що намагнічує, і дозволяє утримувати напругу генератора практично постійним в певному діапазоні навантажень.

Недоліки методу:

необхідність спеціального конструктивного виконання генератора із додатковими обмотками;

значна потужність підмагнічування (до 10% потужності генератора);

складність системи керування;

неможливість ефективної стабілізації при широкому діапазоні зміни

навантаження.

Регулювання напруги на конденсаторах.

Цей спосіб добре відомий та описаний у літературі [11]. У ланцюг конденсаторів, підключених до фазної чи лінійної напруги, вводиться реостат, за допомогою якого змінюють напругу на конденсаторах. Аналогічний ефект досягається при використанні трансформатора з регульованим коефіцієнтом трансформації: його первинна обмотка підключається до генератора, а вторинна до конденсаторів.

Недоліки цього методу:

низька економічність: у першому випадку через втрати у реостатах, у другому — через необхідність встановлення потужного трансформатора;

ускладнення експлуатації внаслідок наявності додаткової комутаційної апаратури;

збільшення необхідної ємності конденсаторів, яка має компенсувати реактивну потужність генератора, навантаження (при $\cos\varphi < 1$) та трансформатора.

Зміна ємності шунтуючих конденсаторів [9].

Регулювання основного магнітного потоку рахунок зміни ємності конденсаторів одна із найвідоміших методів. У найпростішому та найпоширенішому варіанті застосовується двоступінчаста схема з використанням двох конденсаторних батарей: додаткова батарея підключається при досягненні певного рівня навантаження.

Недоліки методу:

ступінчастий характер регулювання не забезпечує підтримання умови

$$U = \text{const}$$

$U = \text{const}$ при змінному навантаженні;

Наявність комутаційної апаратури ускладнює експлуатацію генераторної

установки.

Використання ферорезонансного стабілізатора напруги [11].

Такий стабілізатор є реактором зі змінною індуктивністю, підключений паралельно батареї конденсаторів постійної ємності. Він може підтримувати напругу при зміні навантаження в обмеженому діапазоні. При збільшенні навантаження і зниження напруги зменшується насичення реактора, зростає його індуктивність, знижується споживання реактивного струму, що сприяє підвищенню напруги генератора.

Недоліки методу:

вузький діапазон регулювання;

необхідність збільшення ємності конденсаторів;

зростання маси, габаритів та вартості установки через застосування стабілізатора.

Застосування керованих реакторів [12,13].

Безконтактні системи регулювання, що включають батарею конденсаторів постійної ємності та керований реактор, дозволяють стабілізувати напругу у всьому діапазоні зміни навантаження. Обмотки змінного струму реактора підключаються паралельно конденсаторам, а управління здійснюється за допомогою диференціальних обмоток: одна з них (намагнічує) залежить від напруги генератора, інша (розмагнічує) - від струму навантаження.

При холостому ході магнітопровід реактора насичений і через його обмотки протікає максимальний струм. Зі зростанням навантаження збільшується струм у обмотці, що розмагнічує, що знижує насичення, збільшує індуктивність і зменшує реактивний струм реактора. В результаті зростає струм генератора, що намагнічує, і напруга підтримується на постійному рівні.

Недоліки методу:

значна маса та габарити реакторів;

велика кількість елементів керування;

висока вартість.

Застосування сегнетокерамічних нелінійних конденсаторів (варикондів) [14,15].

Принцип стабілізації заснований на здатності варикондів змінювати діелектричну проникність та, відповідно, ємність залежно від напруженості електричного поля. Такі елементи відрізняються компактністю та малою масою.

Місткість варикондів збільшується зі зростанням напруги до певного рівня (80-100 В), після чого починає зменшуватися. Робочою областю є спадні ділянки характеристики, де при зниженні напруги ємність зростає. При одночасному впливі змінної та керуючої постійної напруги діапазон зміни ємності може досягати 5-8 разів.

У схемах збудження використовується комбінація звичайних конденсаторів (для роботи на холостому ході) та варикондів (для регулювання). Це дозволяє забезпечити стабілізацію напруги у всьому діапазоні навантажень – від нуля до номінального значення.

Недоліки методу:

складність схем;

залежність показників від температури;

Висока вартість.

Асинхронні вентильні генератори (АВГ) [16-19].

В останні роки для стабілізації напруги та частоти застосовуються асинхронні генератори з вентильним збудженням. У таких системах використовуються різні перетворювачі (інвертори напруги та струму, перетворювачі частоти, випрямні та ключові схеми). Вони забезпечують високу точність підтримки параметрів, проте відрізняються складністю та високою вартістю.

Завдяки простоті конструкції та високій надійності в більшості випадків як асинхронні генератори застосовуються машини з короткозамкненим ротором.

Всі розглянуті способи стабілізації напруги насамперед відносяться саме до них, хоча можуть ефективно використовуватися і для машин з фазним ротором.

Асинхронні машини з фазним ротором у генераторному режимі застосовуються значно рідше і, як правило, використовуються в системах перетворення частоти, каскадних схемах та асинхронізованих синхронних машинах [9,11,20,21].

Наведений дуже короткий аналіз свідчить про те, що питання стабілізації вихідної напруги асинхронного генератора при його роботі в автономному режимі є ключовим.

Дуже ефективний, порівняно нескладний і недорогий спосіб стабілізації вихідної напруги у всьому діапазоні навантажень, від нуля до номінального значення, відкривається при використанні як генератор асинхронної машини з фазним ротором, при роботі в режимі синхронного генератора. Іншими словами, пропонується використовувати асинхронну машину з фазним ротором як неявно полюсну синхронну машину [22]. При цьому обмоткою збудження такої машини є обмотка ротора. Такий генератор може працювати як у режимі незалежного збудження, так і в режимі самозбудження. Слід зазначити, що жодних конструктивних змін машина не вимагає, має назву "Синхронний фазний генератор - СГФ".

Глава 1

ОБМОТКИ ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ У СИНХРОННОМУ ГЕНЕРАТОРНОМУ РЕЖИМІ (СГФ)

1.1 Схеми обмотки збудження

Асинхронні двигуни з короткозамкненим ротором, як зазначалося раніше, можуть працювати у генераторному режимі. Такі машини не мають ковзних контактів, що забезпечує високу надійність. Однак їх істотним недоліком, що обмежує сферу застосування, є складність підтримки стабільної напруги при зміні навантаження.

Цей недолік можна усунути, якщо використовувати як генератор асинхронний двигун з фазним ротором (АДФ), що працює в синхронному режимі. Для цього на фазну обмотку ротора подається постійний струм, у результаті вона виконує функцію обмотки збудження.

За конструкцією синхронізований асинхронний двигун з незалежним збудженням практично не відрізняється від звичайного асинхронного двигуна: він має аналогічну обмотку статорну, а висновки роторної обмотки підключені до контактних кільцях. На одному валу з машиною розміщується збудник постійного струму, що живить ротор. Такі двигуни поєднують переваги асинхронних машин (простота пуску та високий пусковий момент) та синхронних (високий коефіцієнт потужності).

Пуск здійснюється аналогічно до пуску асинхронного двигуна з фазним ротором. Після досягнення номінальної швидкості на ротор подається постійний струм, що створює магнітне поле, яке, взаємодіючи з полем статора, що обертається, вводить ротор в синхронний режим.

У пазах ротора розміщуються дві обмотки: трифазна, з'єднана з контактними кільцями і живиться змінним струмом, а також обмотка постійного струму з колектором. При цьому обмотка статора виконує функцію вторинного ланцюга і підключається до щіток колекторної обмотки ротора.

До моменту синхронізації обмотка постійного струму з колектором

функціонує як перетворювач, при цьому напруга на щітках має частоту ковзання. Після входження в синхронний режим на колекторі встановлюється постійна напруга, що викликає перебіг постійного струму у відповідній обмотці. У таких машинах коефіцієнт потужності автоматично регулюється, оскільки напруга між щітками колектора збільшується зі зростанням навантаження до певного рівня.

Таким чином, синхронний генератор з фазним ротором (СГФ) за своєю суттю є неявнополюсною синхронною машиною, в якій функцію обмотки збудження виконує роторна обмотка асинхронного двигуна, що живиться постійним струмом. Від способу підключення обмотки до джерела постійного струму залежить форма кривої сили, що намагнічує (НС) F в зазорі машини, а отже і форма кривої індукції B , яка в неявнополюсному синхронному генераторі при рівномірному повітряному зазорі δ повторює за формою криву НС, так як

$$B = \frac{\mu_0}{\delta} F \quad (1.1)$$

Для фазних роторів асинхронних машин в основному застосовується трифазні обмотки і рідко, для машин невеликої потужності - двофазні, які за своїми електричними та магнітними властивостями значно поступаються обмоткам трифазного струму і не можуть бути рекомендовані як обмотка збудження для СГФ.

З точки зору частоти індуктованої ЕРС або НС, що створюється, до роторної обмотки пред'являються менш жорсткі вимоги, ніж до якірної і не накладаються ніякі умови на систему її обмотувальних коефіцієнтів. Тому обмотки роторів, зазвичай, мають діаметральний крок і застосовуються переважно цілі числа пазів на полюс і фазу q .

У машинах середньої і великої потужності зазвичай застосовують хвильову - стрижневу двошарову обмотку, так як при цьому зменшується число міжполюсних перемичок, що дуже важливо для конструкції обмоток, що обертаються. У цьому число пазів на полюс і фазу приймають $q = 4 + 6$. У машинах потужністю до 80-100 кВт часто застосовують двошарову котушкову обмотку, а в машинах невеликої потужності - двоплощинну концентричну

обмотку. У останніх двох випадках $q = 2$.

Виходячи з технологічних міркувань, фазні обмотки роторів треба виконувати без паралельних гілок, тим більше, що при малих проміжках між статором і ротором неточності складання викликали б зрівняльні струми між паралельними гілками.

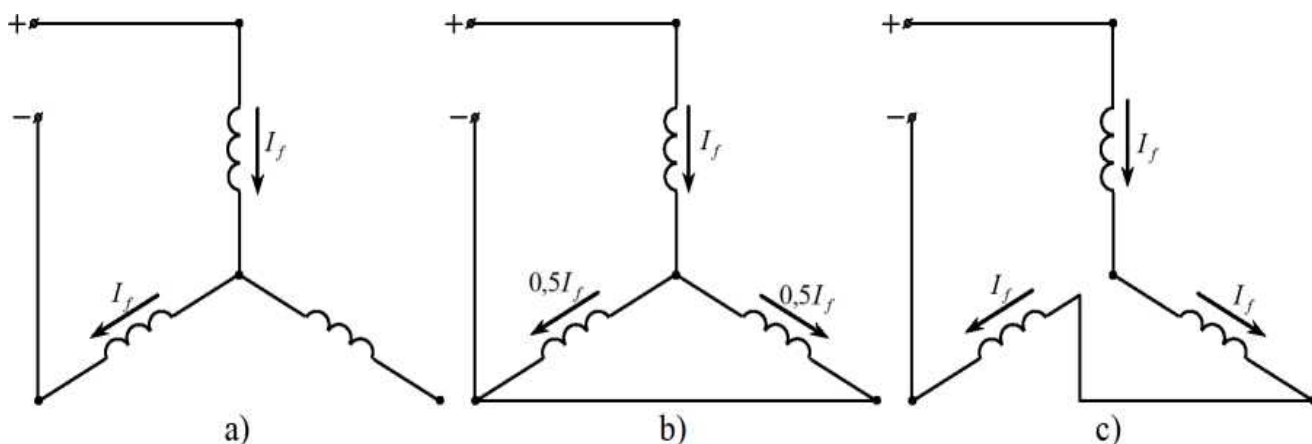


Рис. 1.1. Схеми приєднання трифазної обмотки ротора до джерела постійного струму.

Як правило, трифазні обмотки ротора асинхронних машин поєднуються за схемою «зірка». З'єднання трикутником застосовується значно рідше і переважно в машинах великої потужності [25-26].

З урахуванням вимоги мінімального втручання у конструкцію асинхронного двигуна, призначеного для роботи в режимі синхронного генератора, доцільно розглядати лише три варіанти підключення трифазної обмотки ротора до джерела постійного струму (рис. 1.1).

У схемі (рис. 1.1 а) до джерела постійного струму підключені дві фази роторної обмотки, при цьому третя фаза залишається без струму. У варіанті (рис. 1.1, б) дві фазні обмотки з'єднані паралельно і через них протікають струми, рівні половині повного значення, тоді як по третій фазі проходить повний струм. У схемі (рис. 1.1, с) повний струм протікає через усі три фази.

Схеми (а) та (б), представлені на рис. 1.1, не вимагають внесення змін до конструкції ротора. Схеми (с) передбачає роз'єднання нульової точки.

1.2 Гармонічний аналіз кривих розподілу НС обмотки збудження, при її обтіканні постійним струмом

Якість електричної енергії характеризується рівнем коливань напруги, стійкістю частоти, симетрією напруг у трифазних системах, а також ступенем їхньої синусоїдальності. Перші два параметри забезпечуються рахунок регулювання струму збудження і крутного моменту на валу генератора, тоді як останніх значною мірою визначаються конструктивними особливостями електричної машини.

Симетрія вихідної напруги задається конструкцією якірної обмотки і, як правило, спочатку забезпечується у всіх розроблених машинах.

Ступінь несинусоїдності напруги визначається ставленням діючих значень вищих гармонік до чинного значення основної (першої) гармоніки.

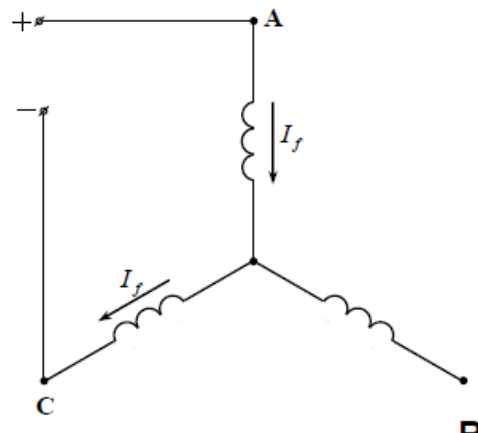
Наявність вищих гармонік ЕРС та напруги генераторів може призводити до ряду небажаних ефектів в електричних мережах та у споживачів, включаючи збільшення енергетичних втрат [10–22 та ін.]. У зв'язку з цим рівень несинусоїдності напруги зазвичай обмежується значенням близько 5%.

Як зазначалося раніше, СГФ за своєю суттю є синхронним неявнополюсним генератором, тому при проектуванні застосовуються загальноприйняті рекомендації для даного типу машин. Зокрема, для забезпечення максимальної амплітуди основної гармоніки за мінімального рівня вищих гармонік відношення числа пазів з обмоткою збудження до загальної кількості пазових поділів має знаходитися в межах $0 = 667-0,72$ причому переважно вибирати нижню межу цього діапазону [16, 24].

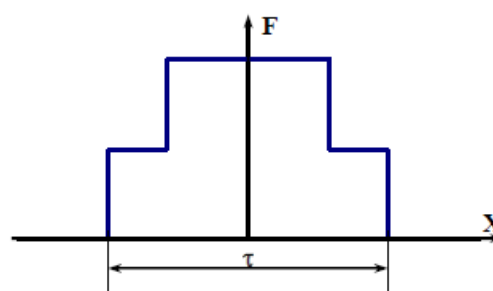
У СГФ ця умова може бути виконана, якщо дві фазні обмотки з'єднати послідовно, а третю виключити з електричного кола (рис. 1.1 а).

Аналогічного ефекту можна досягти шляхом штучного наближення кривої розподілу магніторушійної сили до синусоїдальної форми. Це реалізується або рахунок укладання різного числа провідників в пази (так звана синусна обмотка), або за допомогою пропускання різних струмів через пази з однаковим числом провідників [15].

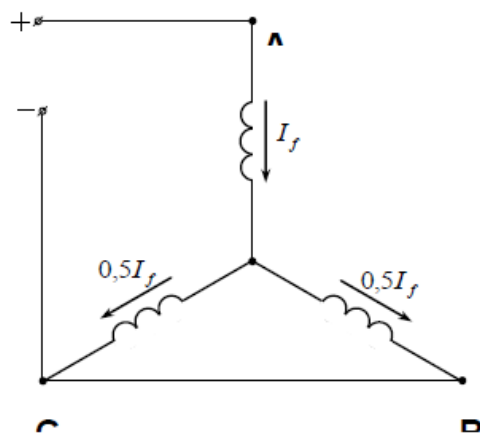
У СГФ цій умові задовольняє схема обмотки, представлена на рис. 1.1 б, у якій по одній фазній обмотці протікає струм I_f , а по двох інших - $0,5I_f$.



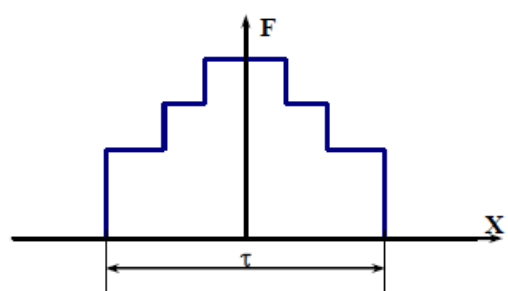
a)



b)



a)



b)

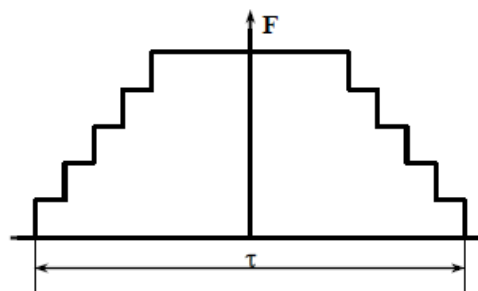


Рис. 1.2

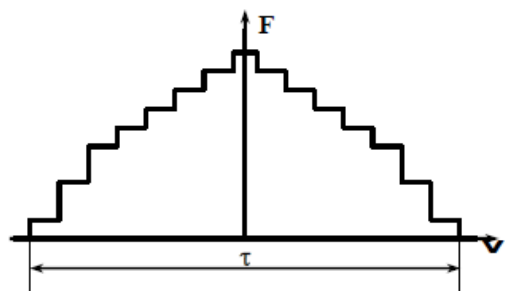


Рис. 1.3

Криві розподілу СР на полюсному поділі для $q = 2$ (а) та $q = 5$ (б)

Схема обмотки представлена на рис. 1.1-с, не задовольняє вимогам, що висуваються до обмоток збудження неявнополюсних синхронних генераторів, і надалі розглядається тільки для порівняння. На рис. 1.2 - а і б представлені криві розподілу НС на полюсному розподілі у відносних одиницях для $q = 2$ і $q = 5$ відповідно стосовно схеми обмотки, наведеної на рис. 1.1 – а.

На рис. 1.3 а і б наведені криві для $q = 2$ і $q = 5$ стосовно схеми обмотки 1.1, б.

Для визначення гармонійного складу наведених кривих відомим способом

[36] було проведено їх розкладання в гармонійний ряд Фур'є. Так як криві СР симетричні щодо осі ординат і одночасно симетричні щодо осі абсцис, при суміщенні двох напівперіодів кривих, в розкладанні будуть присутні тільки непарні косинусоїди і достатньо користуватися кривою за чверть періоду.

