

Заклад вищої освіти „Подільський державний університет”
Факультет енергетики та інформаційних технологій
Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему:

«ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ»

Виконав:

здобувач вищої освіти денної форми навчання освітнього ступеня «Магістр», освітньо-професійної програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ПІВОВАРОВ Олександр Сергійович

Керівник канд. техн. наук, доцент

ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Оцінка захисту:

Національна шкала _____

Кількість балів _____ Шкала ECTS _____

« ____ » _____ 2025 р.

Допускається до захисту:

« ____ » _____ 2025 р.

Гарант освітньо-професійної програми
«Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка» спеціальності
141 «Електроенергетика, електротехніка
та електромеханіка»

канд. техн. наук, доцент

Павло ПОТАПСЬКИЙ

м. Кам'янець-Подільський, 2025

Заклад вищої освіти «Подільський державний університет»
 Факультет енергетики та інформаційних технологій
 Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій
 Освітній ступінь «Магістр»
 Спеціальність 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

ЗАТВЕРДЖУЮ:

Завідувач кафедри,

_____ Ігор ГАРАСИМЧУК

« ____ » _____ 2025 р.

ЗАВДАННЯ НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ РОБОТУ

здобувачу вищої освіти

ПІВОВАРОВУ Олександр Сергійовичу

1. Тема роботи: «ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ»

2. Керівник роботи: канд. техн. наук, доцент ДУМАНСЬКИЙ Олександр Васильович

Затверджено наказом ЗВО «ПДУ» від 24 березня 2025 року №162с.

Тема кваліфікаційної роботи уточнена згідно наказу ЗВО «ПДУ» від 19 листопада 2025 року №1331с «Про зміни до наказу №162с від 24 березня 2025 року».

Строк подання закінченої роботи 25 листопада 2025 р.

3. Вихідні дані до роботи: Науково-технічна література, умови експлуатації синхронних генераторів індуктивним навантаженням (коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$, коливання напруги у діапазоні 25–35%). Стабільний відрізок кутової характеристики для двигуна охоплює діапазон від 0 до -90° .

Номінальний момент знаходиться в межах 20-30°.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити):

ВСТУП

1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА І ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ
3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПРОБУВАНЬ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ
4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ Й РЕМОНТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН
5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЇ МАШИНИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ
6. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

ВИСНОВКИ

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

ДОДАТКИ

7. Перелік графічного матеріалу

Презентаційні матеріали за розділами кваліфікаційної роботи

6. Консультанти розділів роботи

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв
3	Доцент КОЗАК О.В.		

7. Дата видачі завдання 02 липня 2025 р.

КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Етапи кваліфікаційної роботи	Строк виконання етапів КР	Підпис керівника
	ВСТУП	08.07.25	
1	ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	30.07.25	
2	ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА І ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	20.08.25	
3	ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПРОБУВАНЬ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	23.09.25	
4	УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ Й РЕМОНТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	18.10.25	
5	ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЇ МАШИНИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	01.11.25	
6	БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	10.11.25	
	ВИСНОВКИ	20.11.25	
	СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	25.11.25	
	ДОДАТКИ		

Здобувач вищої освіти

Олександр ПИВОВАРОВ

Керівник, к.т.н., доцент

Олександр ДУМАНСЬКИЙ

РЕФЕРАТ

ПИВОВАРОВ Олександр Сергійович. ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ ВИКОРИСТАННЯ ЗАСОБІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН НА АГРОПРОМИСЛОВИХ ПІДПРИЄМСТВАХ. 141 – електроенергетика, електротехніка та електромеханіка. Заклад вищої освіти «Подільський державний університет». Факультет енергетики та інформаційних технологій. Кафедра електротехніки, електромеханіки і електротехнологій – Кам'янець-Подільський: ЗВО «ПДУ», 2025.

Робота містить 96 аркушів, 8 таблиці, 29 рисунків, 46 формул, а список використаних джерел містить 24 найменування.

У кваліфікаційній роботі розглянуто питання підвищення ефективності та надійності електромашин, зокрема синхронних генераторів і двигунів, шляхом удосконалення методів їх технічного обслуговування, випробувань і ремонту. Проаналізовано основні поняття, класифікацію та принципи роботи електромашин з акцентом на трифазні синхронні генератори.

Досліджено особливості експлуатації синхронних електродвигунів, методи їх випробувань, відновлення та математичного моделювання. Наведено результати експериментальних досліджень синхронної машини малої потужності, які можуть бути використані для підвищення енергоефективності, надійності та вдосконалення систем керування. Зроблено висновок про доцільність застосування сучасних технологій обслуговування, автоматизованих систем контролю та підвищення кваліфікації персоналу для забезпечення стабільної роботи електромашин.

Ключові слова: електромашини, синхронний генератор, синхронний двигун, технічне обслуговування, випробування електромашин, ремонт, енергоефективність, автоматизація, система моніторингу.

АНОТАЦІЯ

Кваліфікаційна робота присвячена підвищенню ефективності та надійності електромашин, зокрема синхронних генераторів і електродвигунів, шляхом удосконалення методів їх технічного обслуговування, випробувань і ремонту. У роботі проаналізовано основні поняття, класифікацію та принципи дії електромашин, розглянуто особливості експлуатації синхронних машин і доцільність використання агрегатів малої потужності. Наведено результати експериментальних досліджень робочих характеристик синхронної машини, які можуть бути використані для підвищення енергоефективності, надійності та вдосконалення систем керування. Окрему увагу приділено питанням безпеки праці, автоматизації сервісних процесів і впровадженню сучасних систем моніторингу та діагностики.

ABSTRACT

The qualification work is devoted to increasing the efficiency and reliability of electric machines, in particular synchronous generators and electric motors, by improving the methods of their maintenance, testing and repair. The work analyzes the basic concepts, classification and principles of operation of electric machines, considers the features of the operation of synchronous machines and the feasibility of using low-power units. The results of experimental studies of the operating characteristics of a synchronous machine are presented, which can be used to increase energy efficiency, reliability and improve control systems. Special attention is paid to issues of occupational safety, automation of service processes and the implementation of modern monitoring and diagnostic systems.

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

ККД – коефіцієнт корисної дії;
ТЕЦ – теплоелектростанція;
ГЕС – гідроелектростанція;
АС - змінний струм;
ДС - постійний струм;
ЕРС - електрорушійна сила;
х.х. - холостий хід;
К.З.- коротке замикання;

ЗМІСТ

ВСТУП	8
РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	10
1.1. Значення електричних приладів та трансформаторів у процесі електрифікації господарства	10
1.2. Класифікація основних типів електричних машин	13
1.3 Основні рівняння синхронних машин	27
1.4 Характеристики синхронних генераторів	30
1.5 Дослідження синхронної машини	38
Висновки до розділу 1	39
РОЗДІЛ 2. ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА І ЙОГО ПРИЗНАЧЕННЯ	40
Висновки до розділу 2	48
РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПРОБУВАНЬ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	49
3.1 Ремонт синхронних двигунів	49
3.2 Аналіз математичної моделі об'єкта вимірювання	51
3.3 Розробка та дослідження способу вимірювання механічних характеристик	54
Висновки до розділу 3	58
РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ Й РЕМОНТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	59
4.1 Обсяг робіт по технічному обслуговуванню й ремонту	59
4.2 Техніка безпеки при ремонті електричних машин	66
Висновки до розділу 4	68

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЇ МАШИНИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ	69
5.1 Результат дослідження синхронної машини малої потужності в режимі двигуна	69
5.2 Результат дослідження синхронної машини малої потужності в режимі генератора	71
Висновки до розділу 5	75
РОЗДІЛ 6. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК	76
6.1 Загальні вимоги	76
6.2 Дія електричного струму на організм людини	77
6.3 Умови ураження людини електричним струмом	80
6.4 Небезпека ураження електричним струмом від крокової напруги	86
6.5 Захист від ураження людини електричним струмом	89
Висновки до розділу 5	93
ВИСНОВОК	94
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	97
ДОДАТКИ	99

ВСТУП

Просування у сфері виробництва електричних машин безпосередньо залежить від здобутків у теоретичних засадах цих пристроїв. Глибоке розуміння принципів електромеханічного перетворення енергії є критично важливим не лише для інженерів- електромеханіків, які займаються розробкою та експлуатацією таких машин, а й для широкого кола фахівців, чия робота стосується електромеханіки.

Електричні машини знаходять застосування у всіх секторах промисловості, на транспорті, у сільському господарстві та побуті. Майже вся вироблена електрична енергія генерується електричними генераторами, а дві третини її потім перетворюється електродвигунами на механічну роботу. Технічний рівень продукції у багатьох галузях значною мірою визначається коректністю вибору й застосування електромеханічного обладнання.

Особлива увага приділяється електродвигунам та генераторам у аерокосмічній, високошвидкісній транспортній та морській техніці. Машини, призначені для рухомих установок, виготовляються у великих обсягах. Для них ключовими вимогами є мінімальні габарити при високих енергетичних характеристиках та гарантована надійність. Окремий напрямок електромеханіки — це системи автоматичного керування, де електричні машини використовуються як сенсори швидкості, позиції, кута повороту, виступаючи фундаментальними компонентами складних навігаційних комплексів.

Актуальність дослідження: З огляду на стрімкий технологічний прогрес та зростаючі вимоги до надійності обладнання, ефективності технічного обслуговування електричних машин набуває особливого значення. На сучасних виробничих об'єктах зростає кількість систем, де задіяні електричні машини, отже, оптимізація процесів їх обслуговування здатна призвести до зниження експлуатаційних витрат та покращення загальної виробничої продуктивності.

Метою дослідження є аналіз існуючих рішень та розробка нових методів для посилення ефективності технічного обслуговування електричних машин. Для досягнення цієї мети визначено такі завдання:

Провести ревізію наявної літератури та актуальних практик, пов'язаних із техобслуговуванням електродвигунів та генераторів.

Дослідити характеристики різноманітних інструментів та засобів обслуговування, що застосовуються на підприємствах.

Виявити слабкі місця та обмеження у чинних підходах до технічного обслуговування.