Результати розкладання наведено у додатку. Розрахунок вели за такими формулами:

$$a_n = \frac{8}{m} \sum_{k=1}^m f_k(\alpha) \cos kn\alpha \quad f_n(\alpha) = a_n \frac{\cos n\alpha}{n}$$

Амплітудні значення гармонік наведено у таблиці 1.1.

Таблиця 1.1

Амплітуда	Криві Рис. 1.2		Криві Рис.1.3	
	q=2	q=5	q=2	q=5
0				
C1	21,15	52,64	18,32	46,36
C5	1,22	2,13	1,05	0,87
C7	0,94	4,04	0,802	1,02

Несинусоїдальність кривих підраховувалася за формулою

$$R_{\%} = \frac{\sqrt{C_5^2 + C_7^2}}{C_1} \cdot 100$$

Вона склала:

Схема з'єднання обмоток ротора рис.1.1.

Для $q = 2$ -7,28%

для $q = 5$ – 8,77%.

Схема з'єднання обмоток ротора рис.1.1b.

Для $q = 2$ –7,21%, для $q = 5$ – 3,87%.

З наведених даних випливає:

- криві розподілу СР, а отже, і криві розподілу індукції в повітряному зазорі не містять третин і кратних трьох гармонік;
- при малих значеннях несинусоїдності кривих для схем обмоток рис.1.1 а і рис.1.1 b, мало відрізняється один від одного, але зі зростанням q це

різниця різко зростає, причому, для схеми 1.1 б несинусоїдність значно нижче;

- Амплітуда першої гармоніки для схеми рис. 1.1, але в 12 % - 14% вище, ніж схеми 1.1, в. Отже, кожна з схем, що розглядаються, не має явних переваг перед іншою.

Вибір схеми підключення обмотки збудження СГФ до джерела постійного струму залежить від індивідуальних особливостей машини, зокрема, від властивостей якірної обмотки, що фільтрують, теплового режиму і в кінцевому підсумку від реалізації максимальної потужності.

1.3 Співвідношення, що характеризують роботу асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора

Як зазначалося раніше, при використанні асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора функції обмотки збудження виконує фазова роторна обмотка.

У руховому режимі основний магнітний потік формується за рахунок струму, що намагнічує (струму холостого ходу), що протікає в обмотці статора. У генераторному режимі, навпаки, цей потік створюється струмом роторної обмотки, причому ЕРС статора повинна підтримуватися на постійному рівні. При цьому чинне значення ЕРС дорівнює:

$$E_{\phi} = \frac{\omega}{\sqrt{2}} \psi_{\phi m} = \pi \sqrt{2} f w_1 k \quad (1.2)$$

де ψ - амплітудне значення потокозчеплення фази;

Φ_m - амплітудне значення потоку; f - частота; w - кількість витків фази обмотки статора; k - обмотковий коефіцієнт для основної гармонії поля.

Магнітний потік Φ_m можна подати у вигляді суми потоків $\Phi_{\delta m}$ діючого в повітряному зазорі, і ϕ_i - потоки розсіювання статора.

Перша гармоніка потоку в повітряному зазорі:

$$\Phi_{\delta_1} = \frac{2}{\pi} l' B_{m1} \quad (1.3)$$

де l' – розрахункова довжина машини; m - полюсний поділ.

Для амплітуди першої гармоніки магнітного поля маємо:

$$B_{m1} = \frac{\mu_0}{\delta'} F_{a1} \quad (1.4)$$

Коефіцієнти магнітної провідності зазору:

$$\begin{aligned} K_{\delta_1} &= \frac{t_{z_1}}{t_{z_1} C_{\pi_1} \delta}; & C_{\pi_1} &= \frac{(\epsilon_{\pi_1} / \delta)^2}{5 + \epsilon_{\pi_1} / \delta}; \\ K_{\delta_2} &= \frac{t_{z_2}}{t_{z_2} - C_{\pi_2} \delta}; & C_{\pi_2} &= \frac{(\epsilon_{\pi_2} / \delta)^2}{5 + \epsilon_{\pi_2} / \delta}; \end{aligned} \quad (1.5)$$

Перша гармонійна СР обмотки статора:

$$F_{a1} = \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w_1 K_{w1}}{p} I_o \quad (1.6)$$

де m – число фаз обмотки статорної, p - число пар полюсів,

I_o - струм статора, що намагнічує.

У синхронному генераторному режимі ту ж величину СР повинна створити обмотка ротора.

За аналогією з виразом для НР трифазної обмотки ротора асинхронної машини [37] можна отримати загальний вираз НР при живленні обмотки ротора постійним струмом.

$$F_f = \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \cos \nu x + \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \cos \nu \left(x - \frac{2}{3} \pi \right) + \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \cos \nu \left(x - \frac{4}{3} \pi \right) \quad (1.7)$$

Запишемо вирази НС стосовно схем з'єднання обмоток, наведених на рис.

1.1.

$$F_f^a = \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \cos \nu x + \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \cos \nu \left(x - \frac{2}{3} \pi \right) = -2 \sum_{\nu} F_{\phi \nu m} \sin \nu \frac{\pi}{3} \sin \nu \left(x - \frac{\pi}{3} \right) \quad (1.8)$$

$$F_f^b = \frac{1}{2} \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu x + \frac{1}{2} \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu (x - \frac{2}{3} \pi) - \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu (x - \frac{2}{3} \pi) = - \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} [(1 - \cos \nu \frac{2}{3} \pi) \cos \nu (x - \frac{2}{3} \pi)] \quad (1.9)$$

$$F_f^c = \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu x + \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu (x - \frac{4}{3} \pi) - \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu (x - \frac{2}{3} \pi) = \\ = \sum_{\nu} F_{\Phi_{1m}} \cos \nu (x - \frac{2}{3} \pi) (2 \cos \nu \frac{2}{3} \pi - 1) \quad (1.10)$$

Так як роторна обмотка завжди виконується з повним кроком, то в цих умовах обмотувальний коефіцієнт дорівнює коефіцієнту розподілу

$$K_{p_2 \nu} = \frac{\sin(\nu \pi / 2m)}{q_2 \sin(\nu \pi / 2mq_2)} \quad (1.11)$$

Амплітуда основної гармоніки НС фази обмотки

$$F_{\Phi_{1m}} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{w_2 K_{w_2}}{p} I_f \quad (1.12)$$

Знайдемо значення СР для ряду гармонійних:

$$F_{f_1}^a = F_{\Phi_{1m}} \cos x - F_{\Phi_{1m}} \cos(x - \frac{2}{3} \pi) = F_{\Phi_{1m}} [\cos x - \cos(x - \frac{2}{3} \pi)] = \\ = -2F_{\Phi_{1m}} [\sin(x - \frac{\pi}{3}) \sin \frac{\pi}{3}] = -\sqrt{3} F_{\Phi_{1m}} \sin(x - \frac{\pi}{3}) \\ F_{f_3}^a = F_{\Phi_{3m}} \cos 3x - F_{\Phi_{3m}} \cos 3(x - \frac{2}{3} \pi) = -2F_{\Phi_{3m}} [\sin(3x - \pi) \sin \pi] = 0 \quad (1.13)$$

Треті та кратні трьом гармоніки відсутні. Відношення будь-який гармоніки результуючої НС до відповідної гармоніки НС фази складає

$$\frac{F_{f\nu}^a}{F_{\Phi_{\nu}}} = \sqrt{3} \quad (1.14)$$

схема рис. 1.1 - б:

$$\begin{aligned}
F_{f1}^b &= \frac{1}{2} F_{\Phi_1 m} \cos x + \frac{1}{2} F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{4}{3} \pi) - F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{2}{3} \pi) = \\
&= F_{\Phi_1 m} \left\{ \frac{1}{2} [\cos x + \cos(x - \frac{4}{3} \pi)] - \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \right\} = F_{\Phi_1 m} \left[\frac{1}{2} (2 \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \cos \frac{2}{3} \pi) - \right. \\
&\quad \left. - \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \right] = F_{\Phi_1 m} (\cos \frac{2}{3} \pi - 1) \cos(x - \frac{2}{3} \pi) = -1,5 F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \\
F_{f1}^b &= \frac{1}{2} F_{\Phi_1 m} \cos x + \frac{1}{2} F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{4}{3} \pi) - F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{2}{3} \pi) = \\
&= F_{\Phi_1 m} \left\{ \frac{1}{2} [\cos x + \cos(x - \frac{4}{3} \pi)] - \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \right\} = \\
&= F_{\Phi_1 m} \left[\frac{1}{2} (2 \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \cos \frac{2}{3} \pi) - \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \right] = F_{\Phi_1 m} (\cos \frac{2}{3} \pi - 1) \cos(x - \frac{2}{3} \pi) = \\
&\quad -1,5 F_{\Phi_1 m} \cos(x - \frac{2}{3} \pi) \\
F_3^b &= \frac{1}{2} F_{\Phi_3 m} \cos 3x + \frac{1}{2} F_{\Phi_3 m} \cos 3(x - \frac{4}{3} \pi) - F_{\Phi_3 m} \cos 3(x - \frac{2}{3} \pi) = \\
&= F_{\Phi_3 m} \left\{ \frac{1}{2} [(\cos 3x + \cos 3(x - \frac{4}{3} \pi))] - \cos 3(x - \frac{2}{3} \pi) \right\} = \\
&= F_{\Phi_3 m} \left[\frac{1}{2} \cdot 2 \cos 3(x - \frac{2}{3} \pi) \cos 2\pi - \cos 3(x - \frac{2}{3} \pi) \right] = 0 \\
F_{f3}^b &= \frac{1}{2} F_{\Phi_3 m} \cos 5x + \frac{1}{2} F_{\Phi_3 m} \cos 5(x - \frac{4}{3} \pi) - F_{\Phi_3 m} \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi) = \\
&= F_{\Phi_3 m} \left\{ \frac{1}{2} [(\cos 5x + \cos 5(x - \frac{4}{3} \pi))] - \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi) \right\} = \\
&\quad \left\{ = F_{\Phi_3 m} \left[\frac{1}{2} 2 \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi) \cos \frac{10\pi}{3} - \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi) \right] \right\} = \\
&= F_{\Phi_3 m} \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi) (\cos \frac{10\pi}{3} - 1) = -1,5 F_{\Phi_3 m} \cos 5(x - \frac{2}{3} \pi)
\end{aligned} \tag{1.15}$$

З наведених даних випливає, що при однаковому значенні струму, що протікає по роторній обмотці, вибір схеми її підключення до джерела постійного струму істотно впливає на величину сили, що намагнічує (НС). Так, схема, подана на рис. 1.1, с забезпечує найбільше значення НС — приблизно в 1,15 рази більше в порівнянні зі схемою (рис. 1.1, а) і в 1,33 рази більше, ніж у схемі (рис. 1.1, б). Але в такому ж відношенні зростає в цій схемі амплітуди всіх вищих гармонік. Тому застосування цієї схеми може бути рекомендовано.

При розрахунках і дослідженнях синхронних генераторів широко використовують так званий коефіцієнт форми поля - K_f відношення амплітуди

основної гармоніки поля збудження до дійсного максимального значення цього поля - f_m . Оскільки асинхронний двигун з фазним ротором, що працює в режимі синхронного генератора, по своїй суті є синхронною неявнополюсною машиною, визначення даного коефіцієнта в цьому випадку також є необхідним.

Максимальна індукція поля збудження може бути визначена з виразу

$$B_{f_m} = \frac{\mu_0}{\delta} = \frac{w_2 I_f}{2p} \quad (1.16)$$

Амплітуда основної гармоніки поля збудження

$$B_{f_1 m} = \frac{\mu_0}{\delta} F_{f_m} \quad (1.17)$$

Як зазначалося, в асинхронних машинах із фазним ротором роторна обмотка завжди виконується з повним кроком.

Коефіцієнт розподілу роторної обмотки для першої гармоніки поля можна виразити так

$$K_{p_2} = \frac{\sin \frac{\pi}{2m}}{q \sin \frac{\pi}{2mq}} \quad (1.18)$$

з урахуванням виразу (1.18) отримаємо

$$K_f = \frac{B_{f_1 m}}{B_{f_m}} = \frac{4}{\pi} K_{p_2} = \frac{4}{\pi} \cdot \frac{\sin}{q \sin} \quad (1.19)$$

Отримана формула відрізняється від формул коефіцієнта форми синхронних неявнополюсних.

Повну силу, що намагнічує, створену роторною обмоткою, що припадає на один полюс, можна визначити з виразу

$$F_{f_m} = \frac{I_f w_2}{2p} \quad (1.20)$$

Вище було наведено вираз визначення основний гармоніки СР, створений намагнічуючим струмом статора (1.6). У режимі синхронного генератора

амплітуда першої гармоніки НС, створеної обмоткою ротора, повинна дорівнювати амплітуді першої гармоніки НС, створеної обмоткою статора

Підставивши (1.6) і (1.16) (1.19) і вирішуючи вираз щодо струму збудження, отримаємо значення струму збудження, еквівалентне струму статора

$$I_f = \frac{K_a F_a 2p}{w_s} = \frac{\pi}{4K_{w_2}} \cdot \frac{m_1 \sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{w_1 K_{w_1}}{w_s p} 2p I_o = \frac{m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{w_1}{w_s} \quad (1.21)$$

Виражаючи еквівалентне число витків обмотки збудження w_3 через число витків фази роторної обмотки w_2 використовуючи співвідношення (1.17) отримаємо значення струму збудження, еквівалентні струму статора, для кожного варіанту схеми підключення роторної обмотки до джерела постійного струму.

З отриманих залежностей випливає, що для забезпечення однакової величини сили, що намагнічує (НС), схема (с) вимагає на 25 % менший струм збудження порівняно зі схемою (b) і на 13,4 % менший — порівняно зі схемою (a).

Отже, вирази (1.16), (1.17) і (1.18) дозволяють визначити струм збудження ротора, при якому в повітряному зазорі створюється основна гармоніка НС, що дорівнює за величиною струму статора, що намагнічує.

При цьому слід враховувати, що не весь магнітний потік, який створюється обмоткою збудження, проходить через повітряний зазор і зчіпляється з статора обмоткою. Повний потік збудження у синхронному режимі дорівнює

$$\Phi_f = \Phi_d + \Phi_s \quad (1.22)$$

Потік розсіювання визначається за допомогою коефіцієнта розсіювання

$$K_s = \frac{\Phi_d + \Phi_s}{\Phi_d} = 1 + \frac{\Phi_s}{\Phi_d} \quad (1.23)$$

Для асинхронних машин із фазним ротором коефіцієнт K_s зазвичай перебуває в межах 1,01–1,03. Як зазначалося раніше, електрорушійна сила в обмотці статора індукується не лише основним магнітним потоком, а й потоками

розсіювання. У зв'язку з цим для одержання ЕРС тієї самої величини виключно за рахунок основного магнітного потоку необхідно відповідно збільшити його значення, компенсуючи зменшення ЕРС, зумовлене відсутністю складової, створеної потоками розсіювання.

З урахуванням впливу потоків розсіювання статора і ротора струм збудження доцільно збільшити таким чином, щоб основний магнітний потік зріс приблизно на 5 %. Це дає змогу забезпечити необхідний рівень результуючої електрорушійної сили та стабілізувати електромагнітні параметри машини в заданому режимі роботи.

Крім того, в обмотці статора ЕРС формується не лише основною гармонікою магнітного поля, а й гармоніками вищих порядків. У руховому режимі, коли машина живиться від джерела синусоїдальної напруги, усі обертові гармоніки несинусоїдальної складової магнітного поля індукують в обмотці статора ЕРС тієї самої частоти, що й частота струму живлення.

Як показує аналіз [18], електрорушійні сили, зумовлені гармоніками вищих порядків, збігаються за фазою з ЕРС основної гармоніки та арифметично додаються до неї. Унаслідок цього вищі гармоніки не спричиняють істотного спотворення форми результуючої ЕРС, яка залишається близькою до синусоїдальної. Відношення ЕРС, індукованих гармоніками вищих порядків, до фазної ЕРС визначає ступінь їх впливу на електромагнітні процеси в машині.:

$$\frac{E_v}{E_\Phi} = \frac{\sum_{v \neq 1} E_{\Phi v}}{E_\Phi} = \sum_{v \neq 1} \frac{K_{wv} I}{\sqrt{K_{w1}}} \quad (1.24)$$

Фактично в асинхронних машинах зазначене відношення змінюється в межах 0,005–0,05. Найменші його значення характерні для обмоток з укороченим кроком, приблизно 0,83, а також для машин із більшою кількістю пазів, що припадають на один полюс і одну фазу.

З урахуванням впливу вищих гармонік у генераторному режимі виникає необхідність додаткового збільшення магнітного потоку в повітряному зазорі на

кілька відсотків. Крім того, слід враховувати, що електрорушійна сила статора в генераторному режимі має бути приблизно на 5 % більшою порівняно з її значенням у руховому режимі.

У результаті амплітуду першої гармоніки магнітного потоку в повітряному зазорі доцільно підвищити орієнтовно на 10–13% порівняно з руховим режимом. Досягнення такого збільшення потребує відповідного підвищення струму збудження в роторній обмотці.

Водночас необхідно враховувати нелінійний характер магнітного кола машини. Унаслідок насичення магнітопроводу збільшення намагнічувальної сили ротора відбувається інтенсивніше, ніж зростання магнітного потоку. Тому під час вибору струму збудження слід враховувати не лише необхідне підвищення магнітного потоку, а й ступінь насичення магнітної системи електричної машини.

Максимальне значення першої гармонійної індукції у повітряному зазорі .

$$B_{m_1} = K_f \frac{\mu_0}{\delta'} \cdot \frac{F_f}{K_\mu} \quad (1.25)$$

Векторна діаграма струмів наведено на рис. 1.5.

Система струмів прямої послідовності у фазах статорної обмотки формує основну гармонійну силу, що намагнічує (НС), яка обертається з кутовою швидкістю ω у напрямку прямого чергування фаз (a–b–c). Відповідно, створюване цієї СР магнітне поле також обертається з тією ж швидкістю. У синхронному режимі дана НС виявляється нерухомою щодо ротора, а значить, і магнітне поле залишається нерухомим в системі координат ротора.

Система струмів зворотної послідовності у фазах статора створює основну гармонійну СР, що обертається з тією ж кутовою швидкістю, але в напрямку зворотного чергування фаз (a–c–b). Відповідно, і магнітне поле, обумовлене цією СР, обертається в протилежний бік.

Змінні струми подвійної частоти, що наводяться в обмотці збудження, накладаються на постійну складову струму і спотворюють його форму, що, своєю чергою, може призвести до погіршення форми вихідної напруги генератора.

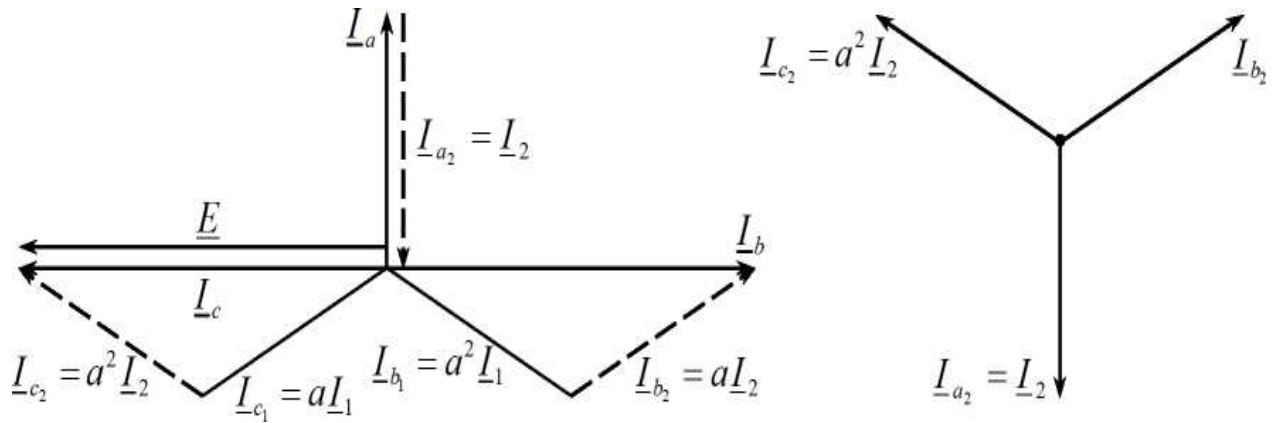


Рис. 1.5. Векторна діаграма струмів при двофазному короткому замиканні

При несиметричних режимах схемах обмоток збудження, рис. 1.1, а та рис. 1.1, с, що наводиться полем зворотної послідовності ЕРС E_2 повинна викликати струм, який буде замикатися через джерело постійного струму. Оскільки опір всього ланцюга обмотки збудження досить великий, цей струм буде незначним.

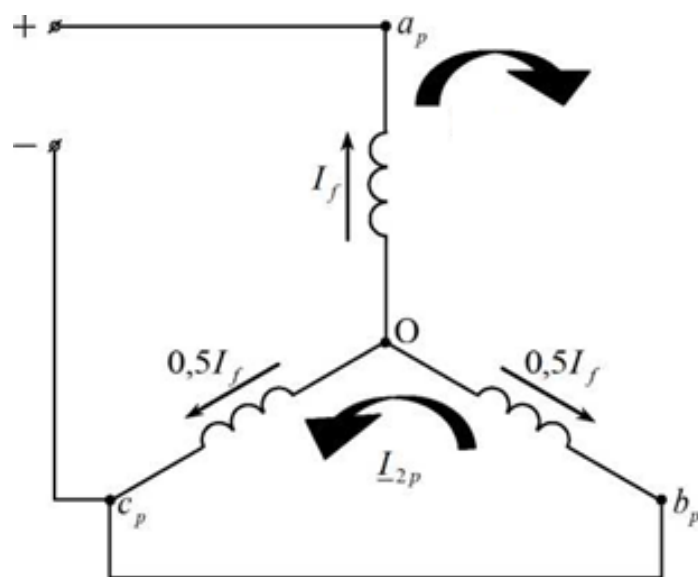


Рис. 1.6. Схема приєднання обмотки ротора до джерела постійного струму

З використанням схеми рис. 1.1, б, або, що те саме рис.1.6, індуктируемый змінний струм подвійний частоти буде замикатися в контурі Ob_{pcp} . Величина цього струму практично визначається лише індуктивним опором обмоток Ob і Oc , оскільки їх активний опір невеликий і може досягти значних величин. При цьому цей струм може викликати значне нагрівання обмотки збудження, а форма результуючої НС обмотки сильно спотвориться.

Таким чином, з погляду забезпечення роботи генератора за умов несиметричного навантаження, схеми обмотки збудження, наведені на рис. 1.1, а та рис. 1.1, с, є більш доцільними порівняно зі схемою, поданою на рис. 1.1, б. Це пояснюється тим, що їх застосування потребує менш жорстких обмежень щодо режимів роботи електричної машини.

Водночас слід зазначити, що визначення допустимих рівнів несиметрії навантаження для асинхронного двигуна з фазним ротором, який функціонує в режимі синхронного генератора, є окремою науково-технічною задачею. Вона потребує спеціального аналізу електромагнітних процесів, теплового стану обмоток, механічних навантажень та впливу несиметричних режимів на експлуатаційну надійність машини. У межах цієї роботи зазначене питання детально не розглядається.

Відомо, що асинхронні машини, порівняно із синхронними, зазвичай мають менший повітряний проміжок. Унаслідок цього їхні головні індуктивні опори є істотно вищими. Така особливість характерна також для асинхронних машин із фазним ротором, які працюють у режимі синхронного генератора.

Зокрема, асинхронний двигун із фазним ротором типу АК-114-6 потужністю 320 кВт під час роботи в генераторному режимі з вихідною потужністю 192 кВт характеризується значним головним індуктивним опором. Це необхідно враховувати під час аналізу режимів роботи, вибору параметрів збудження та оцінювання енергетичних характеристик такої машини.

$$X_{ax} = \frac{\sqrt{2} \mu_o K_{aT} \tau}{\pi K \mu K_s \delta} \cdot \frac{A_H}{B_{aH}} = \frac{\sqrt{2} \cdot 4\pi 10^{-7} \cdot 0,925 \cdot 27,5 \cdot 35200}{\pi \cdot 1,55 \cdot 1,957 \cdot 0,1 \cdot 0,454} = 3,94$$

де лінійне навантаження при реалізації вищезгаданого режиму $A=38,2 \cdot 10^3 \text{ А/М}$; індукція у повітряному зазорі $B_s = 0,454 \text{ Тл}$, повітряний зазор $0,1 \text{ см}$, полюсний поділ $m = 27,5 \text{ см}$, обмотувальний коефіцієнт $K = 0,925$, коефіцієнт насичення $1,55$, коефіцієнт повітряного зазору $K = 1,95$.

Приблизно близькі значення головного індуктивного опору мають інші асинхронні машини.

У той же час у неявно полюсних синхронних машинах ця величина набагато нижча. Наприклад, у турбогенераторів $1,1 - 1,25$.

Виходячи з вищесказаного, можна стверджувати, що асинхронні двигуни з фазним ротором, що працюють в синхронному генераторному режимі, володітимуть набагато меншою статичною і динамічною стійкістю і статичною перевантажуваністю, ніж синхронні генератори. Тому асинхронні двигуни з фазним ротором можуть бути рекомендовані для роботи в автономному генераторному режимі. У той же час ударний струм раптового короткого замикання в цих машинах буде нижчим.

1.4 Максимально реалізована потужність генераторного режиму

Для обґрунтування можливості застосування асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора передусім необхідно визначити, яку частку його номінальної потужності можна реалізувати без внесення конструктивних змін до електричної машини.

Як зазначалося раніше, у руховому режимі основний магнітний потік холостого ходу створюється намагнічувальною складовою струму статора. Натомість у генераторному режимі цей потік формується струмом збудження, що протікає в роторній обмотці. При цьому струм збудження має перевищувати намагнічувальний струм на декілька відсотків, орієнтовно на $7-10 \%$. За підключення навантаження струм збудження повинен також компенсувати розмагнічувальну дію реакції якоря, яка в машинах із малим повітряним зазором

може бути досить істотною.

Унаслідок цього в генераторному режимі виникає певна нерівномірність електромагнітного та теплового навантаження окремих частин машини: обмотка статора може бути недовантаженою, тоді як роторна обмотка — працювати в умовах підвищеного струмового навантаження. З огляду на тепловий стан машини струм у роторній обмотці під час роботи в генераторному режимі має дорівнювати або лише незначно перевищувати струм ротора в руховому режимі. Допустимим є певне збільшення цього струму, оскільки зниження навантаження на статор супроводжується зменшенням загального рівня тепловиділення в машині.

Отже, максимально допустима потужність генератора визначається гранично допустимим струмом роторної обмотки. Ця потужність може бути встановлена лише після визначення допустимого за умовами охолодження струму збудження. Саме цей параметр є одним із визначальних під час оцінювання можливості роботи асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора без конструктивної модернізації.

За наявності повних розрахункових даних конкретної електричної машини струм збудження холостого ходу може бути визначений за відповідними аналітичними залежностями, зокрема за формулами (1.22–1.25). Однак у практичних умовах зазвичай доступними є лише паспортні характеристики двигуна, що обмежує можливість прямого розрахунку параметрів магнітного кола.

Разом із тим використання довідкових матеріалів дає змогу отримати необхідні обмотувальні та конструктивні дані й з достатньою для інженерних розрахунків точністю визначити основні параметри магнітної системи машини. Зокрема, для багатьох типів електричних машин, окрім паспортних даних, у довідниках наводяться геометричні розміри активної частини: внутрішній і зовнішній діаметри статора, довжина осердя, діаметр ротора, кількість і розміри пазів, величина повітряного зазору, типи обмоток статора й ротора, кількість витків і паралельних гілок, параметри провідників, а також активні опори

обмоток.

На основі цих даних можна визначити основний магнітний потік, індукцію в повітряному зазорі, індуктивні опори обмоток та інші електромагнітні параметри машини. За відомого типу електротехнічної сталі або магнітних матеріалів, характерних для відповідного класу машин, можна також оцінити необхідну намагнічувальну силу для створення заданого магнітного потоку.

Таким чином, наявної довідкової та паспортної інформації зазвичай достатньо для виконання розрахунку магнітного кола в режимі холостого ходу. Оскільки в цьому випадку розглядається використання асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора, такі розрахунки доцільно виконувати за методиками, що застосовуються під час проєктування синхронних неявнополюсних машин. Це дає змогу коректно врахувати особливості формування магнітного поля, параметри збудження та вплив навантаження на електромагнітні характеристики генератора. [14, 25].

Подібний розрахунок було проведено для низки машин. З метою перевірки правильності запропонованого методу експериментально знято характеристику холостого ходу асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі синхронного генератора для двигуна АК-114-6, потужністю 320 кВт, напругою 380 В, синхронною частотою обертання 1000 об/хв. На рис.1.7 наведено розрахункову (1) та експериментальну (2) криві холостого ходу даної машини. Розрахунок та експеримент проведені для схеми обмотки ротора рис.1.1- а.

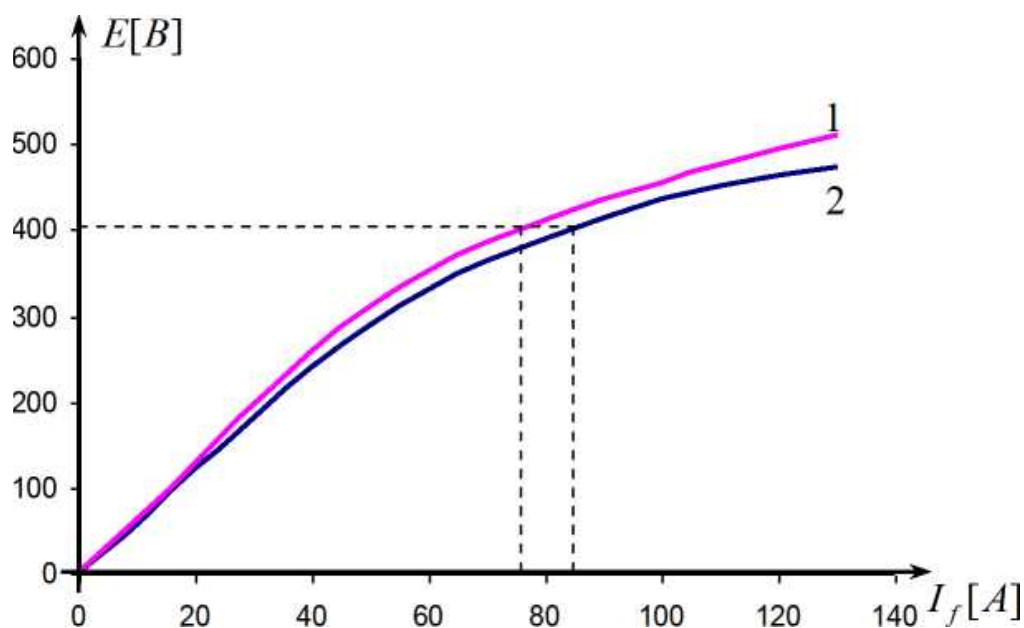


Рис. 1.7. Характеристика холостого ходу АДФ АК-144-6 у режимі СГФ
1 - розрахункова, 2 - експериментальна

Східність наведених кривих є досить високою, що підтверджує коректність запропонованої методики розрахунку магнітного ланцюга.

Відмінність цієї методики від традиційної пов'язане з відмінністю розв'язуваних завдань. Класична методика дозволяє, виходячи із заданих потужності, напруги, частоти обертання та ряду інших параметрів, визначити основні розміри машини, дані обмоток та електромагнітні навантаження.

У той час як мета пропонованого підходу полягає у визначенні допустимих електромагнітних навантажень і максимальної потужності генератора, що реалізується, при заданих напрузі, частоті обертання, обмотувальних даних і геометричних розмірах магнітного ланцюга.

На основі даних розрахунку, варіюючи електромагнітні навантаження, за допомогою діаграми Потьє та відомого числа витків обмотки збудження визначається струм збудження машини. При цьому для досягнення максимально можливої потужності генератора струм збудження повинен дорівнювати або трохи перевищувати номінальний струм ротора вихідної асинхронної машини.

У таб. 1.2 наведено дані максимально реалізованої потужності генераторного режиму ряду асинхронних двигунів. Так як машини призначені

для роботи в автономному режимі, тому приймаємо $\cos=0,85$, схема з'єднання обмотки збудження - рис. 1.1 а.

Максимально реалізована потужність генераторного режиму.

Таблиця 1.2

Тип двигуна	Номінальна потужність кВт	Частота обертання об/хв	Струм ротора номінальний А	Струм обмотки збудження А	Реалізована потужність генератора кВт	% реалізованої потужності
4AK16038	5,5	750	14	13,5	1,9	34,5
4AK160H6	10	1000	20	21	3,8	38
4AK20026	22	1000	45	47	10	45,5
4АНК280М6	110	1000	297	305	60	54,5
AK-114-6	320	1000	354	334	192	60
4АНК355М4	400	1500	485	504	242	60,5

На рис. 1.8 представлена залежність максимально реалізованої потужності генераторного режиму, що виражена у відсотках від номінальної потужності базового асинхронного двигуна.

З даних видно, що ця потужність знаходиться у відносно вузькому діапазоні - від 34 до 60% від потужності вихідного двигуна.

Збільшення реалізованої потужності генераторного режиму зі зростанням потужності базового двигуна пояснюється зниженням частки струму, що намагнічує, при збільшенні потужності двигуна. При цьому слід зазначити, що зі зменшенням коефіцієнта потужності $\cos$ максимально досяжна активна потужність генератора знижується. Це з збільшенням протидії реакції якоря, що потребує більшого струму збудження.

Оскільки зростання максимально реалізованої активної потужності асинхронного двигуна з фазним ротором, що працює в синхронному генераторному режимі, обмежується струмом збудження, його збільшення можливе лише при вжитті спеціальних заходів, що дозволяють розвантажити роторну обмотку рахунок струму збудження холостого ходу.

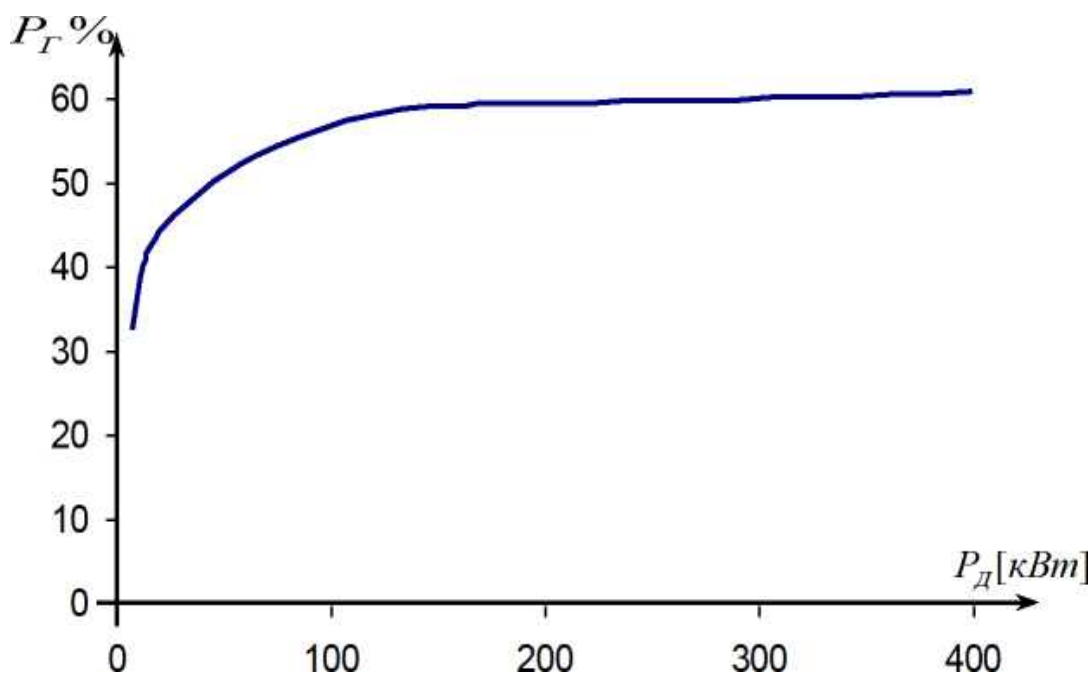


Рис. 1.8 Максимально реалізована потужність генераторного режиму, залежно від номінальної потужності базового АДФ.

Висновки

1. Запропоновано схеми роторної обмотки АДФ для використання як обмотки збудження СГФ.
2. Незважаючи на те, що, схема рис 1.1, забезпечує найбільшу НС, вона не може бути рекомендована для використання в якості ОВ СГФ, так як, по-перше, для її реалізації потрібна конструктивна переробка машини, по-друге, вона не відповідає вимогам, що пред'являються до обмоток збудження неявнополюсних синхронних генератор.
3. Амплітуда першої гармоніки НС для схеми рис 1.1, але в 12-14% вище, ніж схеми рис 1.1, б.
4. Показана фізична картина перерозподілу струму, що намагнічує, зі статора на ротор, при перекладі асинхронного двигуна з фазним ротором на роботу в синхронний генераторний режим.
5. Дано новий вираз коефіцієнта форми поля K_f СГФ, відрізняється від подібних виразів для неявно полюсних синхронних машин.

6. Дані формули для розрахунку струму збудження холостого ходу СГФ при відомому струмі, що намагнічує, базового двигуна.

7. Показано вплив несиметричного навантаження СГФ працювати його схеми порушення.

8. Запропоновано методику визначення максимально реалізованої потужності СГФ. На основі розрахункових даних наведено залежність максимально реалізованої потужності СГФ від номінальної потужності базового АДФ.

Глава 2. АНАЛІЗ РОБОТИ АСИНХРОННОГО ДВИГУНА З ФАЗНИМ РОТОРОМ, ЩО ПРАЦЮЄ В РЕЖИМІ СИНХРОННОГО ГЕНЕРАТОРА

2.1 Аналіз характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором як синхронного генератора

Асинхронний двигун із фазним ротором, що функціонує в режимі синхронного генератора, за своїми електромагнітними процесами може розглядатися як різновид синхронної електричної машини. Відповідно, аналіз його робочих характеристик доцільно виконувати з використанням підходів, прийнятих для дослідження стандартних синхронних генераторів.