Сформулювати практичні рекомендації щодо інтеграції нових технологій та вдосконалення існуючих процедур обслуговування.

Об'єктом дослідження виступає процес технічного обслуговування електричних машин, що застосовуються на підприємствах агропромислового комплексу.

Предметом дослідження є технологічні засоби, призначені для технічного обслуговування, методи їх використання та їхній вплив на загальну функціональність електротехнічного обладнання.

Науковою новизною дослідження є формування прогресивних підходів для підвищення ефективності техобслуговування електричних машин, базованих на аналізі передових технологій та розробці оптимізованих регламентів обслуговування.

Практична цінність: Результати цього дослідження можуть бути корисними для промислових підприємств, які активно використовують електричні машини у своїй діяльності. Запропоновані методики та рекомендації дозволять підвищити рівень надійності обладнання, зменшити витрати, пов'язані з технічним обслуговуванням, та покращити загальну ефективність виробничих процесів.

Це дослідження є актуальним і має потенціал для практичного впровадження на електротехнічних об'єктах, сприяючи якіснішому використанню ресурсів для обслуговування електричних машин.

РОЗДІЛ 1. ОСНОВНІ ПОНЯТТЯ ТА ВИЗНАЧЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1. Значення електричних приладів та трансформаторів у процесі електрифікації господарства

Неможливо уявити собі жодної сфери народного господарства без використання електричної енергії, оскільки цей різновид енергії, як жоден інший, легко генерувати, транспортувати на значні дистанції та трансформувати в інші форми енергії. Електрифікація, будучи підґрунтям розвитку сучасного виробництва, відіграє домінуючу роль у поступі всіх його складових. Серед апаратури, що задіюється для забезпечення виробничих процесів електрикою, ключове місце посідають електричні машини, які широко вживаються як на етапі виробництва електроенергії, так і при її кінцевому споживанні.

Електрична машина — це електромеханічний пристрій, розроблений для перетворення механічної енергії на електричну або навпаки, або ж для трансформації електричної енергії одного типу чи з певними характеристиками на електричну енергію іншого типу чи з іншими параметрами.

Переважні якості електричних машин включають:

- високий коефіцієнт корисної дії (ККД), що у потужних зразках сягає 95–99%;
- відносно невелику вагу та габарити в перерахунку на одиницю потужності;
- високу стійкість до збоїв та тривалий термін служби;
- легкість у керуванні та необхідності обслуговування;
- зручність підведення та відведення енергетичного потоку;
- помірну вартість та технологічність виготовлення, особливо при

масовому серійному виробництві.

Електроенергія генерується на електростанціях за допомогою електричних машин — генераторів, котрі механічну енергію перетворюють на електричну. Основна маса електроенергії (близько 60%) продукується теплоелектростанціями (ТЕЦ), де внаслідок спалювання палива (вугілля, торфу, газу) вода нагрівається і перетворюється на пару під високим тиском. Ця пара подається до турбіни, де, розширюючись, змушує обертатися ротор турбіни (теплова енергія трансформується у механічну). Обертання ротора турбіни передається на вал генератора. Завдяки електромагнітним явищам у генераторі відбувається перетворення механічної енергії на електричну. Схема виробництва енергії на атомних станціях подібна до ТЕЦ, відмінність лише у використанні ядерного замість хімічного палива.

На гідроелектростанціях (ГЕС) процес генерації відбувається таким чином: вода, штучно піднята греблею до певного рівня, спрямовується на робоче колесо гідравлічних турбін; механічна енергія, отримана від обертання колеса турбіни, передається на вал електричного генератора, де і відбувається перетворення механічної енергії в електричну.

При споживанні електрична енергія трансформується у форми, необхідні користувачеві (теплову, механічну, хімічну). Приблизно 70% усієї виробленої електроенергії витрачається на живлення двигунів верстатів, інструментів, транспортних засобів, тобто на перетворення її на механічний рух. Це перетворення забезпечують електричні машини, відомі як електродвигуни.

Електричний двигун є ключовим компонентом електроприводу робочих машин. Чудова можливість контролювати електричну енергію, а також простота її транспортування та розподілу дозволяють широко застосовувати у промисловості багатомоторні електроприводи робочих машин. Це спрощує конструкцію верстатів (зменшується кількість механічних передач між окремими вузлами) та відкриває значні перспективи для автоматизації різноманітних технологічних процесів. Електродвигуни

також активно використовуються у транспортній галузі як тягові двигуни, що приводять у рух колеса локомотивів, електропоїздів, тролейбусів, деяких автомобілів тощо.

Останнім часом суттєво зросло використання низькопотужних електричних мікромашин — від пристроїв потужністю у частки до кількох сотень Ват. Такі електричні апарати знаходять застосування в системах автоматизації та комп'ютерній техніці.

Окрему категорію складають двигуни, призначені для побутових приладів: пирососів, холодильників, вентиляторів тощо. Потужність цих двигунів невелика (від кількох до сотень Ват), їхня конструкція проста й довговічна, і вони виготовляються у великих обсягах.

Електрична енергія, вироблена на станції, мусить бути доставлена до місць споживання, особливо до великих індустріальних регіонів, розташованих за сотні кілометрів від потужних електростанцій. Однак недостатньо лише передати енергію — її необхідно ефективно розподілити серед широкого кола кінцевих споживачів: промислових підприємств, транспорту, житлового сектору тощо. Передавання електроенергії на великі дистанції здійснюється при високих напругах (до 500 кВ і вище), що мінімізує втрати в лініях електропередачі. Отже, у процесі транспортування та розподілу електроенергії необхідно багаторазово підвищувати та знижувати її напругу. Ця операція виконується за допомогою електромагнітних пристроїв, відомих як трансформатори. Трансформатор не належить до електричних машин, оскільки його робота не пов'язана з перетворенням електричної енергії на механічну чи навпаки; він лише змінює рівень напруги електричної енергії. Крім того, трансформатор є нерухомим (статичним) пристроєм, що не має рухомих частин. Проте електромагнітні процеси, що відбуваються у трансформаторах, схожі на ті, що мають місце під час функціонування електричних машин. Більше того, для електричних машин та трансформаторів є спільною основа електромагнітних і енергетичних явищ, що виникають унаслідок взаємодії магнітного поля з

електричним провідником зі струмом. З огляду на ці причини, трансформатори є невід'ємною частиною навчального курсу з електричних машин.

1.2. Класифікація основних типів електричних машин

Головна відмінність електричних машин від інших видів енергетичних перетворювачів полягає у їхній оборотності: одна й та сама машина здатна працювати або в режимі двигуна (трансформуючи електричну енергію у механічну), або в режимі генератора (трансформуючи механічну енергію в електричну).

За типом поля, що формується в машині і в якому відбувається енергетична трансформація, електричні машини поділяють на індуктивні, ємнісні та індуктивно-ємнісні. Актуальні електричні машини, які масово використовуються у промисловості та інших секторах економіки, належать до індуктивного типу. У них перетворення енергії відбувається в магнітному полі. Ємнісні електричні машини, незважаючи на те, що були винайдені значно раніше за індуктивні, досі не знайшли широкого практичного застосування через труднощі зі створенням достатньо потужного електричного поля, де мало б відбуватися перетворення енергії. Індуктивно-ємнісні апарати з'явилися лише останніми роками. У них енергія трансформується в електромагнітному полі, поєднуючи властивості як індуктивних, так і ємнісних машин. На практиці ці апарати поки не використовуються, тому в цьому посібнику розглядаються виключно індуктивні електричні машини, які далі по тексту називатимуться просто електричними машинами. [7]

Для нормального функціонування електричної машини необхідно створення у ній обертового магнітного поля. Принцип формування обертового поля є ідентичним для всіх типів машин.

Найпростішим зразком є ідеалізована узагальнена електрична машина (Рис. 1.1.). Це ідеалізована машина, яка характеризується симетричною конструкцією, відсутністю насичення магнітних матеріалів та наявністю гладкого повітряного зазору. На статорі та роторі такої машини розміщено по дві обмотки: w_{α}^s і w_{β}^s на статорі, w_{α}^r і w_{β}^r на роторі, розташовані у просторі з відношенням один до одного, що дорівнює електричному куту в 90° . Якщо подати струми на обмотки статора або ротора цієї машини, зсунуті за часом також на електричний кут 90° , то у повітряному зазорі машини сформується кругове обертове поле. За умови симетричної синусоїдальної напруги, це поле буде синусоїдальним, оскільки ідеальна машина не створює просторових гармонік. Усі реальні електричні машини певною мірою відхиляються від цієї ідеальної моделі, оскільки у повітряному зазорі реальної машини неможливо досягти ідеально синусоїдального розподілу поля.

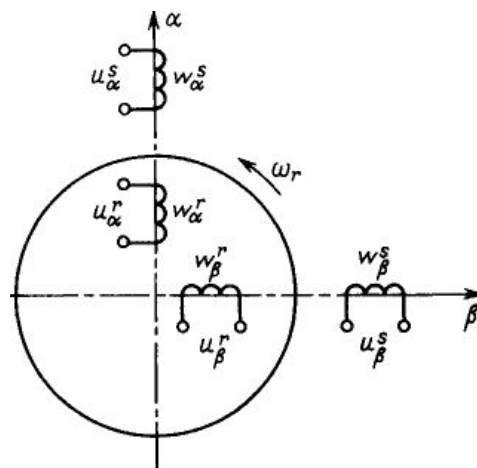


Рис. 1.1. Узагальнена електрична машина

Аби МДС, потрібна для формування магнітного поля, не набувала надмірних розмірів, статор та ротор електричної установки виготовляють із феромагнітного матеріалу, чия магнітна проникність значно більша за таку у немагнітному середовищі ($\mu_{ст} \gg \mu_0$). Внаслідок цього, магнітні силові лінії поля концентруються у магнітопроводі машини і практично не виходять за межі її робочих зон. Ті ділянки магнітопроводу, де потік є змінним, для мінімізації втрат на вихрові струми та гістерезис, конструктивно виконують

із тонких пластин електротехнічної сталі, зібраних у пакет (шихтовані). Натомість, ділянки магнітопроводу машин, де потік залишається сталим (наприклад, полюси та корпуси машин постійного струму), можуть бути виготовлені монолітними із конструкційної сталі [7].