Слід зазначити, що під час аналізу характеристик синхронних генераторів у більшості випадків основна увага приділяється куту φ , який характеризує характер зовнішнього навантаження, тобто співвідношення між активною та реактивною складовими струму [10, 21]. Аналогічний підхід використовується і в аналітичних залежностях, що застосовуються для фізичного пояснення режимів роботи генератора.

Водночас у значній частині таких досліджень приймається спрощувальне припущення $r=0$, тобто внутрішні активні опори обмоток генератора не враховуються. Таке припущення є достатньо обґрунтованим для потужних синхронних генераторів, у яких індуктивний опір істотно перевищує активний, а вплив останнього на результати розрахунку є відносно незначним.

Для генераторів малої та середньої потужності, до яких можуть бути віднесені асинхронні двигуни з фазним ротором у режимі синхронного генератора, зазначене припущення не завжди є коректним. У таких машинах активний та індуктивний опори можуть бути співмірними, тому нехтування активним опором здатне призвести до суттєвих похибок під час аналізу електромагнітних характеристик, режимів навантаження та умов стабілізації вихідної напруги.

Отже, під час дослідження асинхронної машини з фазним ротором у синхронному генераторному режимі необхідно враховувати не лише характер

зовнішнього навантаження, а й внутрішні активні опори обмоток. Це забезпечує більш коректне оцінювання параметрів генератора, його навантажувальних характеристик і можливостей роботи в автономних системах електропостачання.

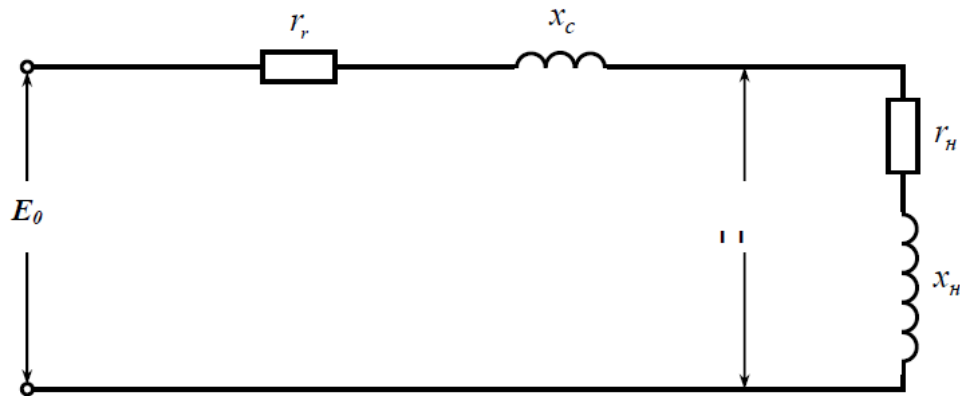


Рис. 2.1. Схема заміщення однієї фази синхронного генератора.

При активно-індуктивному навантаженні зі зростанням навантаження (зі зменшення x і r) характер реакції якоря все більше визначатиметься внутрішнім опором генератора. У граничному випадку, при короткому замиканні характер реакції визначається співвідношенням $\frac{x_c + x_n}{r_r}$. Таке ж висновок r_r можна зробити за суто активного навантаження.

Цікавим є випадок активно-ємнісного навантаження. При цьому характер всього ланцюга визначається різницею $X_c - X_n$. На початку, в ланцюзі переважає ємнісний опір. Тоді, при прояві струму навантаження, кут буде негативним, тобто. поряд з поперечною, діятиме і подовжньо намагнічує реакція якоря. Зі зростанням навантаження кут ϕ по абсолютній величині зменшуватиметься. При $X_c = X_n$ кут $\phi = 0$, а реакція якоря - суто поперечна. При подальшому збільшенні навантаження $X_c > X_n$ ланцюг стає активно-індуктивною, а подовжня реакція - розмагнічує.

Таким чином, незалежно від виду навантаження, з її зростанням, після певного значення, реакція якоря стає розмагнічує і впливає на характеристики машини.

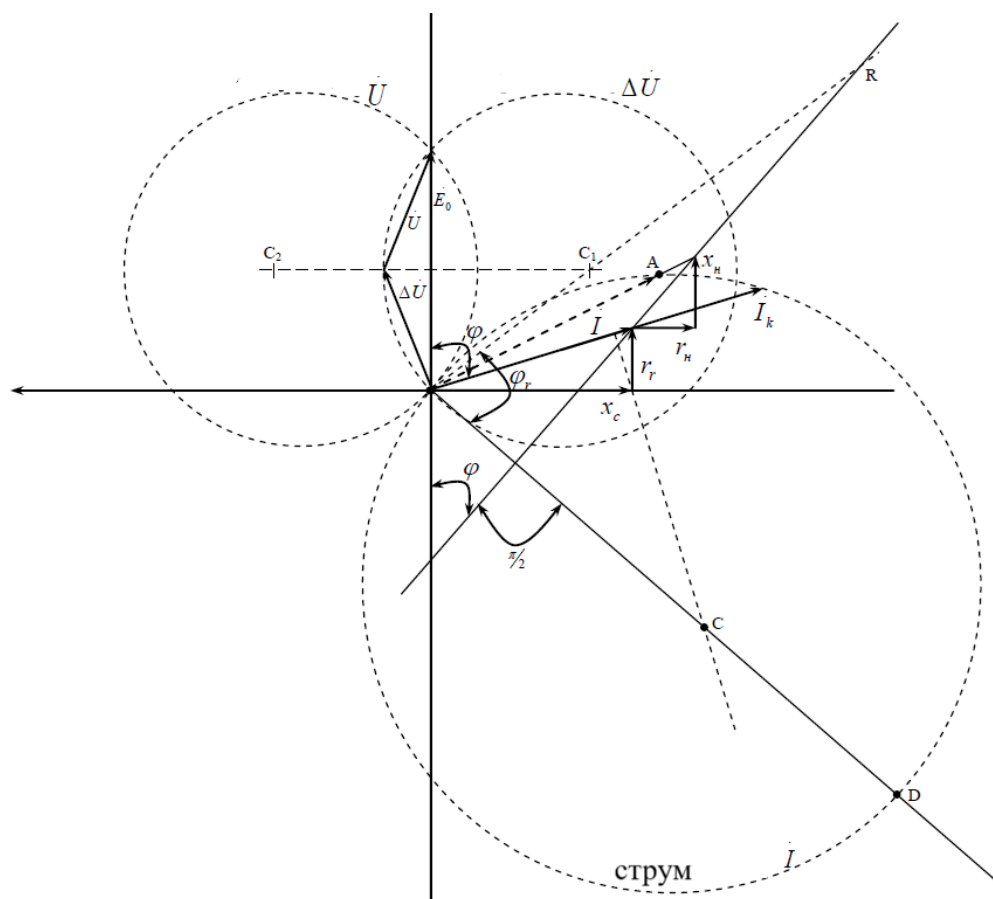
Розглянемо вплив кутів ϕ та θ на характеристики синхронного генератора.

Як уже зазначалося вище, машина вважається ненасиченою, тому можна скористатися діаграмою Бен-Ешенбурга. Крім того, скористаємося круговими діаграмами. Для неявнополюсного генератора справедливий вираз

$$\underline{E}_0 = \underline{U} + j\underline{I}x_c + \underline{I}r_r \quad (2.1)$$

Виходить точка К. Відрізок ОК є хордою кругової діаграми. З початку координат проводимо пряму ОД, яка перпендикулярна до лінії Z_Q . Знаходимо центр кругової діаграми, як точку перетину прямої ОД і перпендикуляра, що сягає середини хорди ОК. Відрізок ОС є радіусом. Отримане коло є діаграмою струму. Якщо потрібно визначити струм для якогось приватного значення z_K , то достатньо відкласти Z_H від кінця Z_r і отриману точку F з'єднати з початком О. Тоді кінець А шуканого вектору струму знайдеться як перетин променя OF з колом струму.

Кут α , складений вектором струму з речовинною віссю, по якій спрямований вектор E_0 є кутом зсуву струму щодо ЕРС E_0 . Чисельне значення COS можна визначити, побудувавши з центру, що лежить на речовій осі коло, що проходить через початок і має діаметр, рівний 100 довільній одиниці довжини. Точка перетину цього кола з колом струму з'єднується з початком координат. Тоді число вибраних одиниць довжини, що вміщуються в цьому відрізку, дасть число таких часток у значенні cos, що відповідає даному вектору струму.



2.2 . Побудова кругової діаграми синхронного генератора. Коло $\underline{A U}$ пройде через початок і через кінець вектора E_0 . Від середини вектора E_0 проводять перпендикуляр. Точка $З$ перетину перпендикуляра з променем OR буде центром кола $\underline{A U}$. Крива $\underline{U}$ утворює коло. Її центр 2 є дзеркальним зображенням точки C_1 на речовій осі.

Для визначення векторів $\underline{A U}$ і $\underline{U}$ відповідних даному вектору струму I слід з початку O провести промені, що складають кути φ і φ з даним вектором струму. Точки перетину променів з колами $\underline{A U}$ і $\underline{U}$ визначають кінці векторів шуканих $\underline{A U}$ і $\underline{U}$.

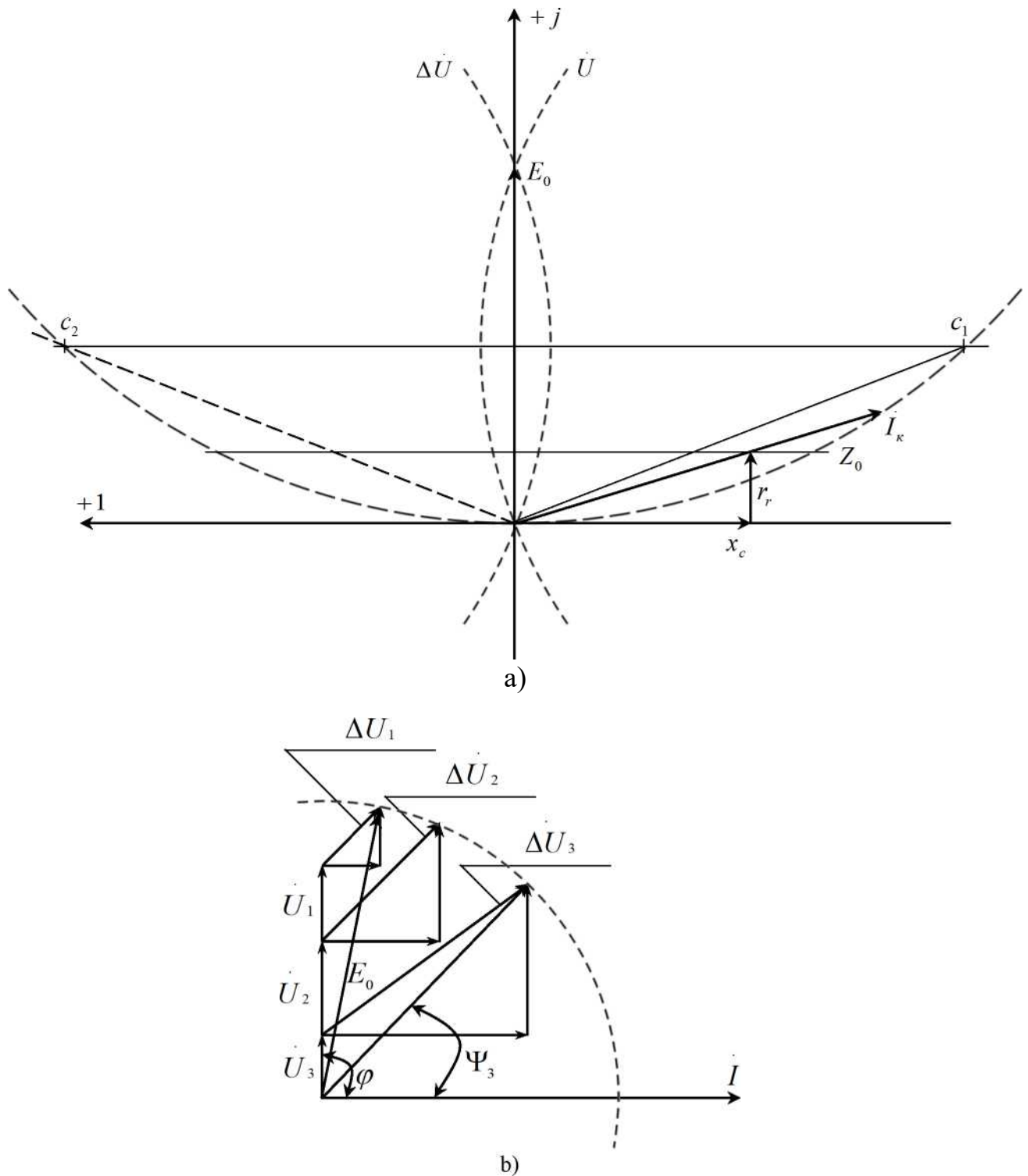


Рис. 2.3 . Кругова та векторна діаграма

Розглянемо випадок, коли навантаження має суто ємнісний характер .

На круговій діаграмі струм навантаження змінюється дугою ОВК (рис. 2.6а). При неодруженому ході, коли $I = 0$, $\underline{U} = E_o$ (точка 1, рис. 2.6 а, б). Так як навантаження має ємнісний характер, то при виникненні струму навантаження в генераторі з'являється подовжньо-намагнічує реакція якоря. В результаті

напруга на затискачах генератора підвищиться (Струм I_2 і напруга U_2 на рис. 2.6а і точка 2 на рис 2.6b). При подальшому збільшенні струму навантаження напруга на затискачах генератора підвищується і досягає максимуму при значенні струму I_3 (рис. 2.6 а U_3 і точка 3, рис 2.6 b). Одночасно збільшується кут між ЕРС E про та струмом навантаження I . Можна визначити значення струму, у якому напруга на затискачах генератора має максимальне значення. З векторної діаграми (рис. 2.4b) отримуємо

$$E_0 \sin \psi + \frac{E_0 \cos \psi}{\operatorname{ctg} \varphi_r} = U \quad (2.3)$$

Прирівнявши похідну до нуля, отримуємо рівняння

$$\cos \psi \cdot \operatorname{ctg} \varphi_r - \sin \psi = 0$$

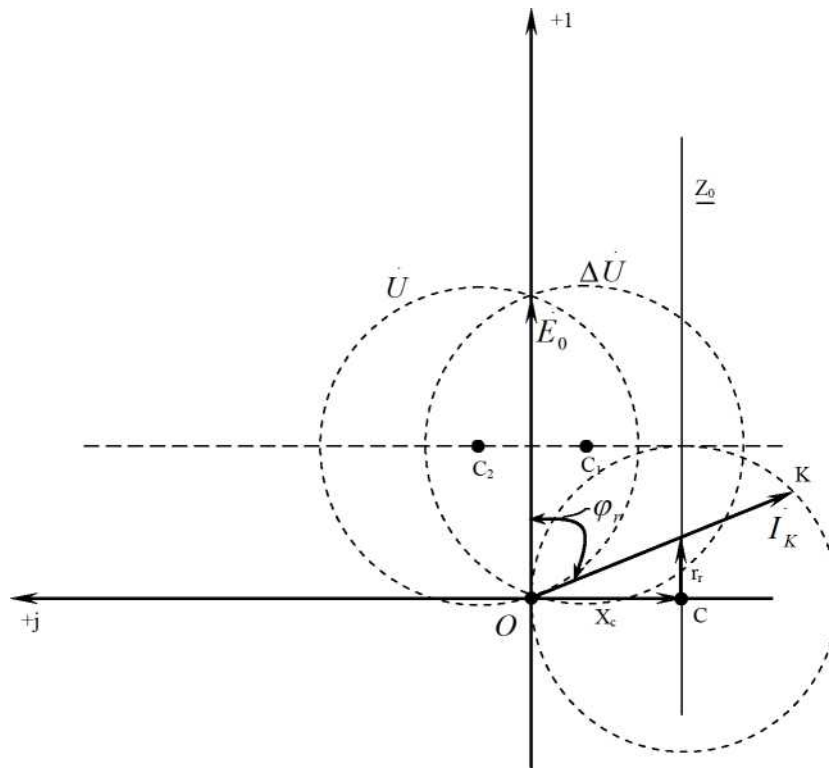
Рішення якого має вигляд

$$\psi = \frac{\pi}{2} - \varphi_r \quad (2.4)$$

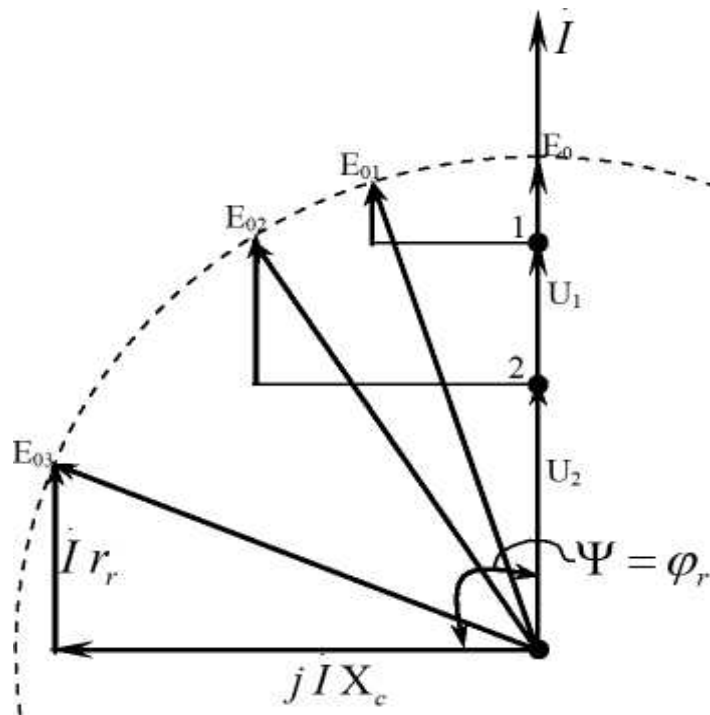
Вирішивши дане рівняння, отримаємо значення опору ємнісного навантаження, при якому напруга на затискачах генератора буде максимальною

$$x_n = \frac{x_c^2 + r_r^2}{x_c} \quad (2.5)$$

Без урахування активного опору генератора максимальне підвищення напруги вийшло б за значення $\psi=0$.



а)

Рис. 3.4-(а) Кругова діаграма при $\varphi=0$ 

б)

Рис. 3.4- (b) Векторна діаграма при $\varphi=0$

Величина навантаження, при якій вийде максимальна напруга,

співвідношення опору генератора X з Γr , тоді отримаємо:

$$\frac{x_n}{x_c} = \frac{1 + \alpha^2}{\alpha^2}$$

$$\frac{x_n}{x_c} = f(\alpha)$$

На рис. 3.5 показано криву залежності $\frac{x_n}{x_c}$.