Невід'ємною умовою для здійснення енергетичного перетворення є зміна магнітного потокозчеплення обмоток залежно від взаємного розташування складових частин – статора та ротора. Цю вимогу можна задовольнити при різноманітних конструктивних рішеннях магнітопроводу, а також завдяки різним способам виконання та розміщення обмоток (Рис. 1.2, а - г). Конкретний варіант розробляється, виходячи з типу вхідного струму, найбільш зручного методу створення поля, та загальної класифікації машини. Для реалізації енергетичного перетворення у переважній більшості електричних машин використовується принцип обертового руху.

Електричні машини зазвичай проектують з однією обертовою ланкою – циліндричним ротором, та нерухомою складовою – статором. Такі установки називаються одновимірними. Вони мають лише один ступінь свободи механічного руху. Практично всі моделі, що випускаються промисловістю, є одновимірними, мають циліндричний ротор, що обертається, та зовнішній нерухомий статор [7].

Електромагнітний момент у електричних машинах діє одночасно і на ротор, і на статор. Якби обом частинам машини було дозволено обертатися, вони б рухалися у протилежних напрямках. Машини, де обертаються і ротор, і статор, класифікуються як двомірні, оскільки мають два ступені свободи. У системах навігації ротором може слугувати сфера, що обертається відносно двох статорів, розміщених під кутом 90 градусів один до одного. Такі пристрої мають три механічні ступені свободи. У сфері космічної електромеханіки трапляються шестивимірні електромеханічні системи, у яких як ротор, так і статор володіють по три ступені рухливості кожен.

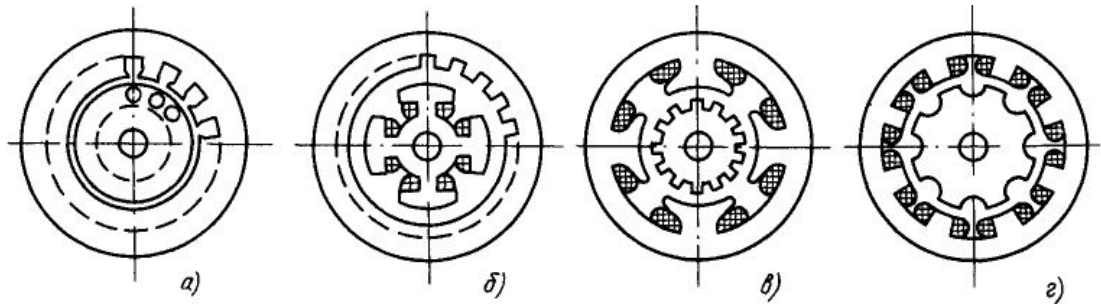


Рис 1.2. Основні конструктивні виконання електричних машин:
а - асинхронна; б - синхронна; в - колекторна; г - індукторна

Використовуються також електромашини, ротор (або ж обидві частини – і ротор, і статор) яких оформлені у вигляді диска. Такі механізми іменують торцевими.

Електромашини здатні не лише обертатися, а й здійснювати зворотно-поступальні рухи (лінійні машини). У цих пристроях статор та ротор не замкнені, а магнітне поле відбивається від їхніх країв, що спричиняє викривлення поля у проміжку.

Вплив крайового ефекту у лінійних електромашинах негативно позначається на їхній ефективності. Скромні енергетичні характеристики стримують поширення електромашин зі зворотно-поступальним принципом дії.

З типової машини, що має циліндричні статор та ротор, виводять конструкції із сегментним статором та лінійні аналоги (рис. 1.3). Якщо ж діаметр ротора сегментної машини необмежено зростатиме, ми отримаємо лінійний двигун (рис. 1.3, б).

Лінійні двигуни, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі, знаходять своє місце у промисловості для реалізації прямолінійних переміщень.

У режимі генерації енергії лінійні машини практично не використовуються.

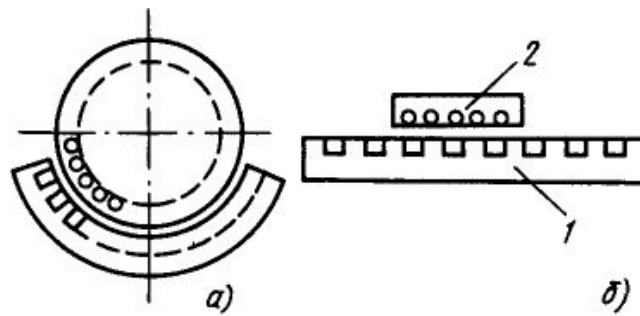


Рис. 1.3. Модифікація конструктивного виконання електричних машин:
 а - машина із сегментним статором; б - лінійний двигун; 1 - статор; 2 - ротор

У переважній більшості електричних пристроїв магнітне поле формується завдяки змінним струмам, що протікають через обмотення статора і ротора. Проте виділяється певна група машин, де поле генерується постійними струмами, введеними лише в обмотки статора. Трансформація енергії тут відбувається завдяки коливанням магнітного потоку в повітряному зазорі, які спричинені зміною магнітної проникності при обертанні ротора. Ротор таких агрегатів має чітко окреслені виступи (зубці), рух яких відносно статора спричиняє варіації магнітного опору на ділянках зазору та в обмотці статора. Ці машини відомі як параметричні або ж індукторні.

Конфігурації індукторних машин досить варіативні. Найбільш поширеною є та, що містить два ротори (1) та статори (2) (Рис. 1.4). Якщо ротори зміщені один відносно одного на кут, що дорівнює 90 електричним градусам, сумарний магнітний опір машини залишається незмінним при їх обертанні, і в обмотці збудження (3), живильної постійний струм, не індукується жодної змінної напруги. Ротори позбавлені будь-яких обмоток. Під час роботи машини напруга знімається з обмоток змінного струму (4), розміщених у пазах кожного статора. Потік збудження знаходить своє замкнення через корпус статора та втулку ротора (5), жорстко закріплену на валу.

За типом споживаної або відданої в мережу електричної енергії, електромашини класифікують на машини змінного та постійного струму. Агрегати змінного струму додатково поділяються на синхронні, асинхронні

та колекторні.

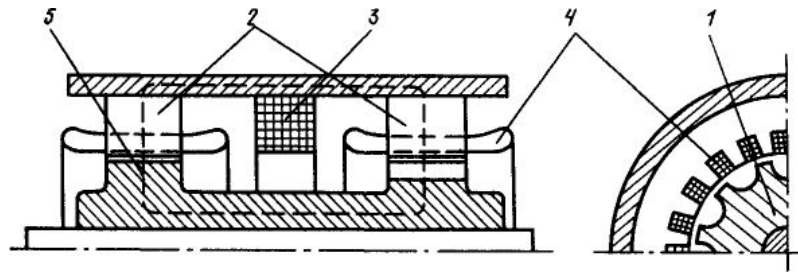


Рис. 1.4. Індукторна машина із двома роторами

У машинах синхронного типу поле збудження формується за допомогою обмотки, розміщеної на роторі, яка живиться постійним електричним струмом. Обмотка, що знаходиться на статорі, підключається до мережі змінного струму. Стандартна конфігурація таких машин передбачає, що ротор, обладнаний обмоткою збудження, обертається всередині нерухомого статора. Зворотна інверсія, за якої ротор із обмоткою збудження стаціонарний, а статор обертається, у синхронних машинах спостерігається рідко, оскільки підведення струму до рухомої обмотки змінного струму є технічно складним завданням.

Ротор синхронної машини може мати виступаючі полюси, котрі оснащені феромагнітними сердечниками, на які навиті котушки збудження. Ротори синхронних машин, проектування яких розраховане на швидкість обертання 1500 або 3000 оборотів за хвилину і вище, зазвичай є явно полюсними. У таких випадках обмотка збудження укладається у профрезеровані пази ротора. Обмотка змінного струму синхронних машин, як правило, має розподілене виконання, тобто вона рівномірно розташована по периметру внутрішнього діаметра статора у його пазах. [7]

В асинхронних машинах відсутня спеціальна обмотка для створення збудження; необхідний робочий потік генерується реактивним струмом обмотки статора. Цим пояснюється простота конструктивного виконання та легкість технічного обслуговування асинхронних двигунів, оскільки немає ковзних контактів для подачі живлення до обертової обмотки збудження, і відпадає потреба у додатковому джерелі постійного струму для активації машини. Обмотки статорів та роторів асинхронних машин є розподіленими

та інтегровані у пази їхніх осердь.

На роторах асинхронних машин монтується або фазна обмотка, яка, як правило, має ту ж кількість фаз, що й обмотка статора, і ізольована від корпусу, або ж короткозамкнена обмотка. Короткозамкнений варіант роторної обмотки складається з неізольованих стрижнів із провідного матеріалу, розміщених у пазах ротора та з'єднаних між собою по обох його торцях. Альтернативно, вона може бути реалізована шляхом заливки пазів алюмінієм. Залежно від типу обмотки ротора, розрізняють асинхронні двигуни з фазними роторами або асинхронні двигуни з роторами короткого замикання. [7]

Стандартна конфігурація асинхронних машин передбачає розташування ротора всередині статора. Однак для деяких приводів, наприклад, для транспортерів, більш доцільним може бути розміщення ротора зовні статора. Такі машини називають зворотними або машинами із зовнішнім ротором. Зазвичай вони виготовляються з роторами типу короткого замикання.

Серед різновидів колекторних машин змінного струму найбільшого поширення набули однофазні двигуни невеликої потужності. Вони застосовуються в механізмах, де підведення трифазного або постійного струму є ускладненим чи економічно невиправданим (наприклад, у ручному електроінструменті, побутовій апаратурі тощо). Для машин середньої та, особливо, великої потужності колекторні машини змінного струму наразі не використовуються, за винятком окремих спеціалізованих агрегатів, наприклад, типу двигуна Шраге-Ріхтера.