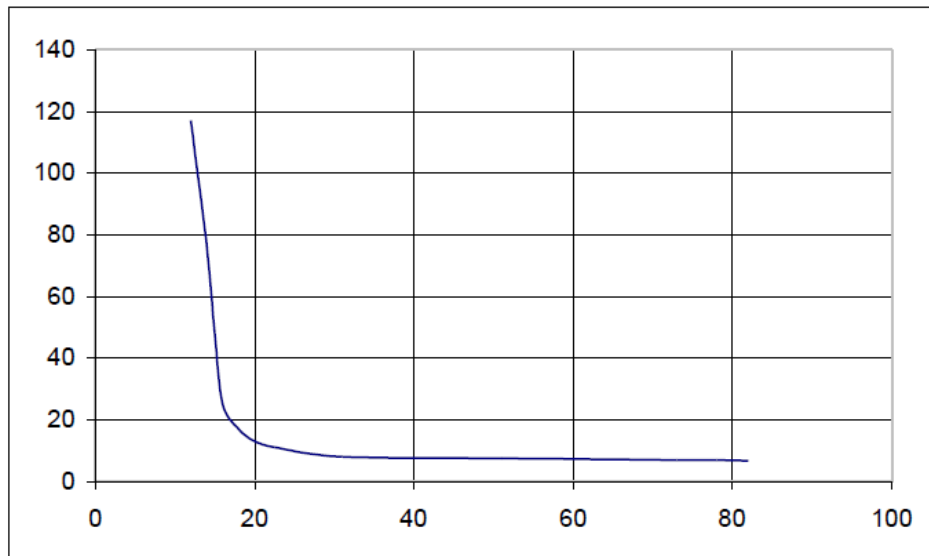


Рис. 3.5 Залежність

У разі, при значенні $\psi = 0$ струм навантаження приймає максимальне значення, т.к. реактивні опори генератора та навантаження взаємокомпенсуються (I_4 і U_4). Після цього кут ψ збільшується та набуває індуктивного характеру.

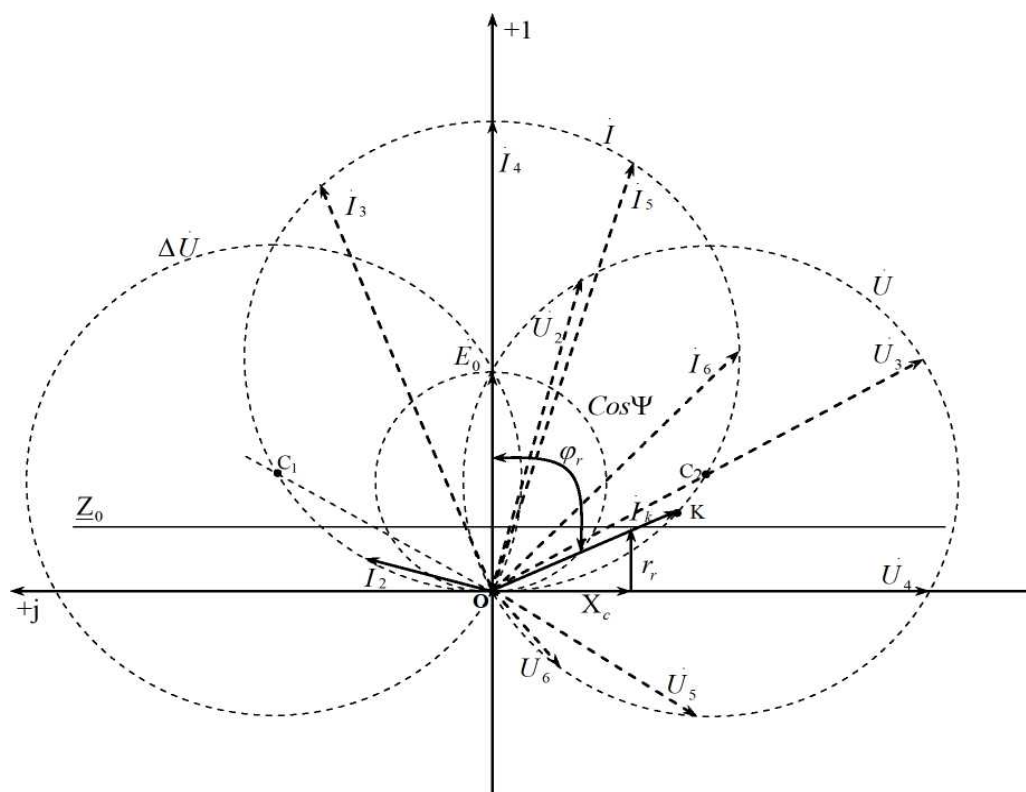


Рис. 2.6(а) - Кругова діаграма при $\varphi=90$

Струм навантаження починає зменшуватися, так само зменшується напруга на затискачах генератора і при значенні струму I_5 напруга стає рівним E_0 (I_5 і U_5). При короткому замиканні $U=0$, ЕРС - E_0 врівноважується падінням напруги на внутрішньому опорі генератора. На рис. 2.7 наведено зовнішні характеристики синхронного генератора.

При суто індуктивному та активному навантаженні зовнішні характеристики мають падаючий характер. При чисто ємнісному навантаженні характеристика піднімається до точки 3 потім падає. Після точки 5 починається нестійка область. Крпка K_0 є точкою короткого замикання. У точках 1 та 5 напруга на затискачах генератора дорівнює напрузі холостого ходу $U = E_0$

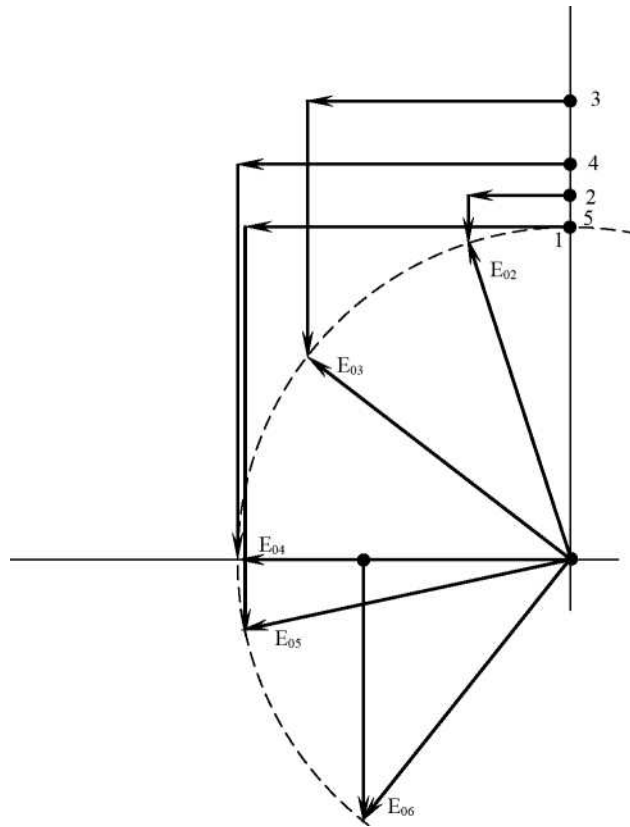


Рис. 2.6 (b) - Кругова діаграма при $\varphi = -90$

Розглянемо регулювальні характеристики $i_f = f(I)$ при $u = \text{const}$ та $\cos \varphi = \text{const}$.

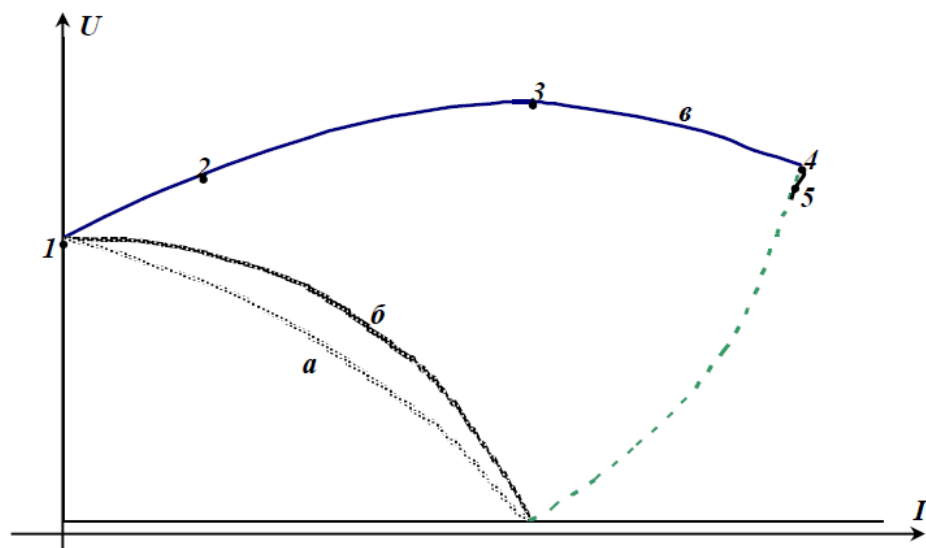


Рис 2 .7 Зовнішні характеристики синхронного генератора - а) $\varphi = 90$ б) $\varphi = 0$
в) $\varphi = -90$

На рис. 2.8, 2.9, 2.10 показані векторні діаграми Бен-Ешенбурга, за допомогою яких можна побудувати регульовальні характеристики ненасиченого явно полюсного генератора.

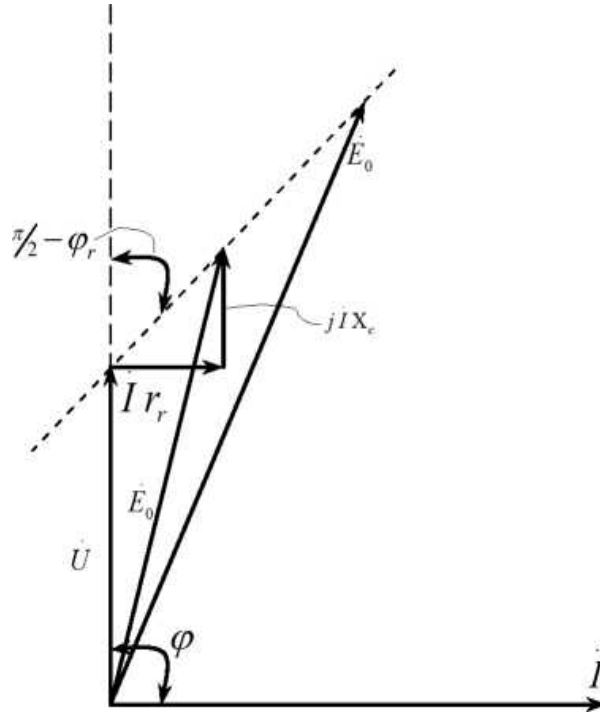


Рис. 2.8 Векторна діаграма для випадку $u = \text{const}$, $\varphi = 90^\circ$

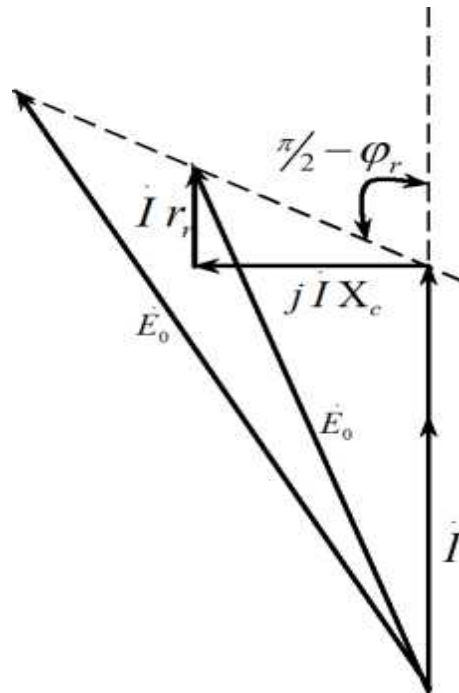


Рис. 2.9 Векторна діаграма для випадку $u = \text{const}$, $\varphi = 0^\circ$

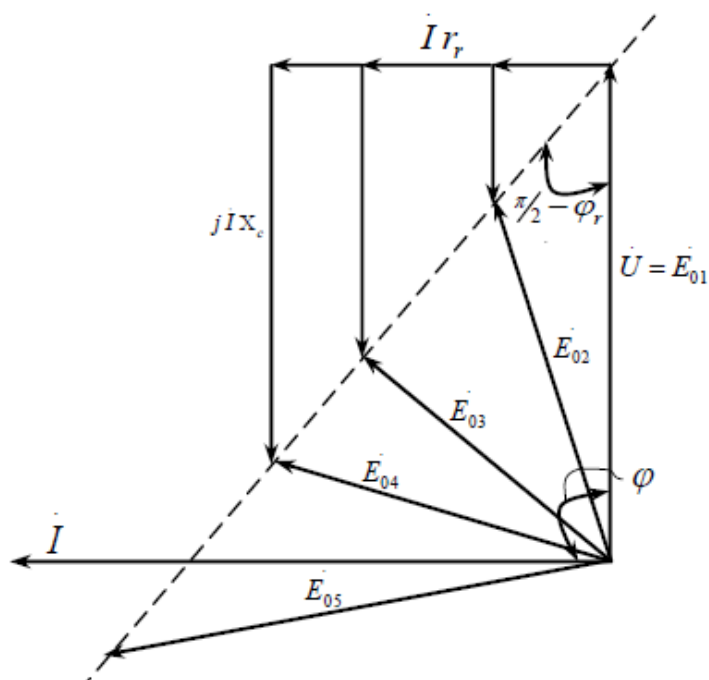


Рис. 2.10 Векторна діаграма для випадку $u = const$, $\varphi = -90$

Регулювальні характеристики представлені на рис. 2.11. При суто індуктивному навантаженні реакція якоря переважно подовжньо-розмагнічує (рис. 2.8). Тому для виконання умови $u = const$ зі зростанням навантаження необхідно підвищувати ЕРС E_0 або іншими словами, струм збудження I (рис. 2.11, крива а). При суто активному навантаженні реакція якоря переважно поперечна (рис. 2.9). При збільшенні навантаження зростає і кут δ . Для виконання умови $u = const$ необхідно збільшувати струм збудження, але інтенсивність зростання I буде нижчою (рис. 2.11, крива б). При чисто ємнісному навантаженні (рис. 2.10) на початку кут *негативний* і тому зі зростанням навантаження напруга на затискачах машини повинна зростати. Тому для виконання умови $u = const$ необхідно зменшувати i . (Рис. 2.11, крива с).

За певної величини навантаження струм збудження I стає мінімальним (точка 3 на рис. 2.11 с). При подальшому збільшенні навантаження,

незважаючи на те, що кут φ залишається негативним і струм навантаження має ємнісний характер, для підтримки напруги постійним постійно доводиться збільшувати I (точка 4, рис 2.11). Після цього кут *стає* позитивним (рис. 2.10) і природно, зі зростанням навантаження струм i_f необхідно збільшити (рис 2.11, точка 5).

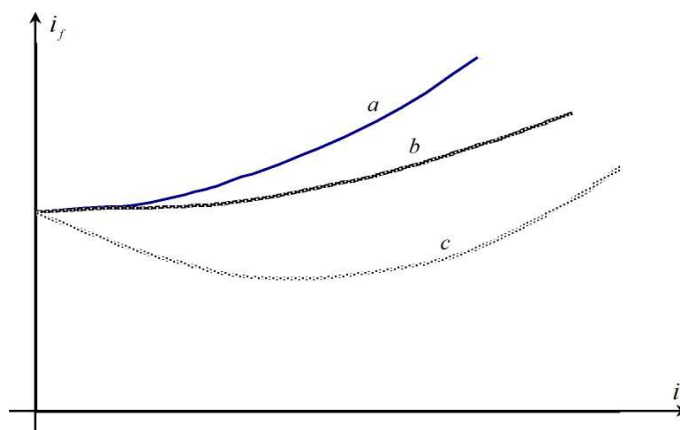
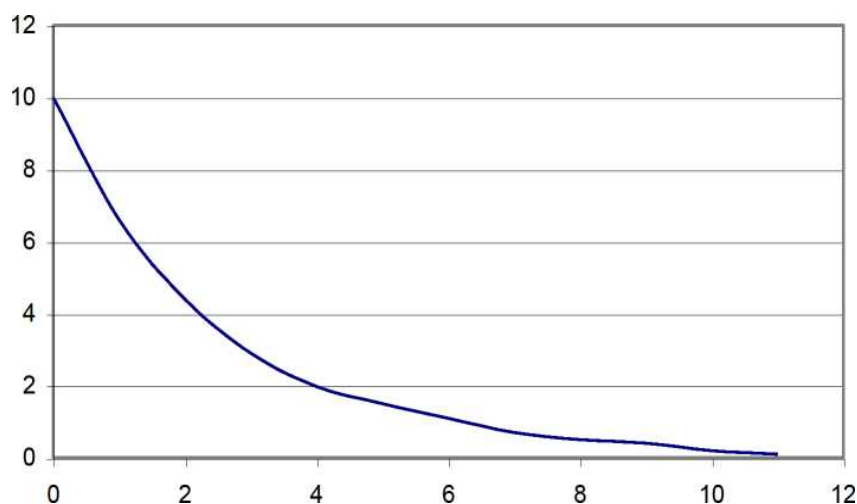


Рис. 2.11 Регулювальні характеристики синхронного генератора
а) $\varphi = 90^\circ$ б) $\varphi = 0^\circ$ в) $\varphi = -90^\circ$

Таким чином, для зменшення струмового навантаження роторної обмотки асинхронного двигуна з фазним ротором у генераторному режимі та, відповідно, підвищення допустимої вихідної потужності машини доцільно частково компенсувати намагнічувальну складову струму. Це може бути забезпечено шляхом підключення до генератора ємнісного навантаження, зокрема конденсаторних батарей, які формують необхідну реактивну потужність відповідно до залежності (2.5).



$$\frac{E_0 \min}{U} = \frac{1}{\sqrt{1-\alpha^2}} = f(\alpha)$$

Рис. 2.12. Залежність

2.2. Синхронне самозбудження асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі синхронного генератора

Як зазначалося раніше, для зменшення навантаження роторної обмотки струмом намагнічування доцільно підключити до генератора конденсаторну батарею, яка забезпечує часткову компенсацію реактивної складової струму.

Відомо, що під час роботи синхронного генератора на ємнісне навантаження можливе виникнення явища самозбудження. Самозбудженням називають електромагнітний перехідний процес, за якого напруга на затискачах генератора може зростати навіть за відсутності зовнішнього струму збудження або за його недостатнього значення. Це явище пов'язане з обміном реактивною енергією між індуктивними елементами електричної машини та ємнісним навантаженням.

Самозбудження генератора може мати синхронний або асинхронний характер. Для побудови математичної моделі відповідного перехідного процесу необхідно прийняти низку спрощувальних припущень, які дають змогу лінеаризувати задачу та застосувати аналітичні методи її розв'язання.

У межах такого підходу приймаються такі припущення:

Параметри електричної машини вважаються лінійними, тобто не враховуються гістерезис, насичення магнітної системи, втрати в сталі та вплив вихрових струмів.

Просторовий розподіл параметрів кіл статора вважається синусоїдальним; при цьому вищі гармоніки магнітного поля не враховуються, а аналіз обмежується основною гармонікою.

Система фаз статора розглядається як симетрична.

Несиметричні режими роботи приводяться до еквівалентних симетричних складових із використанням методу симетричних складових.