Переважає більшість машин постійного струму є колекторними. Вони виробляються з потужністю, починаючи від частки вата і аж до кількох тисяч кіловат. Обмотки збудження машин постійного струму монтуються на головних полюсах, закріплені на станині. Виводи окремих витків обмотки ротора (якоря) припаюються до пластин колектора. Колектор, котрий обертається на одному валу з якорем, та нерухомий апарат щіток слугують для трансформації постійного струму мережі на змінний струм в обмотці

якоря (для двигунів) або перетворення багатозначного змінного струму якоря на постійний струм мережі (для генераторів постійного струму).

Конструктивне виконання машин постійного струму складніше, їхня вартість вища, а експлуатаційні витрати більші порівняно з асинхронними машинами. Тому двигуни постійного струму використовуються в приводах, які вимагають широкого діапазону та плавного регулювання швидкості, або ж в автономних системах, де живлення двигунів здійснюється від акумуляторних батарей. [7, 8]

Хоча більшість машин постійного струму обладнені колектором – механічним перетворювачем частоти, існують і безколекторні різновиди. Наприклад, уніполярні генератори (Рис. 1.5) застосовуються для генерації значних струмів (до 100 кА) при низьких напругах. У таких машинах колектор відсутній, проте їхня робота можлива виключно за наявності ковзного контакту, що складається зі щіток 1 та кільця 2. Постійний магнітний потік, створений струмами обмотки збудження 5, замикається через станину 3, масивний ротор 4 та два повітряні проміжки. Постійні струми індукуються у масивному роторі і знімаються через щітки. Для мінімізації електричних втрат у роторі в ньому передбачаються пази, у які укладаються мідні стрижні 6. Ці стрижні, зварені з контактними кільцями, формують на роторі замкнену обмотку.

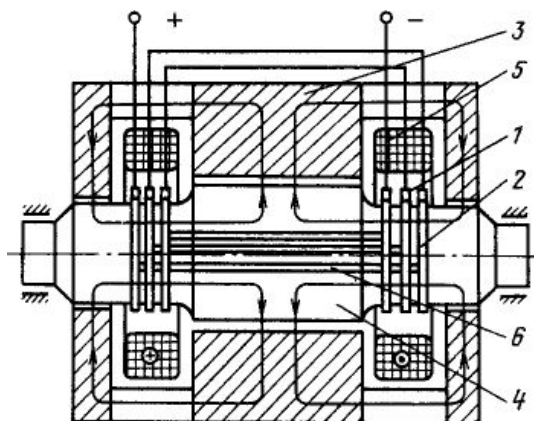


Рис. 1.5. Уніполярна електрична машина

Останнім часом набули популярності безколекторні двигуни постійного струму, керовані за допомогою вентильних перетворювачів, де механічний перетворювач частоти замінено на електронний, побудований на

напівпровідникових компонентах.

Хоча існує безліч різновидів електричних машин, незалежно від їхньої конструкції, типу та кількості фаз підвідного струму, а також методів формування магнітних полів, енергоперетворення всередині них відбувається лише за однієї умови: у стаціонарних робочих режимах магнітні поля, створені статором та ротором, залишаються нерухомими один відносно одного. Поле, що формується струмами в обмотці ротора, обертається відносно самого ротора. При цьому механічна швидкість обертання ротора та кутова швидкість поля відносно ротора складаються, дорівнюючи частоті обертання поля статора, що зумовлює жорстку взаємозалежність частот струмів у ланцюгах статора і ротора, яка описується співвідношенням

$$f_2 = f_1 s, \quad (1.1)$$

де f_1 , f_2 - частоти струму й напруги статора й ротора; s - відносна частота обертання ротора або ковзання, обумовлена частотою обертання поля статора n_1 і частотою обертання ротора машини n_2 :

$$s = (n_1 \pm n_2)/n_1 \quad (1.2)$$

У синхронних машинах обмотка збудження ротора харчується постійним струмом ($f_2 = 0$), і, отже, з (1.1) $s = 0$, звідки по (1.2) $n = n_1$ т. е. ротор синхронної машини обертається синхронно з полем, створеним струмами обмотки статора.

Жорстка залежність між частотою струму та швидкістю обертання окреслила сферу застосування синхронних машин. Синхронні генератори практично є безальтернативними потужними джерелами електроенергії на електростанціях. Синхронні двигуни, зважаючи на складнощі їхнього запуску, знаходять застосування як привідні механізми для промислового обладнання, що працює тривалий час на фіксованій швидкості обертання без потреби у частих пусках; прикладами є приводи повітродувки, компресорів тощо [7].

У машинах асинхронного типу струм у роторній обмотці індукуються ЕРС, що виникає у провідниках обмотки завдяки магнітному полю статора.

Індукція ЕРС відбувається лише тоді, коли провідники перетинають

магнітні силові лінії поля, що можливо лише за умови нерівності швидкостей обертання ротора та поля статора ($n_2 > n_1$). Частота струму в роторі розраховується за формулою $f_2 = f_1 s$, що забезпечує відносний спокій поля струмів ротора стосовно поля статора, а швидкість обертання ротора при цьому становить $n_2 = n_1(1-s)$. Коли ковзання $s=1$, ротор залишається нерухомим $f_2=f_1$, перетворення механічної енергії не відбувається, і апарат функціонує у трансформаторному режимі.

Якщо роторну обмотку живити постійним струмом, машина переходить у режим роботи синхронного типу. При живленні ротора змінним струмом асинхронний двигун спроможний обертатися зі швидкістю, вищою за частоту поля статора. Такі режими застосовуються доволі рідко через ускладнений запуск апарату: потрібен або окремий розгінний двигун, або частотний перетворювач. Як приклад двигуна цього виду слугують машини Шраге-Ріхтера, де для зміни частоти роторного струму використовується колектор, зв'язаний із додатковою обмоткою ротора. Регулювання швидкості обертання двигуна досягається зміною додаткової ЕРС, що вводиться в роторну обмотку, шляхом переміщення щіток на колекторі.

У машинах постійного струму поле збудження формується постійним струмом, тоді як поле якоря – змінним. Перетворення постійного струму мережі на багатофазний змінний струм якоря реалізується за допомогою механічного перетворювача – колектора. Частота змінного струму якоря жорстко прив'язана до його швидкості обертання, і магнітне поле, створене струмом якоря, залишається нерухомим відносно поля збудження машини [7].

Машини постійного струму безколекторного (вентильного) типу, як правило, мають зворотну конфігурацію: їхні обмотки збудження, що живляться постійним струмом, розміщені на рухомому роторі, а обмотки якоря – на нерухомому статорі. Частота живлення якірних обмоток встановлюється статичним частотним перетворювачем. Умова нерухомості магнітних полів статора та ротора дає змогу регулювати швидкість обертання вала двигуна шляхом маніпуляцій з частотою живлення його якірних

обмоток. У такому сенсі, вентильні машини постійного струму можна розглядати як синхронні аналоги, чії змінні обмотки живляться від відповідного перетворювача частоти.

В однофазних колекторних машинах обмотки збудження отримують живлення змінним струмом, формуючи пульсуюче поле. Колектор трансформує однофазний вхідний струм у багатофазний змінний струм, частота якого залежить від швидкості обертання ротора, за умови відносної нерухомості магнітних полів статора й ротора. Через проблеми з комутацією колекторні машини змінного струму виготовляються лише малої потужності.

Електричні машини класифікують за їхнім функціональним використанням таким чином:

- електромашинні генератори, котрі здійснюють перетворення механічної енергії на електричну. Їх монтують на електростанціях та в різних типах рухомого складу: автомобілях, літаках, тепловозах, судах, пересувних енергоустановках тощо. На електростанціях вони обертаються завдяки потужним паровим та гідравлічним турбінам, а на транспортних засобах — від двигунів внутрішнього згоряння та газових турбін. Нерідко генератори застосовують як джерела живлення для апаратури зв'язку, систем автоматики, вимірвальних приладів та подібного;

- електричні мотори, що перетворюють електричну енергію у механічну; вони забезпечують обертання різноманітного обладнання, механізмів та пристроїв, які використовуються у виробництві, аграрному секторі, комунікаціях, на транспорті, у військовій сфері та в побуті. У сучасних системах автоматичного управління вони виконують роль виконавчих, регулювальних та програмних елементів;

- електромашинні перетворювачі, які змінюють змінний струм на постійний, і навпаки, а також модифікують рівень напруги змінного чи постійного струму, частоту, кількість фаз та інші параметри. Їх активно задіюють у промисловості, на транспорті та у військових цілях, хоча протягом останнього десятиліття значення електромашинних перетворювачів суттєво знизилось завдяки впровадженню статичних напівпровідникових аналогів;

- електромашинні компенсатори, метою яких є генерація реактивної потужності в електроустановках задля покращення енергетичних характеристик як джерел, так і споживачів електроенергії;

- електромашинні підсилювачі, що використовуються для керування об'єктами зі значною потужністю за допомогою слабких електричних сигналів, які подаються на їхні обмотки збудження (керування). Роль електромашинних підсилювачів останнім часом також зменшилася через широке використання підсилювальних пристроїв на базі напівпровідникових компонентів (транзисторів, тиристорів);

- електромеханічні перетворювачі сигналів, котрі генерують, змінюють та підсилюють різноманітні сигнали. Їх зазвичай конструюють у вигляді електричних мікромашин і активно застосовують у системах автоматичного регулювання, вимірювальних та обчислювальних пристроях як різноманітні сенсори, диференціюючі та інтегруючі ланки, порівнювальні та регулювальні елементи тощо.

Поділ за типом струму та принципом роботи. Електричні машини розділяють за родом струму на ті, що працюють на змінному струмі (АС), та на постійному струмі (DC). Машини змінного струму, залежно від принципу дії та особливостей електромагнітної системи, поділяються на трансформатори, асинхронні, синхронні та колекторні машини.

Трансформатори широко використовуються для зміни рівня напруги: у мережах передачі та розподілу електроенергії, у випрямних блоках, апаратурі зв'язку, автоматики та обчислювальній техніці, а також під час електричних вимірювань (вимірювальні трансформатори) та функціональних перетворень (обертіві трансформатори).

Асинхронні машини застосовують переважно як трифазні електричні двигуни. Спрощеність конструкції та висока надійність дозволяють використовувати їх у різних галузях техніки для приведення в рух верстатів, підйимально-транспортного та ґрунтообробного обладнання, компресорів, вентиляторів тощо. У системах автоматичного керування активно застосовуються одно- та двофазні керовані асинхронні двигуни, асинхронні

тахогенератори, а також сельсини.

Синхронні машини використовуються як генератори змінного струму стандартної промислової частоти на електростанціях, а також як генератори підвищеної частоти в автономних джерелах живлення (на суднах, літаках тощо). У потужних електричних установках застосовують також синхронні електродвигуни. В апаратурі автоматики поширені різні малопотужні синхронні машини (реактивні, з постійними магнітами, гістерезисні, крокові, індукторні та інші).

Колекторні машини змінного струму застосовуються відносно рідко і переважно як електричні мотори. Вони мають складну будову і вимагають уважного обслуговування. В автоматичних системах, а також у різноманітних побутових приладах використовуються універсальні колекторні двигуни, здатні працювати як від постійного, так і від змінного струму.

Машини постійного струму використовуються як генератори та електродвигуни у системах електроприводу, де потрібне регулювання швидкості обертання у широкому діапазоні: залізничний та морський транспорт, прокатні стани, системи електричної трансмісії для важконавантажених автомобілів, підйально-транспортне й землерийне обладнання, складні металообробні верстати тощо; а також у випадках, коли живлення електродвигунів забезпечується акумуляторними батареями (стартери двигунів, мотори підводних човнів, космічних апаратів тощо).

Генератори постійного струму часто залучають для живлення обладнання зв'язку, заряджання акумуляторних батарей, як основні джерела енергії на транспортних засобах (автомобілі, літаки, тепловози, пасажирські вагони). Проте останнім часом генератори постійного струму витісняються генераторами змінного струму, що працюють у парі з напівпровідниковими випрямлячами.

У системах автоматичного керування машини постійного струму широко задіяні як електромашинні підсилювачі, виконавчі двигуни та тахогенератори.

Залежно від свого призначення, електричні мікромашини для

автоматичних пристроїв класифікують у такі групи:

силові мікродвигуни, що забезпечують обертання різних механізмів у комплексі автоматики, самописних приладів тощо;

керовані (виконавчі) мотори, які перетворюють поданий на них електричний сигнал у механічне зміщення валу, тобто реалізують задані команди; тахогенератори, що трансформують механічне обертання валу в електричний сигнал — напругу, прямо пропорційну швидкості обертання валу;

обертові трансформатори, що генерують на виході напругу, яка залежить від функції кута повороту ротора, наприклад, синуса чи косинуса цього кута, або ж самого кута;

машини синхронного зчеплення (сельсини, магнесини), які забезпечують синхронне та синфазне повертання або обертання кількох механічно не пов'язаних осей;

мікромашини для гіроскопічних приладів (гіроскопічні двигуни, датчики кута, датчики моменту), які підтримують обертання роторів гіроскопів з високою частотою та коригують їхнє положення;

електромашинні перетворювачі та підсилювачі.

Електричні мікромашини, віднесені до перших двох категорій, нерідко називають силовими, тоді як третя – п'ята категорії – інформаційними.

Поділ за потужністю. Електричні машини за показником потужності умовно розподіляють на мікромашини, машини малої, середньої та великої потужності.

Мікромашини мають потужність у межах від доли вата до 500 Вт. Ці апарати можуть працювати як на постійному, так і на змінному струмі нормальної та підвищеної (400-2000 Гц) частоти.

Машини малої потужності — у діапазоні від 0,5 до 10 кВт. Вони функціонують на постійному або змінному струмі нормальної чи підвищеної частоти.

Машини середньої потужності — від 10 кВт до кількох сотень кіловат.

Машини великої потужності — понад кілька сотень кіловат. Машини

великої та середньої потужності здебільшого призначені для експлуатації на постійному чи змінному струмі стандартної частоти.

Поділ за швидкістю обертання. Електричні машини за частотою обертання умовно поділяють на: тихохідні — з частотами обертання до 300 об/хв; середньошвидкісні — від 300 до 1500 об/хв; швидкохідні — від 1500 до 6000 об/хв; надшвидкохідні — понад 6000 об/хв. Мікромашини виготовляють для швидкостей обертання від кількох обертів за хвилину до 60000 об/хв; машини великої та середньої потужності — зазвичай до 3000 об/хв.

1.3. Основні рівняння синхронних машин

Напруга між виводами електричної машини, яка генерує струм під навантаженням, не збігається із напругою, виміряною без підключення зовнішнього навантаження. Це зумовлене низкою чинників: ефектом впливу обмотки якоря, магнітним потоком, що не бере участі у генерації (потік розсіювання), а також падінням напруги через опір самої обмотки статора. Коли машина працює з навантаженням, спостерігається наявність кількох електрорушійних сил (ЕРС) від обмоток, які, комбінуючись, формують загальний магнітний потік [5]. Для детального розгляду процесів у такій машині зазвичай базуються на гіпотезі про те, що всі ЕРС генератора діють незалежно. Окрім головного магнітного потоку та потоку, спричиненого реакцією якоря, в обмотці якоря існує ще й магнітний потік розсіювання Φ_{σ} , який наводить у цій самій обмотці відповідну ЕРС розсіювання:

$$\dot{E}_{\sigma} = -j \cdot \dot{I}_a X_{\sigma}, \quad (1.3)$$

де X_{σ} – опір розсіювання обмотки якоря.

Для явнополюсного генератора ЕРС розсіювання можна записати у вигляді

$$\dot{E}_\sigma = \dot{E}_{\sigma d} + \dot{E}_{\sigma q} = -j \dot{I}_d X_\sigma - j \dot{I}_q X_\sigma \quad (1.4)$$

де $\dot{E}_{\sigma d}$ – ЕРС розсіювання по поздовжній осі;

$\dot{E}_{\sigma q}$ – ЕРС розсіювання по поперечній осі.

Поздовжня ЕРС явнополюсної синхронної машини

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_\sigma = -j \dot{I}_d (X_{ad} + X_\sigma). \quad (1.5)$$

Поперечна ЕРС явнополюсної синхронної машини

$$\dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma = -j \dot{I}_q (X_{aq} + X_\sigma). \quad (1.6)$$

Позначимо

$$X_{ad} + X_\sigma = X_d, \quad (1.7)$$

$$X_{aq} + X_\sigma = X_q, \quad (1.8)$$

де X_d – синхронний індуктивний опір по поздовжній осі;

X_q – синхронний індуктивний опір по поперечній осі.

Фазна напруга обмотки якоря генератора, відповідно до другого закону Кірхгофа, рівна сумі ЕРС, індукованих у фазах за виключенням падіння напруги у активному опорі фази обмотки якоря R_a . Тому рівняння, складене за цим законом для контуру обмотки якоря матиме вигляд:

$$E = E_0 + E_d + E_q - I_a R_a \quad (1.9)$$

де R_a – активний опір обмотки якоря.

З урахуванням (1.5) – (1.9) можемо записати:

$$U = E_0 - j I_d X_d - j I_q X_q - I_a R_a \quad (1.10)$$

Отже, напруга, що вимірюється на клеммах фази явнополюсного синхронного генератора, дорівнює електрорушійній силі (ЕРС), що генерується основним магнітним полем, мінус падіння напруги, що виникають у поздовжньому та поперечному синхронних індуктивних опорах обмотки якоря. Графічне зображення векторної діаграми напруг для такого явнополюсного синхронного генератора представлено на рисунку 1.6.

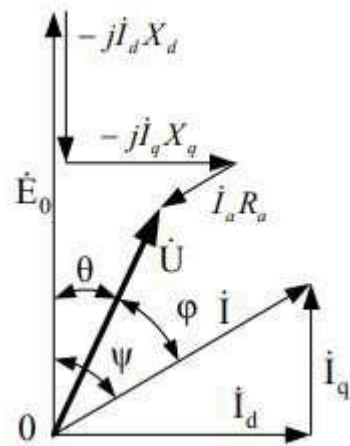


Рисунок 1.6 – Векторна діаграми явнополюсного синхронного генератора

В неявно полюсному генераторі $X_d=X_q=X_c$ (зазор по всьому околу індуктора однаковий), опір X_c дістав назву синхронного індуктивного опору.

З врахуванням цих висновків (1.10) для неявнополюсного генератора можна записати:

$$U = E_0 - jI_d X_c - I_a R_a \quad (1.11)$$

Векторна діаграма неявнополюсного синхронного генератора, побудована за рівнянням (1.11), наведена на рис. 1.7.

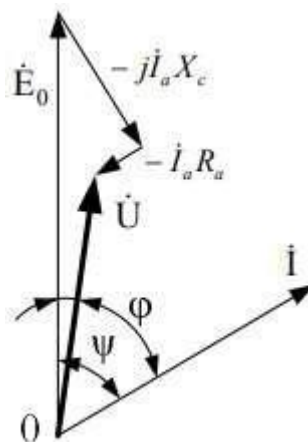


Рисунок 1.7 – Векторна діаграми неявнополюсного синхронного генератора

Як впливає з діаграм на рис. 1.6 і рис. 1.7, кут електромагнітного навантаження θ характеризує зсув не лише між векторами Φ_0 і Φ_δ , але і зсув за фазою між векторами E_0 та \dot{U} . Обидві діаграми (рис. 1.6 та рис. 1.7)

відповідають активно-індуктивному навантаженню. У режимі синхронного двигуна електромагнітна взаємодія між статором та ротором відрізняється від режиму генератора знаком кута θ (кут θ в синхронному двигуні від'ємний). Ведучим в режимі двигуна є поле статора, воно зчеплене з полем ротора різнойменними полюсами і приводить його в рух із синхронною швидкістю. Якщо до ротора прикласти гальмівний момент навантаження, то його швидкість залишиться тією ж, але він зміститься відносно осі полюсів поля статора на кут, що відповідає куту навантаження θ . Синхронні двигуни виготовляються тільки явно полюсними. Основним рівнянням синхронного двигуна є рівняння балансу напруг, складене за другим законом Кірхгофа для контуру обмотки якоря.

$$U = -E_0 + I_a R_a + jI_d X_d + jI_q X_q \quad (1.12)$$

Векторна діаграма синхронного двигуна в режимі перезбудження показана на рис. 1.8. При перезбудженні струм є випереджаючим, тобто кут між ЕРС та струмом $\psi < 0$.