Прийняття зазначених припущень дає змогу застосовувати операторний метод для аналізу перехідних електромагнітних процесів. У загальному випадку для синхронних ненасичених машин без автоматичного регулятора збудження та за умови сталої частоти обертання ротора перехідні процеси описуються системою лінійних неоднорідних диференціальних рівнянь. Рішення системи щодо i_d та i_q дає:

$$\begin{aligned} i_d(p) &= \frac{D_1(p)}{D(p)} \text{ и} \\ i_q(p) &= \frac{D_2(p)}{D(p)} \end{aligned} \quad (2.6)$$

Самовзбудження сприймається як прояв електромагнітної нестійкості генератора під час роботи на ємнісне навантаження. Відповідно до теореми Ляпунова, рух системи є нестійким, якщо характеристичне рівняння містить коріння з позитивною речовиною. Отже, ймовірність виникнення самозбудження визначається наявністю таких коренів у характеристичному рівнянні.

Так як асинхронний двигун з фазним ротором в режимі синхронного генератора є неявнополюсною машиною, то $X_d = X_q$ і для коефіцієнта a матиме форму

$$a_5 = (x_n - x_d)^2 + r_r^2 > 0 \quad (2.7)$$

Виходячи з цього виразу, можна сказати, що в асинхронному двигуні з фазним ротором у режимі синхронного генератора синхронне самозбудження не може виникнути.

2.3. Асинхронне самозбудження асинхронного двигуна з фазним ротором у режимі синхронного генератора

Асинхронний двигун із фазним ротором, що працює в режимі

синхронного генератора, за характером електромагнітних процесів наближається до звичайного синхронного генератора. Водночас принциповою особливістю такої машини є те, що в ній не виникає синхронне самозбудження. Конденсаторна батарея, підключена до генератора, забезпечує зменшення струму збудження до мінімально необхідного рівня, тим самим розвантажуючи роторну обмотку. Однак для початкового збудження машини необхідне зовнішнє джерело постійного струму. За відсутності такого джерела та наявності конденсаторів можливе виникнення асинхронного збудження, тобто реалізація режиму асинхронного самозбудження в автономній системі [10, 11]. У цьому разі машина фактично функціонує як автономний асинхронний генератор із самозбудженням.

У науковій літературі існують різні підходи до пояснення механізму та умов виникнення самозбудження в асинхронних генераторах. Згідно з одним із підходів, цей процес ототожнюється із самозбудженням генераторів постійного струму [6]. У межах такого трактування вважається, що початкова електрорушійна сила синхронної частоти індукується залишковою індукцією ротора. Незважаючи на наочність цього підходу, він не дає вичерпного пояснення механізму переходу синхронних коливань ЕРС в асинхронні на початковій стадії процесу, а також не розкриває ролі струму ротора. Зокрема, цей підхід не пояснює, чому самозбудження не виникає в асинхронній машині з ротором у вигляді суцільних шихтованих сталевих кілець навіть за наявності значної залишкової індукції [8].

Інший підхід розглядає процес самозбудження автономного асинхронного генератора як прояв властивостей автоколивальної системи [3–6]. У межах цього підходу виділяють два основні режими самозбудження: жорсткий і м'який. Жорстке самозбудження характерне для автономних асинхронних генераторів із немагнітним ротором, а також частково для машин із феромагнітним ротором у зоні нестійкого збудження [3, 25]. Для виникнення такого режиму необхідне достатньо інтенсивне електричне збудження з боку статора. Якщо ротор перебуває у розмагніченому стані, ініціювання процесу

може потребувати короткочасного збільшення ємності конденсаторів збудження [13]. М'яке самозбудження, на відміну від жорсткого, можливе лише за наявності залишкової індукції в роторі.

Відповідно до [14], характер зміни індуктивності намагнічувального контуру Г-подібної схеми заміщення — монотонний або немонотонний — а також тип режиму самозбудження значною мірою визначаються величиною залишкової індукції ротора. У роботі [17] показано, що автономний асинхронний генератор із феромагнітним короткозамкненим ротором виявляє переважно жорсткий характер самозбудження, у якому залишкова індукція ротора виконує функцію початкового збуджувального імпульсу.

Залишкова індукція ротора залежить від сукупності електромагнітних і режимних чинників. Під час роботи генератора в асинхронному режимі самозбудження вектор обертового магнітного поля переміщується відносно ротора. Тому після відключення конденсаторів збудження положення вектора залишкової індукції відносно ротора набуває випадкового характеру. Імовірність того, що після завершення асинхронного режиму цей вектор повернеться до попереднього просторового положення, є незначною.

Найінтенсивніше розмагнічування ротора відбувається у разі раптового короткого замикання, коли конденсатори збудження шунтуються. Це пояснюється дією поздовжньої розмагнічувальної реакції статора. Після кожного випадку асинхронного самозбудження просторове положення вектора залишкової індукції ротора змінюється. При цьому відбувається не повне руйнування намагніченості, а обертальне перемагнічування магнітного матеріалу ротора, подібне до процесів, характерних для гістерезисних машин [5].

Оскільки ротор автономного асинхронного генератора виготовлений із феромагнітного матеріалу, його поведінку можна умовно порівняти з феромагнітним носієм інформації. У такій аналогії робота генератора в асинхронному режимі самозбудження відповідає процесу «запису» магнітного стану, робота в синхронному режимі — його «відтворенню», а коротке замикання або інші розмагнічувальні впливи — процесу «стирання» магнітної

інформації.

Після усунення короткого замикання повторне асинхронне самозбудження сприяє збільшенню залишкової індукції ротора. Водночас положення її вектора залишається випадковим і визначається просторовим положенням обертового магнітного поля в момент відключення конденсаторів. Отже, ротор фіксує своєрідну «останню інформацію» про просторове положення основного обертового магнітного поля машини.

На відміну від генератора з постійними магнітами, у якому магнітна система намагнічується за допомогою спеціальних технологічних установок, в автономному асинхронному генераторі намагнічування ротора здійснюється безпосередньо магнітним полем статора. Це дає підстави розглядати автономний асинхронний генератор як машину, близьку за електромагнітною природою до гістерезисної. Наявність гістерезисного моменту в асинхронній машині з короткозамкненим ротором є відомим явищем [21].

Таким чином, до моменту виникнення асинхронного самозбудження автономний асинхронний генератор доцільно розглядати як гістерезисну машину, що має короткозамкнену демпферну обмотку та працює в режимі асинхронного генератора.

Під час підключення конденсаторів до обмотки статора та поступового збільшення їх ємності від нульового значення спостерігається зростання електрорушійної сили. На цій стадії асинхронний генератор функціонує в синхронному режимі. За аналогією із синхронними генераторами, збільшення ЕРС зі зростанням ємності пояснюється дією поздовжньої намагнічувальної реакції статора, або реакції якоря. У цьому режимі генератор зберігає стійкість синхронної роботи, оскільки гальмівний гістерезисний момент ще не досягає свого максимального значення.

Перехід від синхронних коливань до асинхронного режиму відбувається поступово. Із збільшенням ємності конденсаторів збудження зростає струм у статорній обмотці, збільшуються електричні втрати та кут навантаження Θ . Це зумовлює зростання гістерезисного моменту. Коли його значення досягає

максимуму, що визначається магнітними властивостями ротора, його об'ємом і величиною індукції в повітряному зазорі, генератор втрачає синхронізм. У цей момент вектор магнітного поля ротора починає зміщуватися відносно самого ротора з певним ковзанням S , а магнітний матеріал ротора зазнає перемагнічування.

У короткозамкнутій обмотці ротора при цьому виникають ЕРС та струми, і разом з гістерезисним моментом в автономному асинхронному генераторі з'являється відповідний електромагнітний асинхронний момент. Максимальний гістерезисний момент і пов'язаний з ним максимальний кут навантаження Θ не залежать від ковзання S і вважаються незмінними в асинхронному режимі, що встановився.

Асинхронний електромагнітний момент виникає ще до досягнення гістерезисним моментом свого максимуму, так як у міру збільшення гістерезисного моменту від нуля до максимального значення кут навантаження Θ збільшується, що супроводжується переміщенням вектора поля щодо ротора гістерезисної машини [19].

Таким чином, у процесі самозбудження кут навантаження зростає від нуля до $\Theta_{\max}$, а далі генератор випадає із синхронізму. Ковзання зростає від нуля до деякого значення, при якому настає баланс амплітуд та фаз. Оскільки безперервне збільшення кута θ супроводжується відповідним відставанням поля від ротора, можна вважати, що ковзання S виникає миттєво, при підключенні конденсаторів збудження і синхронні коливання переходять в асинхронні коливання.

Якщо ємність конденсаторів мала, кут навантаження Θ збільшується лише до певного значення меншого максимального $\Theta_{\max}$.

У цьому випадку після короткочасних коливань кута Θ встановлюється рівновага між гістерезисним моментом і зовнішнім моментом на валу.

Як відомо, повний електромагнітний момент гістерезисного генератора складається з двох компонентів: моменту, зумовленого втратами на гістерезі, і

моменту, що виникає внаслідок втрат на вихрові струми [1].

$$\begin{aligned}
 M &= M_r + M_{mx} \\
 M_r &= \frac{P_r}{\omega_c} = f \sigma_n B_n^2 V \\
 M_{bx} &= \frac{P_{bx}}{\omega_c} = \frac{(sf)^2 \sigma_w B_n^2 V}{\omega_c}
 \end{aligned}
 \tag{2.8}$$

Настання рівноваги електромагнітних моментів свідчить про збереження генератором синхронного режиму роботи. У цьому випадку короткозамкнена обмотка ротора виконує функцію демпферної обмотки, формуючи стабілізувальний момент, який протидіє коливанням кута навантаження Θ та сприяє динамічній стійкості машини.

Асинхронний генератор характеризується переважно жорстким режимом самозбудження. Це означає, що для виникнення асинхронних електромагнітних коливань необхідна наявність початкового збуджувального імпульсу певної величини. Такий імпульс може бути сформований як з боку статора, наприклад у разі підключення попередньо заряджених конденсаторів, так і з боку ротора — за рахунок залишкової індукції.

На відміну від короткочасного зовнішнього імпульсу, залишкова індукція ротора під час його обертання діє на електромагнітні процеси в машині безперервно. Її вплив проявляється у формуванні гістерезисного моменту, величина якого залежить від ковзання S . Саме цей момент може відігравати роль початкового чинника, що сприяє розвитку процесу асинхронного самозбудження.

Необхідна величина початкового імпульсу, тобто рівень залишкової індукції та відповідна їй електрорушійна сила, достатні для стійкого асинхронного самозбудження, визначається параметрами конденсаторної батареї, зокрема її ємністю.

Якщо ротор значною мірою розмагнічений, наприклад унаслідок дії

струмів короткого замикання, для ініціювання асинхронних коливань необхідно забезпечити додатковий вплив на генератор. Це може бути реалізовано кількома способами:

підсиленням імпульсу, зумовленого залишковою індукцією ротора, за допомогою статора шляхом короткочасного подавання на статорну обмотку невеликої трифазної або однофазної напруги;

короткочасним збільшенням ємності конденсаторної батареї з подальшим поверненням її до початкового значення після встановлення асинхронного режиму;

підсиленням роторного імпульсу шляхом збільшення залишкової індукції ротора.

Для підвищення залишкової індукції в окремих технічних рішеннях пропонується розміщення постійного магніту на статорі або роторі електричної машини [18]. Такий підхід дає змогу створити додаткове джерело початкового магнітного поля, необхідного для запуску процесу самозбудження.

Для асинхронного генератора з фазним ротором застосування спеціальних заходів щодо збільшення залишкової індукції, як правило, не є необхідним. Це пояснюється тим, що під час роботи машини в синхронному генераторному режимі ротор додатково підмагнічується постійним струмом, який подається в обмотку збудження. Таким чином, у роторі підтримується магнітний стан, достатній для формування початкових умов самозбудження.

2.4. Диференціальні рівняння та розрахунок перехідних процесів асинхронного генератора з урахуванням насичення

Раніше було розглянуто фізичну сутність процесу самозбудження асинхронного конденсаторного генератора та проаналізовано особливості його усталеного режиму роботи. Водночас окремий науковий інтерес становить дослідження перехідних процесів в автономному асинхронному генераторі, зокрема початкової стадії самозбудження.

У роботі [3] наведено математичний опис асинхронної машини з урахуванням насичення головного магнітного кола. Як шукані функції, тобто змінні інтегрування, у цій моделі прийнято повні потокозчеплення електричної машини. Коригування значення індуктивного опору взаємоіндукції x_m виконується на кожному кроці інтегрування шляхом розв'язання системи двох алгебраїчних рівнянь: рівняння прямої та рівняння характеристики намагнічування асинхронної машини. У результаті визначається поточне значення параметра x_m .

У роботах [4, 5] подано математичний опис насиченої неявнополіусної машини змінного струму із застосуванням диференціальних індуктивностей. Однак алгоритм розв'язання відповідної системи диференціальних рівнянь, коефіцієнтами якої є диференціальні індуктивності, потребує на кожному кроці інтегрування обернення матриці коефіцієнтів. Це істотно ускладнює обчислювальну процедуру та підвищує вимоги до чисельної реалізації моделі.

У роботі [16] також використовується операція обернення матриць, однак лише для аналізу процесу самозбудження та без урахування насичення магнітного кола. Отже, наявні підходи або потребують додаткового розв'язання алгебраїчних рівнянь на кожному інтеграційному кроці, або не повною мірою враховують нелінійні властивості магнітної системи машини.

У цьому параграфі отримано систему диференціальних рівнянь і запропоновано метод розрахунку перехідних процесів автономного асинхронного генератора з урахуванням насичення головного магнітного кола. Особливістю запропонованого підходу є те, що його реалізація не потребує додаткових процедур, пов'язаних із розв'язанням систем алгебраїчних рівнянь або оберненням матриць коефіцієнтів на кожному кроці чисельного інтегрування.

Аналіз електромагнітних процесів в асинхронному генераторі здійснюється за таких припущень:

Значення потоку взаємоіндукції не впливає на індуктивні опори розсіювання обмоток статора та ротора, які приймаються сталими.

Гістерезисом сталі статора і ротора нехтують. Вважається, що вектор потоку взаємодукції та відповідний вектор потокозчеплення $\vec{W}_0$ є колінеарними вектору намагнічувального струму $\vec{i}_0$.

Магнітопровід насичується поступово в усьому об'ємі, тобто ефект явноплюсності ротора, який може виникати внаслідок насичення, не враховується.

Прийняття зазначених припущень дає змогу розглядати асинхронний генератор як ідеалізовану асинхронну машину, що описується класичними рівняннями електромагнітних процесів. Диференціальні рівняння такої машини є достатньо відомими та широко застосовуються для аналізу перехідних режимів електричних машин змінного струму [17]. Диференціальні рівняння асинхронного генератора у векторній формі мають вигляд:

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\vec{\psi}_1}{dt} &= \vec{u}_1 - \vec{i}_1 r_1; \\ \frac{d\vec{\psi}_2}{dt} &= \vec{u}_2 - \vec{i}_2 r_2 + j\omega \vec{\psi}_2; \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Вирішуючи систему рівнянь (2.9) щодо струмів, отримаємо

$$\left. \begin{aligned} \vec{i}_1 &= \frac{1}{L_1} (\vec{\psi}_1 - \vec{\psi}_0) \\ \vec{i}_2 &= \frac{1}{L_2} (\vec{\psi}_2 - \vec{\psi}_0) \\ \vec{\psi}_0 &= \frac{\vec{\psi}_1 L_2 + \vec{\psi}_2 L_1}{L_1 + L_2 + \frac{L_1 L_2}{L_m}} \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Система диференціальних рівнянь (2.10) спільно з системою рівнянь алгебри (2.8, 2.9) мають нелінійний характер, викликаний нелінійною

залежністю результуючого потокозчеплення ψ від потোকосцеплень ψ_1 і ψ_2 , оскільки входить ψ у вираз (2.10) параметр L_m .

Будуємо залежність $X_m = f(y)$, загальний вигляд якої у відносних одиницях представлений на рис. 2.13.

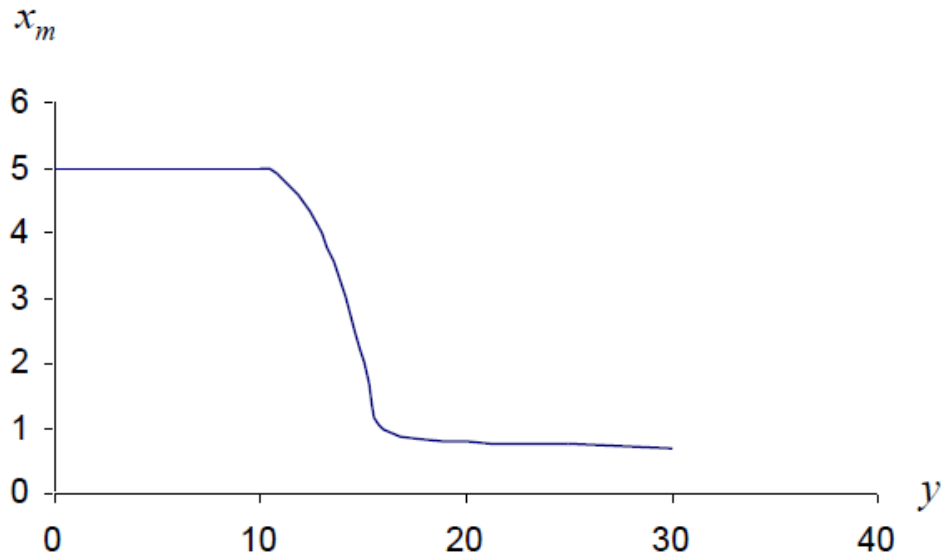


Рис. 2.13. Залежність $X_m = f(y)$

При розрахунку на ЕОМ для отримання функції $x_m = f(y)$ необхідно характеристику холостого ходу, отриману або розрахунковим шляхом, або експериментально, представити в аналітичному вигляді. Для цього використовується метод найменших квадратів.

За методом «найменших квадратів» коефіцієнти цього полінома мають бути такими, що експериментально отриманих у точках сума квадратів різниці E_{xxi} — має бути мінімальною. У цьому випадку $Y - f(i_Q)$ виявиться на мінімальній відстані від функції $E_{xx} - f(i_Q)$ (рис. 2.14).