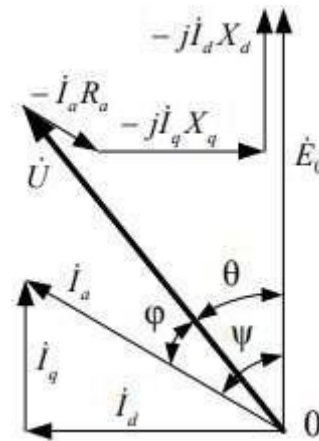


Рисунок 1.8 – Векторна діаграма синхронного двигуна

1.4. Характеристики синхронних генераторів

З-поміж усього спектру параметрів синхронних машин виділяють певний пласт показників, що описують взаємозв'язок між напругою на клеммах обмотки якоря U , величиною струму якоря I_a та індукційним струмом у колі збудження i_f . Цей зв'язок розглядається за умов фіксованої номінальної

частоти змінного струму $f=f_n$ (або відповідної номінальної швидкості обертання $n=n_n$) та збереження сталого кута φ між вектором струму та напруги на статорі $\varphi = \text{const}$ у стійкому робочому режимі.

Ці залежності візуально демонструють ключові особливості синхронних генераторів. Вони можуть бути отримані як шляхом виконання розрахунків (застосовуючи векторні діаграми), так і на основі результатів експериментальних випробувань. Загалом, показники для явнополюсних та неявнополюсних машин практично ідентичні.

Характеристика холостого ходу (Х.Х.) визначає залежність $U = f(i_f)$ при $I=0$ і $f=f_n$. Характеристика холостого ходу обумовлюється магнітними властивостями синхронної машини. Може бути отримана з розрахунку магнітного кола або з дослідним шляхом. Згідно основного рівняння генератора (1.11), (1.11) в режимі холостого ходу $U=E$. Характеристики Х.Х. різних синхронних генераторів можна зобразити у відносних одиницях:

$$U^* = U / U_{ном}, \quad (1.13)$$

$$i_f^* = i_f / i_{f0.ном}, \quad (1.14)$$

де $i_{f0.ном}$ – струм збудження в режимі Х.Х. при номінальній напрузі $U=U_{ном}$. Такі характеристики мало відрізняються одна від одної. Тому при розрахунках різних режимів роботи енергетичних систем, у яких працює багато генераторів, для спрощення розрахунків приймається, що характеристики Х.Х. усіх турбогенераторів, а також характеристики Х.Х. усіх гідроенераторів, виражені у відносних одиницях, однакові і відповідають деяким середнім даним реальних характеристик генераторів. Такі характеристики називаються нормальними.

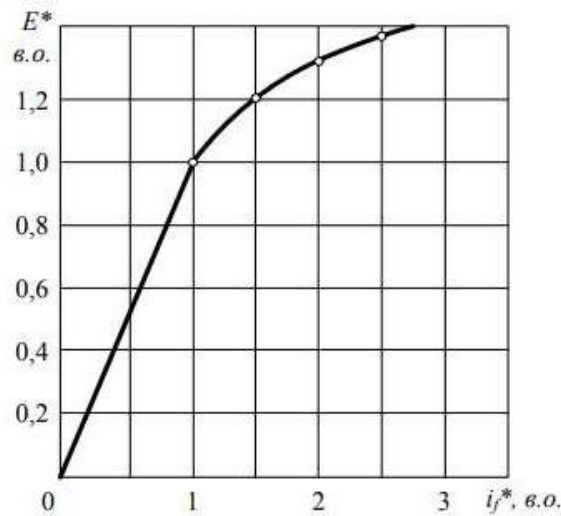


Рисунок 1.9 – Нормальна характеристика холостого ходу синхронного генератора

Характеристика короткого замикання (К.З.) знімається при замиканні виводів усіх фаз обмотки якоря накоротко (симетричне коротке замикання) і визначає залежність $I_a = f(i_f)$ при $U=0$ і $f=f_n$. Якщо знехтувати досить незначним активним опором якоря ($R_a = 0$), то опір кола якоря в режимі короткого замикання буде чисто індуктивним. Тому $\psi = 90^\circ$, $I_q = 0$, $I_d = I_a$ на підставі рівняння (1.14)

$$E_0 = jI_d X_d \quad (1.15)$$

Таким чином, при к.з. в обмотці якоря протікає чисто індуктивний струм, який створює поздовжню розмагнічувальну реакцію якоря. Внаслідок цього при короткому замиканні магнітне коло машини не насичене і характеристика К.З. $I_a = f(i_f)$ прямолінійна. Характеристики Х.Х. і К.З. (рис.1.10) дають можливість визначити важливий параметр синхронної машини – відношення короткого замикання (ВКЗ). Відношенням короткого замикання називають відношення струму збудження, що відповідає номінальній напрузі при Х.Х. до струму збудження, що відповідає

номінальному струму при К.З.

$$BKЗ = i_{f0.ном} / i_{fk.ном} \quad (1.16)$$

$i_{fn.ном}$ – струм збудження синхронного генератора, що відповідає номінальному струму якоря $I_{аном}$ при К.З.

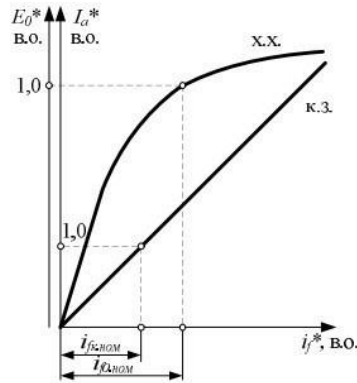


Рисунок 1.10 – Характеристика короткого замикання синхронного генератора

Відношення ВКЗ має велике практичне значення при аналізі властивостей синхронної машини: машини з малим ВКЗ мають меншу статичну стійкість (здатність утримуватись в синхронізмі) при паралельній роботі з мережею, мають більші коливання напруги при різких змінах навантаження, однак вони мають менші габарити та дешевші, ніж машини з більшим значенням ВКЗ. Неявно полюсні машини (турбогенератори) мають ВКЗ = 0,4...0,7, а явноплюсні машини (гідрогенератори) мають ВКЗ = 1,0...1,4. Тому сталий струм короткого замикання у синхронній машині може бути меншим номінального.

Значення ВКЗ обернено пропорційне синхронному опору по поздовжній осі X_d :

$$BKЗ = \frac{U_n}{I_n X_d} = \frac{1}{X_d^*}$$

Відносна потужність короткого замикання (ВКЗ) зростає, коли відносна величина X^*d зменшується, а проміжок повітряний між обмотками статора та ротора збільшується. Важливість ВКЗ проявляється під час роботи синхронної машини, оскільки вона вказує на кратність пускового струму та встановлює, на яку потужність можна навантажити сам генератор.

Якщо ВКЗ низька, це зазвичай пов'язано з високим значенням X_d . Такий стан призводить до значного падіння напруги під навантаженням та обмежує максимальну потужність генератора при заданому збудженні. Великий X_d свідчить про малу відстань повітрям між статором і ротором. У такому разі для проходження основного магнітного потоку не потрібна потужна реактивна сила збудження, що дає змогу зробити габарити статора меншими. Це, відповідно, здешевлює синхронну машину.

Коли ж повітряний проміжок значний, ВКЗ набуває високого значення. Це, у свою чергу, вимагає збільшення кількості витків у котушці збудження та збільшення розмірів ротора. Така конструкція робить машину дорожчою, проте покращує її експлуатаційні характеристики: X_d стає меншим, падіння напруги під навантаженням знижується, а гранична потужність при тому ж збудженні зростає.

Навантажувальна характеристика – це залежність напруги на виводах обмотки якоря від струму збудження $U=f(i_f)$, при постійному. Навантажувальна характеристика – це залежність напруги на виводах обмотки якоря від струму збудження $U=f(i_f)$, при постійному.

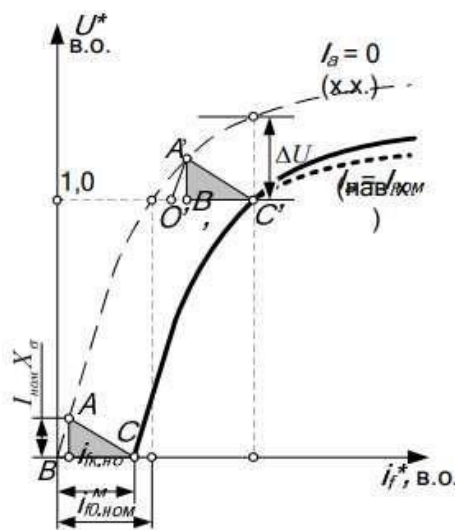


Рисунок 1.11 – Навантажувальна індукційна характеристика синхронного генератора

Оцінка холостого ходу являє собою крайній сценарій серед навантажувальних залежностей, що трапляється, коли струм якоря (I_a) дорівнює нулю. При роботі з індуктивним навантаженням, арматурна реакція має поздовжній розмагнічувальний ефект. Це означає, що її магнітний потік ослаблює головне поле, сформоване струмом збудження, що, у свою чергу, знижує результуючу ЕРС генератора, а отже, і величину напруги U . З цієї причини навантажувальна крива розміщується нижче кривої холостого ходу.

Побудова навантажувальної залежності можлива за умови використання характеристик холостого ходу (Х.Х.), короткого замикання (К.З.) та так званого характеристичного трикутника АВС (рис. 1.11). Вершина С цього трикутника розташована на осі струму збудження і відповідає такому значенню i_f , за якого у режимі К.З. (коли $U=0$) струм якоря I_a досягає номінального значення; положення цієї точки можна встановити за характеристикою К.З. Положення точки А визначається, виходячи з відомої величини індуктивного опору розсіювання обмотки статора X_σ , шляхом відкладання на осі напруги значення, що еквівалентне падінню напруги на цьому розсіювальному опорі, тобто $I_{ном}X_\sigma$. Якщо ж X_σ залишається невідомим, його визначають із трикутника А'В'С': відрізок О'С' має бути ідентичним відрізку ОС, після чого з точки О проводять пряму, паралельну до прямолінійної частини характеристики Х.Х., і в точці перетину з цією характеристикою визначають точку В'. Потім значення X_σ знаходять за формулою

$$X_\sigma = B'C' / I_{ном} \quad (1.17)$$

Точку В отримують шляхом опускання перпендикуляру з т. А до перетину з віссю i_f . Катет ВС трикутника відповідає МРС реакції якоря, вираженої в масштабі струму збудження. Лінія розрахункової навантажувальної характеристики являє собою геометричне місце т. С при паралельному перенесенні трикутника АВС вздовж характеристики Х.Х.

Експериментальна навантажувальна характеристика відрізняється від розрахункової тим, що в діапазоні значень $U=U_{ном}$ проходить нижче від

розрахункової, оскільки при значних значеннях i_f збільшується відносно значення магнітних потоків розсіювання обмотки збудження, що веде до відповідного зменшення приросту основного магнітного потоку Φ_0 , зниження приросту ЕРС E_0 та напруги U відповідно.

Першочерговими показниками експлуатаційних властивостей генераторів вважаються їхні зовнішні характеристики. Ці характеристики демонструють, як вихідна напруга генератора змінюється залежно від струму навантаження, за умови незмінного струму збудження ($U=f(I_a)$, де $i_f=\text{const}$). Великий вплив на форму цих зовнішніх залежностей має коефіцієнт потужності ($\cos\varphi$) навантаження. На рисунку 1.12 проілюстровано зовнішні характеристики генератора для трьох різних значень $\cos\varphi$ навантаження.

Коли навантаження є індуктивним (кут зсуву фаз $\varphi>0$), напруга на клеммах генератора падає. Це зумовлено сукупністю двох чинників: зростанням втрат напруги на активному опорі обмотки якоря та зменшенням загального магнітного потоку через розмагнічувальний ефект, що виникає від самоіндукції якоря.

У випадку чисто активного навантаження ($\varphi=0$) спад напруги на виводах також спостерігається через дію обох зазначених факторів. Однак, оскільки вплив поперечної складової реакції якоря на сумарний магнітний потік та електрорушійну силу машини є менш вираженим, отримана характеристика набуває більш стійкого, "жорсткого" вигляду.

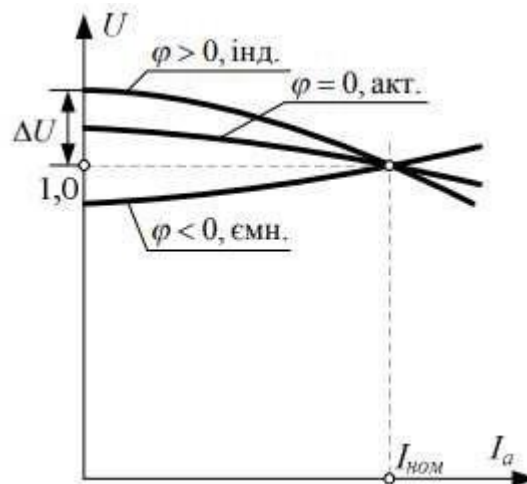


Рисунок 1.12 – Зовнішні характеристики синхронного генератора

За умови індуктивного характеру навантаження ($\varphi < 0$), напруга на клеммах електромашини зростає, що пояснюється посиленням сумарного магнітного потоку, спричиненим намагнічувальним впливом робочого контуру. Темп збільшення цієї напруги при ємнісному режимі є меншим, аніж темп її зменшення у випадку індуктивного завантаження. Це пов'язано з тим, що збільшення електрорушійної сили E_0 через намагнічуючий ефект поля якоря мусить компенсувати падіння напруги на внутрішньому опорі обмотки.

Переважає більшість синхронних генераторів проектується для експлуатації з індуктивним навантаженням, коли коефіцієнт потужності $\cos\varphi = 0,8$, за якого коливання напруги ΔU сягають показників у діапазоні 25–35%.

Регуляторна крива демонструє взаємозв'язок між струмом збудження i_f та струмом якоря I_a , що мусить бути підтримуваним для збереження сталої напруги на клеммах $U = U_{ном} = const$. По суті, ці регуляторні криві є дзеркальним зображенням зовнішньої характеристики для конкретного типу навантаження, що ілюструється на рисунку 1.13. Логіка тут полягає в тому, що коли напруга відхиляється від номінального рівня, єдиним доступним засобом для її повернення до початкового стану є зміна струму збудження (адже швидкість обертання для синхронної машини фіксована і для всіх кривих $n = n_{ном} = const$).

Так, наприклад, регульовальна характеристика для індуктивного навантаження розташовується найвище. Це зумовлено тим, що при суттєвому падінні напруги потрібна еквівалентна "компенсація" – а саме, значне нарощування струму збудження. Натомість, у випадку ємнісного навантаження може навіть знадобитися зменшення струму збудження, оскільки намагнічувальна дія струму якоря вже присутня у повітряному зазорі, посилюючи первинний магнітний потік Φ_0 і сприяючи підвищенню напруги.

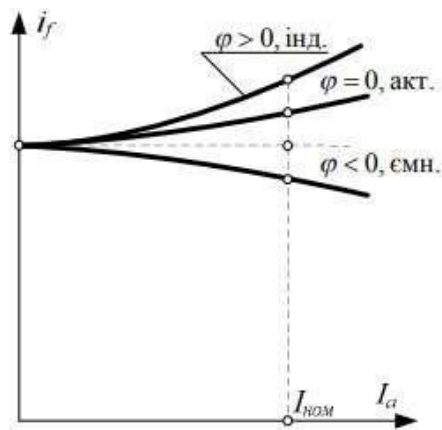


Рисунок 1.13 – Регульовальні характеристики синхронного генератора

1.5. Дослідження синхронної машини

Щоб з'ясувати параметри синхронної машини, проводять низку експериментальних досліджень. Вони дають змогу визначити її робочі властивості за різних умов експлуатації, що, своєю чергою, підтверджує придатність машини до функціонування у варіативних режимах.

Оскільки найчастіше синхронні машини задіюють як зміннострумові генератори, то переважна частина випробувань спрямована на зняття робочих кривих у режимах паралельної роботи з мережею та в режимі автономної генерації.

Однак, для повнішого розуміння характеристик синхронної машини, необхідно також дослідити її роботу як двигуна. Це зумовлено тим, що в ряді випадків, зокрема для керування реактивною потужністю, синхронний двигун може виступати єдиним доступним засобом регулювання.

Основне завдання цієї роботи полягає у тому, щоб на практиці з'ясувати особливості та ключові показники трифазного синхронного генератора. Крім того, необхідно провести розгляд того, як змінюються ці показники залежно від виду електричного навантаження, яке підключене до нього. Також, використовуючи побудовані графіки, слід розрахувати струм короткого замикання генератора.

Зміна активної та реактивної потужностей синхронного генератора, котрий працює у паралелі з потужною мережею, досягається шляхом коригування крутного моменту на валу та струму його збудження. Для гарантування потрібного режиму роботи цього генератора, як правило,

одночасно вносять зміни як у струм збудження, так і в крутний момент, що прикладається. У цьому експерименті буде вивчено процес входження синхронного генератора у синхронізм з мережею, а також проведено емпіричне визначення його U-подібних характеристик.

Висновки до розділу 1

Електричний двигун є ключовим компонентом електроприводу робочих машин. Чудова можливість контролювати електричну енергію, а також простота її транспортування та розподілу дозволяють широко застосовувати у промисловості багатомоторні електроприводи робочих машин. Це спрощує конструкцію верстатів (зменшується кількість механічних передач між окремими вузлами) та відкриває значні перспективи для автоматизації різноманітних технологічних процесів.

Електричні машини розділяють за родом струму на ті, що працюють на змінному струмі, та на постійному струмі. Машини змінного струму, залежно від принципу дії та особливостей електромагнітної системи, поділяються на трансформатори, асинхронні, синхронні та колекторні машини.

Напруга, що вимірюється на клеммах фази явнopolюсного синхронного генератора, дорівнює електрорушійній силі, що генерується основним магнітним полем, мінус падіння напруги, що виникають у поздовжньому та поперечному синхронних індуктивних опорах обмотки якоря.

Зміна активної та реактивної потужностей синхронного генератора, котрий працює у паралелі з потужною мережею, досягається шляхом коригування крутного моменту на валу та струму його збудження. Для гарантування потрібного режиму роботи цього генератора, як правило, одночасно вносять зміни як у струм збудження, так і в крутний момент, що прикладається. У цьому експерименті буде вивчено процес входження синхронного генератора у синхронізм з мережею, а також проведено емпіричне визначення його U-подібних характеристик.

РОЗДІЛ 2. АНАЛІЗ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОГО ЕЛЕКТРИЧНОГО ДВИГУНА

Синхронні агрегати, як і інші електричні апарати, є реверсивними, тобто здатні функціонувати як у якості двигунів, так і в режимі генерації. Проте, вітчизняне електромашинобудування випускає синхронні машини, котрі розраховані виключно на генераторну чи лише на двигунну роботу, оскільки специфіка роботи агрегату в тому чи іншому режимі диктує окремі вимоги до його конструктивного виконання. [6]

Синхронні двигуни зазвичай експлуатуються на пускових етапах і мусять розвивати потужніший пусковий момент, аніж це потрібно генераторам. Це тягне за собою певні конструктивні обмеження для ротора: демпферна (пускова) обмотка синхронних двигунів проектується з урахуванням роботи на вищі струми й у більш тривалих умовах.