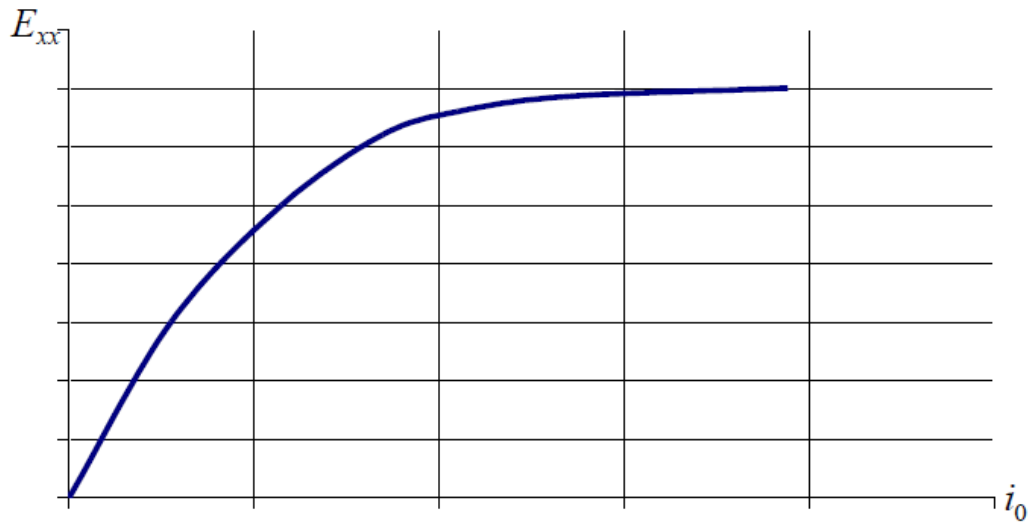


Рис. 2.14. Подання функції $E_{xx} = f_1(i_0)$

Схема асинхронного генератора, за якою складені рівняння, показана на рис. 2.15

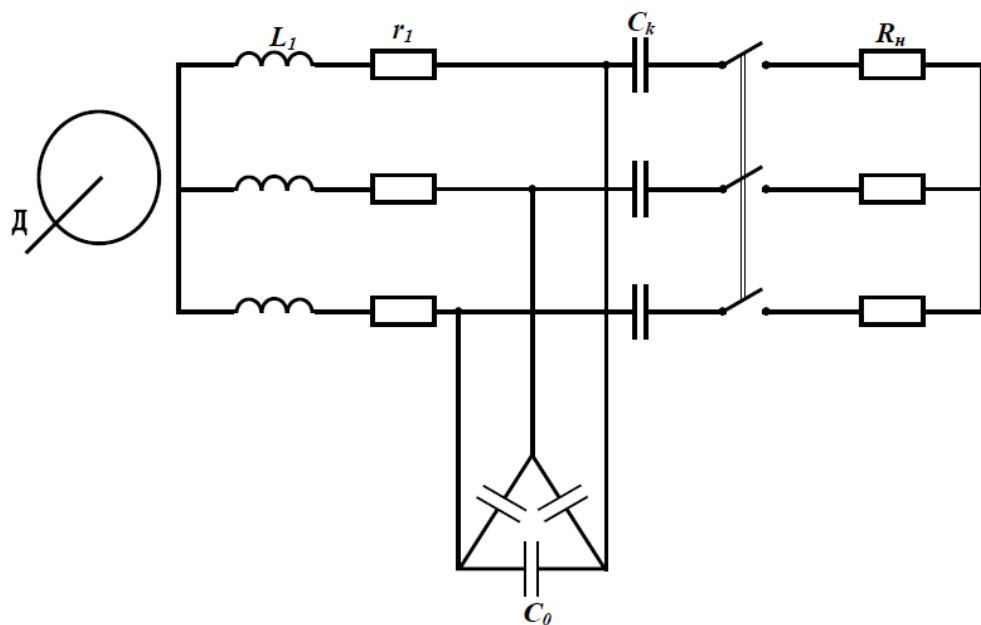


Рис. 2.15. Схема автономного асинхронного генератора

Досліджується лише самозбудження асинхронного генератора без навантаження (так зване паралельне збудження). Таке дослідження може бути виконане з урахуванням системи рівнянь (2.15).

Облік залишкового магнетизму виробляється так: допускалося, що залізо ротора має певним магнітним полем, що створює потік Φ_0 . До пуску генератора

цей потік може бути орієнтований випадковим чином щодо осей α , β

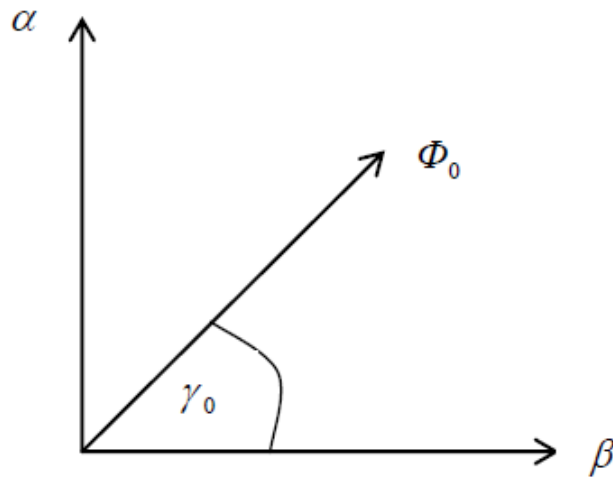


Рис.2.16 Орієнтація залишкового потоку Φ_0 щодо осей α , β

Висновки

1. Дано аналіз характеристик СГФ з урахуванням активного опору обмотки статора;
2. Показано необхідність включення в ланцюг статора конденсаторів та визначено їх оптимальну величину з урахуванням активного опору обмотки статора;
3. Дано аналіз синхронного самозбудження СГФ та показано його можливість;
4. Прояснено фізичну картину асинхронного самозбудження СГФ;
5. Складено систему диференціальних рівнянь та запропоновано метод розрахунку перехідних процесів СГФ з урахуванням насичення магнітного ланцюга.

Глава 3. ОХОРОНА ПРАЦІ

Вступ

Асинхронні генератори набули широкого поширення в системах автономного та розподіленого електропостачання завдяки простоті конструкції, високій надійності, порівняно низькій вартості та мінімальним вимогам до технічного обслуговування. Найбільш активно асинхронні генератори застосовуються у вітроенергетичних установках, мікро-гідроелектростанціях, резервних енергетичних системах та установках малої потужності. Разом з тим експлуатація асинхронних генераторів пов'язана з впливом небезпечних і шкідливих виробничих факторів, серед яких особливе місце займають електричний струм високої напруги, частини механізмів, що обертаються, підвищений рівень шуму і вібрації, можливість перегріву обладнання та виникнення аварійних режимів.



Дотримання вимог техніки безпеки під час експлуатації асинхронних генераторів є необхідною умовою забезпечення надійної роботи енергетичного обладнання, запобігання нещасним випадкам та збереженню працездатності персоналу. У сучасних умовах експлуатації електричних машин особлива увага

приділяється організації безпечного обслуговування, профілактиці аварійних ситуацій та впровадженню сучасних засобів захисту.

3.1. Загальні вимоги безпеки

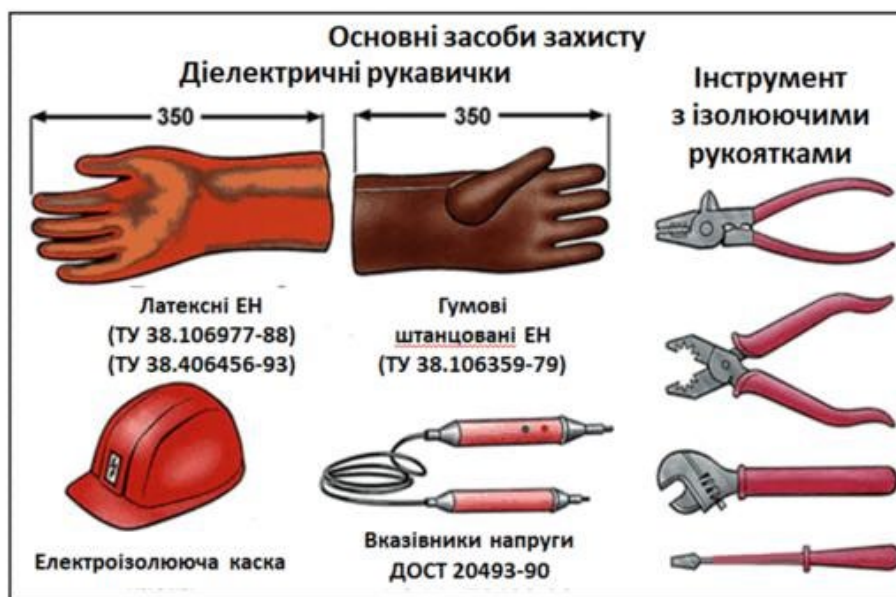
Експлуатація асинхронних генераторів повинна здійснюватися відповідно до чинних нормативних документів, правил улаштування електроустановок та інструкцій заводу-виробника. До обслуговування допускаються лише особи, які пройшли спеціальну підготовку, інструктаж з охорони праці, перевірку знань правил технічної експлуатації та мають відповідну групу з електробезпеки.

Персонал, який виконує роботи з асинхронним генератором або здійснює його технічне обслуговування, повинен мати необхідний рівень професійної підготовки та дотримуватися встановлених вимог охорони праці й електробезпеки. Зокрема, працівники зобов'язані знати будову, принцип дії та основні режими роботи асинхронного генератора; володіти навичками надання першої домедичної допомоги у разі ураження електричним струмом; дотримуватися вимог пожежної безпеки; використовувати передбачені засоби індивідуального захисту, а також виконувати лише ті види робіт, що відповідають їхній кваліфікації та посадовим обов'язкам.

Перед початком роботи необхідно здійснити попередній огляд обладнання та перевірити його технічний стан. Особливу увагу слід приділити справності захисного заземлення, цілісності ізоляції струмопровідних частин, наявності та справності захисних кожухів і огорожень. Крім того, необхідно перевірити працездатність контрольно-вимірювальних приладів, а також переконатися у відсутності сторонніх предметів поблизу обертових частин електричної машини.

Такі заходи є обов'язковими для забезпечення безпечних умов експлуатації асинхронного генератора, запобігання ураженню електричним

струмом, виникненню аварійних режимів, механічних пошкоджень і пожежонебезпечних ситуацій.



Забороняється експлуатація генератора за наявності пошкоджень корпусу, ознак перегріву, підвищеної вібрації, несправності системи охолодження або захисної автоматики.

3.2. Небезпечні виробничі фактори під час експлуатації асинхронних генераторів

Під час експлуатації асинхронних генераторів персонал зазнає впливу ряду небезпечних факторів.

3.2.1 Вплив електричного струму

Найнебезпечнішим чинником є електричний струм. При дотику до струмоведучих частин людина може отримати електротравму різного ступеня тяжкості, включаючи смертельну поразку. Особливу небезпеку становлять

ушкодження ізоляції, пробій обмоток, порушення цілісності кабельних з'єднань та відсутність заземлення.

Навіть при порівняно невисоких напругах можливе виникнення судом м'язів, зупинки дихання та порушення роботи серцево-судинної системи. Тому всі струмопровідні частини мають бути надійно ізольовані та захищені від випадкового дотику.

3.2.2 Механічні небезпеки

Асинхронні генератори містять елементи, що обертаються, що становлять небезпеку для обслуговуючого персоналу. Вал, що обертається, вентилятори системи охолодження і з'єднувальні муфти можуть стати причиною травм при порушенні правил експлуатації.

Особливо небезпечним є проведення ремонтних робіт без повної зупинки агрегату та відключення живлення. Попадання одягу, інструментів або частин тіла в рухомі механізми може призвести до тяжких травм.

3.2.3 Підвищена температура

У процесі роботи обмотки статора та ротора нагріваються внаслідок електричних втрат. При порушенні режиму охолодження можливе перевищення допустимої температури, що призводить до руйнування ізоляції та виникнення пожежі.



Контакт із нагрітими поверхнями також може спричинити термічні опіки у персоналу.

3.2.4 Шум та вібрація

Робота асинхронних генераторів супроводжується шумом та вібрацією, рівень яких залежить від потужності машини, якості балансування ротора та режиму навантаження. Тривале вплив підвищеного шуму негативно впливає нервову систему людини, знижує концентрацію уваги і працездатність.

Підвищена вібрація може свідчити про несправності підшипників, розбалансування ротора або механічні пошкодження.

3.3. Вимоги електробезпеки

Основним заходом безпеки є захист персоналу від ураження електричним струмом.

3.3.1 Захисне заземлення

Корпус асинхронного генератора має бути надійно заземлений. Захисне заземлення забезпечує зниження напруги дотику до безпечного рівня при пошкодженні ізоляції.

Опір заземлювального пристрою повинен відповідати встановленим нормативам. Періодично необхідно проводити перевірку стану заземлювальних сполук та вимірювання опору заземлення.

3.2 Ізоляція струмопровідних елементів

Ізоляція електричних кіл має забезпечувати безпечну експлуатацію обладнання. Не допускається робота генератора при зниженні опору ізоляції нижче допустимих значень.

Для контролю стану ізоляції використовуються мегомметри та спеціальні діагностичні прилади. Перевірка ізоляції проводиться перед введенням обладнання в експлуатацію, після ремонту та у процесі планових технічних оглядів.

3.3.3 Захисна автоматика

Асинхронні генератори повинні оснащуватися системами автоматичного захисту від:

- короткого замикання;
- навантаження;
- перегріву;
- перенапруги;
- зниження опору ізоляції;
- аварійне підвищення швидкості обертання.



Спрацювання захисної автоматики повинно забезпечувати швидке відключення генератора та запобігання розвитку аварійної ситуації.

3.3.4. Використання засобів індивідуального захисту

Під час обслуговування генераторів персонал зобов'язаний застосовувати засоби індивідуального захисту, передбачені вимогами охорони праці та електробезпеки. До основних засобів захисту належать діелектричні рукавички, діелектричні килимки, захисні окуляри, спеціальний одяг, захисне взуття, а також інструмент з ізольованими рукоятками.

Засоби індивідуального захисту повинні перебувати у справному технічному стані, використовуватися відповідно до їх призначення та регулярно проходити перевірку. Експлуатація засобів захисту з простроченим терміном випробувань, механічними пошкодженнями або ознаками втрати захисних властивостей не допускається.

3.4. Вимоги безпеки під час пуску та зупинки генератора

Перед пуском асинхронного генератора необхідно виконати попередній огляд обладнання та переконатися у відсутності сторонніх предметів у зоні обертання рухомих частин. Крім того, слід перевірити технічний стан підшипникових вузлів, системи охолодження, кабельних з'єднань, захисного заземлення та контрольно-вимірювальних приладів.

Пуск генератора має здійснюватися відповідно до встановленої технологічної послідовності операцій, що включає:

- перевірку загального технічного стану обладнання;
- контроль параметрів електричної мережі;
- перевірку справності захисної автоматики;
- увімкнення та перевірку роботи системи охолодження;
- плавний запуск приводного механізму генератора;
- контроль виходу генератора на заданий режим роботи.

Під час пуску генератора необхідно здійснювати постійний контроль основних експлуатаційних параметрів, зокрема величини струму, напруги, частоти обертання ротора, температури обмоток, а також рівня шуму та вібрації. Поява стороннього шуму, підвищеної вібрації, перегрівання, нестабільності напруги або інших ознак ненормального режиму роботи є підставою для негайного припинення пуску та проведення додаткової діагностики обладнання.

Зупинка генератора також повинна виконуватися згідно з установленою послідовністю операцій, із поступовим зниженням навантаження та контролем параметрів до повного припинення обертання. Це забезпечує зменшення механічних і електромагнітних навантажень на елементи установки та підвищує безпеку експлуатації обладнання. При зупинці генератора спочатку знімається навантаження, після чого відключається привід та система збудження (за наявності). Після зупинки ротора допускається проведення оглядів та технічного обслуговування.

3.5. Техніка безпеки під час технічного обслуговування

Технічне обслуговування асинхронних генераторів включає огляди, очищення, перевірку ізоляції, заміну підшипників, діагностику обмоток та інші операції.

Перед виконанням будь-яких робіт необхідно:

- відключити генератор від мережі;
- вивісити попереджувальні плакати;
- перевірити відсутність напруги;
- виконати заземлення відключених струмопровідних частин;
- оформити наряд-допуск за потреби.

Особливу увагу слід приділяти роботам в умовах підвищеної вологості, так як наявність вологи істотно підвищує небезпеку ураження електричним струмом.

Очищення генератора має проводитися з використанням спеціальних засобів та інструментів. Забороняється застосовувати металеві предмети для видалення забруднень із струмопровідних частин.

3.6. Пожежна безпека

Асинхронні генератори належать до електрообладнання, експлуатація якого пов'язана з підвищеним рівнем пожежної небезпеки. Це зумовлено наявністю струмопровідних частин, ізоляційних матеріалів, елементів силових кіл, а також можливістю виникнення аварійних електричних і теплових режимів.

Основними причинами виникнення пожежонебезпечних ситуацій під час експлуатації асинхронних генераторів є короткі замикання, перегрівання обмоток, іскріння контактних з'єднань, пошкодження або старіння електричної ізоляції, перевантаження генератора, а також несправність або недостатня ефективність системи вентиляції та охолодження.

Приміщення, у яких встановлені асинхронні генератори, повинні бути обладнані первинними засобами пожежогасіння, справною системою вентиляції, засобами аварійного відключення електроживлення, а також, за необхідності, автоматичними системами пожежної сигналізації та пожежогасіння. Розміщення засобів пожежогасіння має забезпечувати можливість оперативного доступу до них у разі виникнення аварійної ситуації.

Для гасіння електрообладнання можуть застосовуватися вуглекислотні та порошкові вогнегасники, а також автоматичні системи пожежогасіння, призначені для електроустановок. Використання води або пінних вогнегасників для гасіння електроустановок, що перебувають під напругою, не допускається, оскільки це може призвести до ураження персоналу електричним струмом і подальшого поширення аварійної ситуації.

3.7. Безпека під час аварійних режимів роботи

У разі виникнення аварійних або передаварійних режимів роботи персонал зобов'язаний негайно вжити заходів, спрямованих на запобігання подальшому розвитку пошкоджень, забезпечення безпеки людей та збереження обладнання.

До основних ознак аварійного режиму роботи асинхронного генератора належать різке підвищення струму, напруги або температури обмоток, поява диму чи запаху горілої ізоляції, підвищений шум, іскріння, різке зростання рівня вібрації, зниження опору ізоляції, а також нестабільність вихідної напруги.

У разі виявлення зазначених ознак необхідно негайно вимкнути генератор, повідомити відповідальну особу або черговий технічний персонал, огородити небезпечну зону та не допускати повторного ввімкнення обладнання до повного з'ясування причин аварійного режиму. Повторний пуск генератора допускається лише після усунення несправностей, проведення комплексної перевірки технічного стану обладнання та підтвердження його готовності до безпечної експлуатації.

Після ліквідації несправності має бути проведено огляд генератора, перевірку стану ізоляції, контактних з'єднань, системи охолодження, захисної автоматики та контрольно-вимірювальних приладів. За необхідності виконуються випробування обладнання перед його повторним введенням в експлуатацію.

3.8. Організація безпечної експлуатації

Для забезпечення безпечної експлуатації асинхронних генераторів на підприємстві повинна бути організована система управління охороною праці, спрямована на попередження виробничого травматизму, аварійних ситуацій і відмов обладнання.

До основних організаційних заходів належать проведення первинного, повторного, позапланового та цільового інструктажів з охорони праці; навчання персоналу безпечним методам роботи; періодична перевірка знань з питань електробезпеки, пожежної безпеки та експлуатації електрообладнання; організація планово-попереджувальних ремонтів; систематичний контроль технічного стану генераторів; а також аналіз причин аварій, відмов і порушень режимів роботи.

Особливу увагу слід приділяти веденню експлуатаційної документації, фіксації результатів технічних оглядів, випробувань, ремонтів і перевірок засобів захисту. Такий підхід дає змогу своєчасно виявляти потенційні несправності, підвищувати надійність роботи обладнання та забезпечувати належний рівень безпеки під час експлуатації асинхронних генераторів. Особливого значення має дотримання графіків технічного обслуговування та діагностики. Сучасні методи контролю, включаючи тепловізійну діагностику, вібраційний аналіз та моніторинг стану ізоляції, дозволяють своєчасно виявляти дефекти та запобігати аваріям.

3.9. Екологічні аспекти безпеки

Експлуатація асинхронних генераторів має відповідати вимогам екологічної безпеки. При роботі електричних машин можливе забруднення навколишнього середовища мастильними матеріалами, продуктами зношування та відходами ремонту.

Для зниження негативного впливу необхідно:

- використовувати екологічно безпечні мастильні матеріали;
- своєчасно утилізувати відходи;
- запобігати витоків олії;
- контролювати рівень шуму та вібрації.

В енергетичних установках на основі відновлюваних джерел енергії асинхронні генератори сприяють зниженню викидів шкідливих речовин та зменшенню залежності від викопного палива.

Висновки

Безпечна експлуатація асинхронних генераторів є найважливішою умовою надійної та ефективної роботи енергетичних систем. Дотримання вимог електробезпеки, застосування сучасних засобів захисту, організація регулярного технічного обслуговування та підвищення кваліфікації персоналу дозволяють суттєво знизити ймовірність аварій та нещасних випадків.

Сучасні асинхронні генератори характеризуються високою надійністю та довговічністю, проте навіть найдосконаліше обладнання потребує суворого дотримання правил техніки безпеки. Комплексний підхід до організації охорони праці забезпечує захист персоналу, підвищення експлуатаційної надійності обладнання та зниження економічних втрат, пов'язаних із аварійними зупинками та ремонтом.

Висновки до роботи

1. Як джерела автономного електроживлення пропонується використовувати асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФ), що працюють в режимі синхронного генератора (СГФ).
2. Розглянуто та проаналізовано схеми з'єднання обмотки ротора, що застосовуються як обмотка збудження в режимі СГФ.
3. Якість напруги СГФ відповідає вимогам стандартів для автономних джерел живлення.
4. Аналіз показав, що при використанні роторної обмотки як обмотка збудження для створення основного магнітного потоку потужність СГФ, що максимально реалізується, становить 30-60% від номінальної потужності базового АДФ. При цьому зі збільшенням номінальної потужності АДФ зростає та реалізована потужність СГФ.
5. Для розвантаження обмотки збудження СГФ від струму, що намагнічує, і, як наслідок, підвищення реалізованої потужності генератора, показана необхідність підключення до статорної обмотки конденсаторної батареї. В цьому випадку обмотка збудження виконує роль автоматичного регулятора напруги, підтримуючи постійну напругу на затискачах генератора у всьому діапазоні навантажень від нуля до номінального.
6. Дослідження показали, що СГФ із підключеною конденсаторною батареєю, з погляду теплового стану машини, може реалізувати потужність, що дорівнює номінальній потужності базового АДФ, незалежно від її величини. Однак через обмежену статичну стійкість рекомендується приймати $\eta = (0,85 - 0,9)$
7. Проведено аналіз робочих характеристик СГФ з урахуванням активного опору обмоток статора та визначено оптимальну величину ємності конденсаторів, що підключаються до статора, з урахуванням цих опорів.
8. Показано, що синхронне самозбудження СГФ неможливе, а фізична картина асинхронного самозбудження повністю прояснена.

9. Складено систему диференціальних рівнянь та запропоновано метод розрахунку перехідних процесів СГФ, включаючи асинхронне самозбудження, з урахуванням насичення магнітного ланцюга.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Чумак В.В., Монахов Є.А. Управління магнітоелектричним генератором з аксіальним потоком. Технічна електродинаміка. 2016. №2. З. 55 – 57.
2. Ostroverkhov M., Chumack V. , Monakhov E. Axial Flux Permanent Magnet Controlled Generator. 2018 IEEE 3rd Conference Proceedings on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS): матеріали міжнар . наук.- техн . конф ., м . Харків , 10 – 14 вересня , 2018 р ., Харків , 2018. С. 353-357
3. Афонін А. А., Крамаж В., Цежневський П. Синхронні дискові електродвигуни із постійними магнітами. Технічна електродинаміка. 2000. № 5. С. 40 - 44.
4. Афонін А.А. Електромагнітні навантаження електричних машин з постійними магнітами. Технічна електродинаміка. 2005. № 1. С. 39 - 46.
5. Афонін А.А., Гребеніков В.В., Цежневський П. Особливості топології магнітоелектричних дискових електродвигунів. Технічна електродинаміка. 1999. № 1. З. 50 – 58.
6. Васько П.Ф. Сучасний стан, потенційні можливості та передумови подальшого розвитку малої гідроенергетики в Україні. Відновлюється енергетика. 2006. №1. С. 60-66.
7. Васько П.Ф., Віхорєв Ю.О. Мала гідроенергетика: світові тенденції розвитку та українські перспективи. Електропанорама. 2009. №11. З. 59 – 61.
8. Васьковський Ю.М. Математичне моделювання електромеханічних перетворювачів енергії. Київ: НТУУ "КПІ", 2003. 161 с.
9. Вишневський Л. В., Веретенник А. М., Тумольський А.П. Поліпшення динамічних характеристик системи регулювання напруги синхронного генератора. Електротехнічні та комп'ютерні системи. 2014. № 16. С . 48 – 53.
10. Chang J., Wang A. New VF-Power System Architecture and Evaluation for Future Aircraft. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, vol. 42 №. 2, 2006, P. 527 - 539.

11. Chau KT, Chan CC, Chunhua Liu. Overview of permanent-magnet Brushless drives for electric and hybrid electric vehicles. IEEE Transaction Industrial Electronics. 2008. Vol. 55 №. 6. P. 2246 - 2257.

12. Delhasse F., Biais F. High power starter generators for airliners. Зміни в Аеронаутичні та space systems. Challenges for on-board energy. June 26-28, 2006, Avignon, Франція. P. 1-3

13. EU Project on More Open Electrical Technologies (MOET) Launched Successfully. URL: <https://www.tttech.com/press/eu-project-on-more-open-electricaltechnologies-moet-launched-successfully>

14. Europe - Більше Open Electrical Technologies. URL: <https://trimis.ec.europa.eu/project/more-open-electrical-technologies>

15. Features - Idenergie. URL: <http://idenergie.ca/en/features/>

16. Fu WN, i Ho SL A novel axial-flux electric machine for in-wheel gearless drive в plug-in hybrid electric vehicles. ANSYS 2011中国用户大会优秀论

17. Hoang E., Lécrivain M., Gabsi M. New structure of switching flux synchronous polyphase machine with hybrid excitation. European Conference on Power Electronics and Applications EPE 2007, 2007. p. 1–8.

18. Holmes AS, Guodong Hong, Keith R. Pullen. Axial-flux permanent magnet for micropower generation. IEEE Journal of microelectromechanical systems. 2005. V. 14, P. 54 – 62.

19. Камієв К., Ньорг Дж., Пирхонен J., Забоін V., Hrabovcova V., Rafajdus P. Hybrid excitation synchronous generators для island operation. IET Power application. 2012. Vol. 6. № 1. P. 1 - 11.

20. Metin A. Design, Analysis, and Control of Hybrid Field-Controlled Axial-Flux Permanent-Magnet Motor. IEEE Transactions on industrial electronics. 2010. №57 (1). P. 78 – 87.

21. Mizuno T., Nagayama K., Ashikaga T., Kobayashi T. Basic principles and Характеристики hybrid excitation synchronous machine. Electrical engineering in Japan. 1996. Vol. 117. №. 5. P. 110 - 123

22. Monakhov E., Chumack V. Axial-flux permanent magnet machine with

знижений вміст активних матеріалів. Електромеханічні та енергозберігаючі системи. 2015. №2(30). З. 83-89.

23. Ostroverkhov M., Chumack V., Monakhov E. Axial Flux Permanent Magnet Controlled Generator. 2018 IEEE 3rd Conference Proceedings on Intelligent Energy and Power Systems (IEPS): матеріали міжнар . наук.- техн . конф ., м . Харків , 10 – 14 вересня , 2018 р . , Харків , 2018. С.М. 353-357.

24. Ostroverkhov M., Chumack V., Monakhov E., Ponomarev A. Hybrid excited synchronous generator for microhydropower unit. 2019 IEEE 6th International Conference on Energy Smart Systems (2019 IEEE ESS): матеріали міжнар . наук.- техн . конф ., м . Київ , 17-19 квітня , 2019 р . , Київ , 2019. С . 219-222.

25. Spooner E. Chalmers BJ Torus, A toroidal-stator, iron poles rotor permanent magnet machine for small scale power generation. International Conference on Electrical Machines. 1990. P. 1053 – 1058.

26. Viorel IA, Munteanu R., Fodorean D., Szabo L. На можливості для використання hybrid synchronous machine як integrated starter-generator. IEEE International Conference on Industrial Technology ICIT 2006, с. 1195-1200.

27. Xiping L., Aihua Z., Chen Z., Design of stator-separated axial fluxswitching hybrid excitation synchronous machine. International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS'2011). 2011. P. 1-4.

ДОДАТКИ

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

*Навчально-науковий інститут енергетичної, інформаційної та
транспортної інфраструктури
Кафедра альтернативної електроенергетики та електротехніки*

Використання асинхронного двигуна з фазним ротором в режимі генератора вітроустановки 320 кВт

Виконав: студент4 курсу,
групи НВДЕ-2022
Д.С. Гужва

Керівник: доц. О.Б. Єгоров

Цілі та завдання проєктування

До електричних машин автономних джерел живлення пред'являється цілий комплекс вимог: мінімальна маса і габарити, висока надійність, робота при перевантаженнях по потужності, можливість економічного регулювання вихідної напруги, хороші умови вентиляції, високий рівень енергетичних, екологічних, експлуатаційних показників, висока якість видається електроенергії, короткочасність протек асиметрії навантаження, мінімальна вартість.

Цим вимогам достатньо відповідають асинхронні генератори (АГ)

Асинхронні генератори можна класифікувати за такими ознаками:

способу збудження;
характеру вихідної частоти;
методів стабілізації напруги;
конструктивного виконання (з короткозамкненим, фазним ротором);
числу фаз.

За **способом збудження** асинхронні генератори поділяються на
з самозбудженням і з незалежним збудженням.

Генератори із **самозбудженням** поділяються на :

з використанням конденсаторів, підключених до ланцюга статора, ротора або одночасно до обох ланцюгів;

із застосуванням вентильних перетворювачів зі штучною комутацією

Стабілізацію напруги при змінному навантаженні можна забезпечити
регулюванням швидкості обертання ротора
зміною основного магнітного потоку.

Методи стабілізації напруги

Підмагнічування спинки статора

Регулювання напруги на конденсаторах

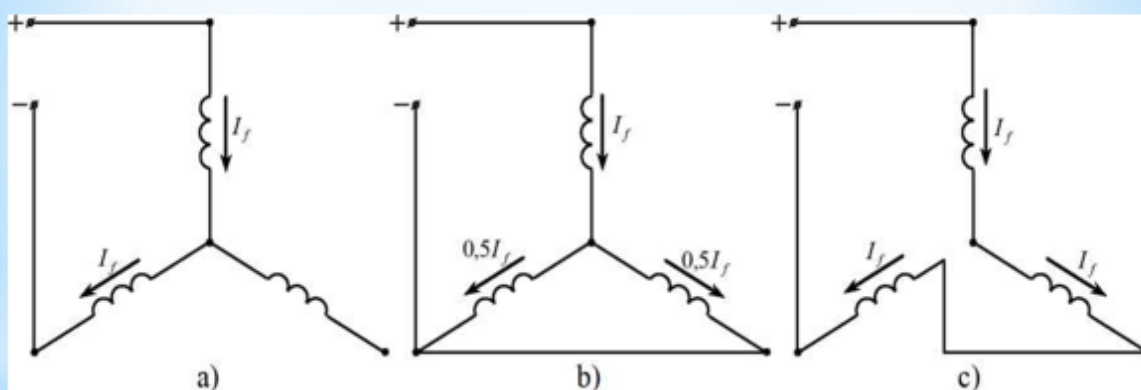
Зміна ємності шунтуючих конденсаторів

Використання ферорезонансного стабілізатора напруги

Застосування керованих реакторів

Асинхронні вентильні генератори (АВГ)

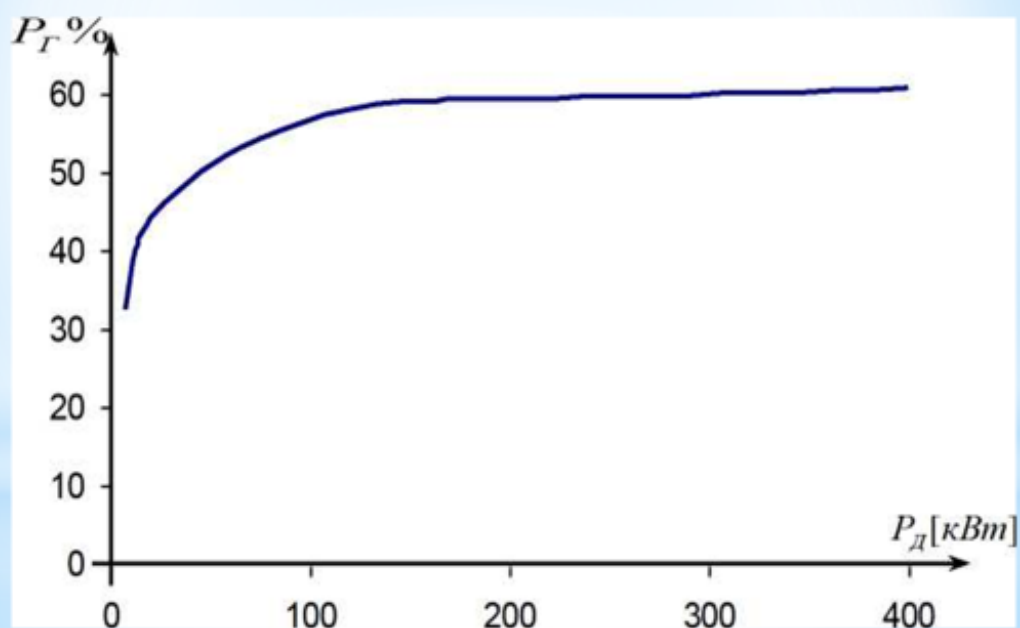
Схеми приєднання трифазної обмотки ротора до джерела постійного струму



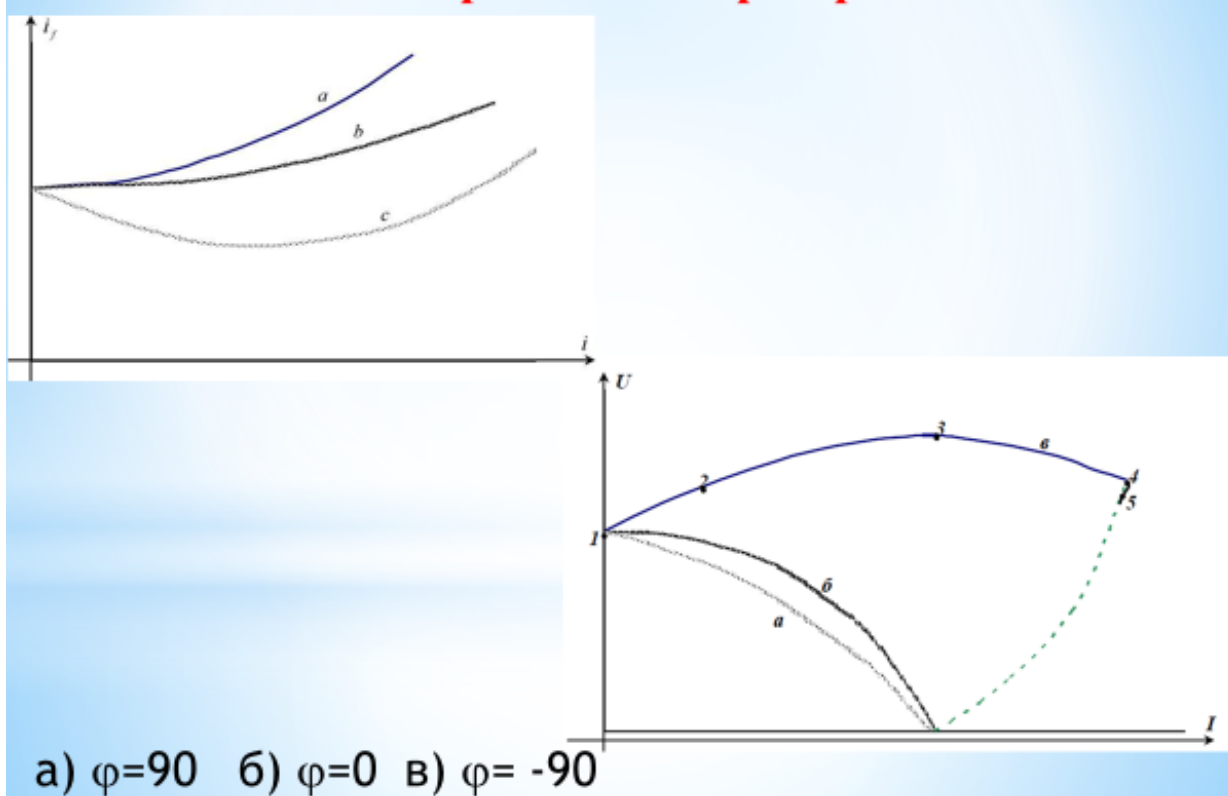
Максимально реалізована потужність генераторного режиму

Тип двигуна	Номінальна потужність кВт	Частота обертання об/хв	Струм ротора номінальний А	Струм обмотки збудження А	Реалізована потужність генератора кВт	% реалізованої потужності
4AK16038	5,5	750	14	13,5	1,9	34,5
4AK160H6	10	1000	20	21	3,8	38
4AK20026	22	1000	45	47	10	45,5
4АНК280М6	110	1000	297	305	60	54,5
AK-114-6	320	1000	354	334	192	60
4АНК355М4	400	1500	485	504	242	60,5

Максимально реалізована потужність генераторного режиму, залежно від номінальної потужності базового АДФ



Зовнішні та Регулювальні характеристики синхронного генератора



Висновки по роботі

1. Як джерела автономного електроживлення пропонується використовувати асинхронні двигуни з фазним ротором (АДФ), що працюють в режимі синхронного генератора (СГФ).
2. Розглянуто та проаналізовано схеми з'єднання обмотки ротора, що застосовуються як обмотка збудження в режимі СГФ.
3. Розглянуто параметри якості напруги СГФ для автономних джерел живлення.
4. Аналіз показав, що при використанні роторної обмотки як обмотка збудження для створення основного магнітного потоку потужність СГФ, що максимально реалізується, становить 30-60% від номінальної потужності базового АДФ.
5. Для розвантаження обмотки збудження СГФ від струму, що намагнічує, і, як наслідок, підвищення реалізованої потужності генератора, показана необхідність підключення до статорної обмотки конденсаторної батареї.
6. Проаналізовані питання охорони праці при експлуатації асинхронного вітрогенератора з фазним ротором.