Для збудження синхронних двигунів застосовують або електромашинну систему збудження, або тиристорну систему збудження. У варіантах з електромашинним збудженням якір збудника – апарату постійного струму – сполучається з валом синхронного двигуна або жорстко, або (для низькошвидкісних машин) через планетарну передачу, що дозволяє підвищити швидкість обертання збудника і знизити його габарити. За своєю суттю, системи збудження синхронних двигунів ідентичні системам збудження генераторів.

Формули, що описують синхронний двигун, відрізняються від рівнянь синхронного генератора лише зміною знака моменту опору.

Для зміни роботи з генерації на двигунний режим, необхідно інвертувати знак зовнішнього моменту, що прикладається до вала синхронної машини. Це спричинить зміну фазового кута та спрямування споживання активної потужності; агрегат почне забирати енергію з мережі.

На кутовій характеристиці (Рис 2.1) зона роботи двигуна розташована у секторі від'ємних значень кута Δ . Стабільний відрізок кутової

характеристики для двигуна охоплює діапазон від 0 до -90° . Номінальний момент, що відповідає $M_{\text{ном}}$, знаходиться в межах $20-30^\circ$. Двигун з явновираженим ротором досягає максимального моменту при -90° :

$$M_{\text{ем.мах}} = \frac{P_{\text{ем.мах}}}{\omega_e} = \frac{mU E_0}{\omega_e x_d} \quad (2.1)$$

Максимальний момент залежить від розміру повітряного зазору двигуна. Чим більше зазор, тим менше x_d і більше $M_{\text{ем.мах}}$. Однак при великому зазорі ростуть габарити машини. Межа статичної стійкості

$$k_n = \frac{M_{\text{ем.мах}}}{M_{\text{ем.ном}}} \quad (2.2)$$

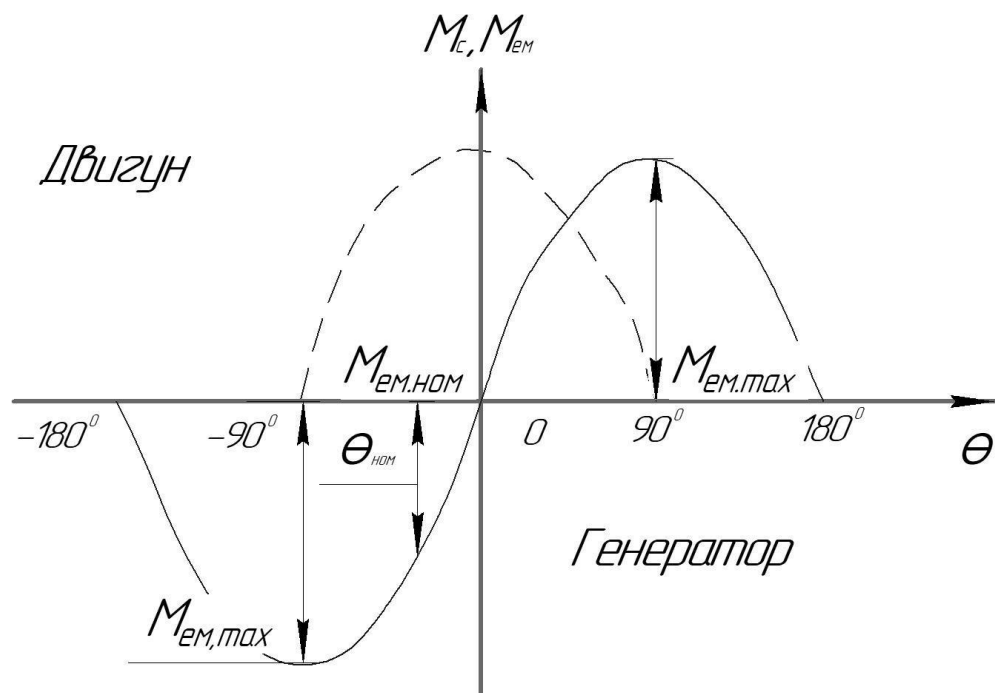


Рис 2.1 Кутова характеристика синхронної машини

Момент синхронізації, подібно до роботи в режимі генератора, досягає свого піку при нульовому куті і зникає при куті в дев'яносто градусів.

Щодо явно полюсного двигуна, крива залежності крутного моменту синхронізації M_c та електромеханічного $M_{\text{ем}}$ від кута $f(0)$ повторює ту, що спостерігається у генератора, проте вона розміщується у секторі від'ємних значень кутів.

Характеристики синхронних машин у формі літери "U" для двигунів ідентичні таким для генераторів. У випадку перезбудження синхронний

двигун виступає як ємність щодо електричної мережі, тоді як при недостатньому збудженні він поглинає реактивну потужність від мережі, функціонуючи як індуктивність. При недостатньому збудженні реакція якоря у синхронному двигуні сприяє намагніченню, а при надмірному — розмагнічуванню. Для аналізу процесів енергообміну в синхронних двигунах ключове значення мають їхні робочі характеристики (рис. 2.2).

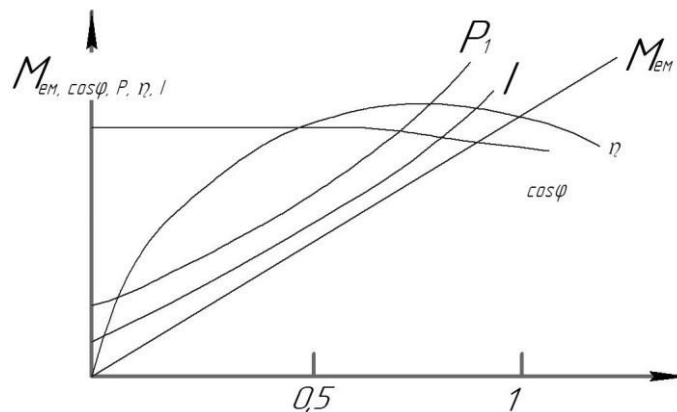


Рис 2.2. Робочі характеристики синхронного двигуна

Із зростанням вимог до моменту на валу двигуна, як якорний струм, так і крутний момент зростають, спершу відповідно до лінійного співвідношення, а потім, через вплив змінних параметрів, за нелінійною залежністю. При незмінному значенні I_f , коефіцієнт потужності може як зменшуватися, так і зростати, або ж досягати свого піку. Це явище детерміновано величиною I_f і наочно демонструється за допомогою U-подібних кривих: коли відбувається збільшення активного навантаження P_2 , тобто перехід з однієї U-подібної характеристики на іншу, \cos зазнає змін, оскільки внутрішнє падіння напруги зсуває лінію $\cos = 1$ у бік потужніших режимів роботи. Регулюючи струм збудження I_f , є можливість підтримувати сталі значення \cos незалежно від рівня навантаження P_2 (Рис. 2.3).

На рисунку 2.3, лінія під номером 1 ілюструє роботу синхронного двигуна з фіксованим струмом збудження в зоні недостатнього збудження на U-подібних огинаючих, тоді як лінія 2 зображує його роботу при надмірному збудженні; варіант 3 демонструє режим, що досягний шляхом керування струмом збудження.

Характеристика ефективності (ККД) стосовно навантаження є ідентичною для цього типу машин і загальних закономірностей для усіх електричних пристроїв.

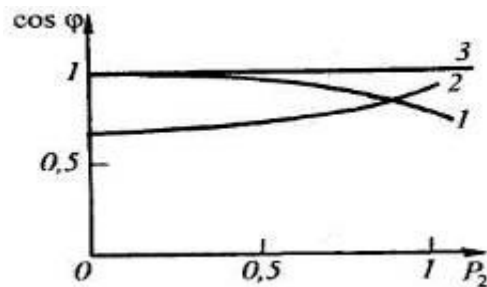


Рис 2.3. Залежності $\cos \varphi$ синхронного двигуна від навантаження

Різницею, що визначає синхронні двигуни, є незмінна частота обертання при зміні величини навантаження. Такі машини демонструють гранично жорсткі механічні характеристики. [6].

Однією з головних вад синхронних двигунів є їхні незадовільні пускові якості, які накладають обмеження на їхнє використання. Запустити синхронні двигуни можна кількома способами: частотним методом, із залученням допоміжного розгінного двигуна, або шляхом підключення до мережі на повну напругу (асинхронний пуск). Найчастіше використовується саме асинхронний спосіб. Це досягається завдяки наявності короткозамкнених контурів на роторі (демпферна обмотка, масивні полюсні наконечники), що дозволяє ротору набрати швидкість, близьку до синхронної. Обмотка збудження під час асинхронного пуску має активний опір. Іно, коли ротор досягає швидкості, що майже відповідає синхронній $s=0,05$, обмотка збудження підключається до збудника, і відбувається груба синхронізація агрегату.

Також застосовується запуск, коли збудник підключається одразу. У цьому випадку, при швидкості обертання, що становить $0,5-0,7 n_{\text{ном}}$, в обмотці збудження синхронного двигуна починає протікати постійний струм, і машина "втягується" у синхронізм. Запуск двигуна з одразу підключеним збудником супроводжується більш значними сплесками струму і може бути здійснений, якщо навантаження не перевищує $0,4-0,5 M_{\text{ном}}$. Проте, схема пуску з негайним підключенням збудника є простішою і знаходить дедалі

ширше застосування.

При складних умовах запуску потужних синхронних двигунів застосовують запуск через реактор або автотрансформатор, згідно зі схемами, аналогічними тим, що використовуються для асинхронних двигунів.

Якщо синхронний двигун запускають за допомогою допоміжного двигуна, сам синхронний двигун розганяється до швидкості, майже синхронної. Як розгінний агрегат може бути використаний асинхронний двигун з вищою, ніж у синхронного, номінальною частотою обертання, або двигун постійного струму, за наявності відповідної мережі. Застосування розгінного двигуна є рідкістю, оскільки цей допоміжний пристрій експлуатується лише під час пуску. [6]

При частотному запуску обмотка статора синхронного двигуна з'єднується з перетворювачем частоти, який плавно змінює частоту від кількох герців до робочої (номінальної). Частотний пуск дозволяє синхронному двигуну увійти в синхронізм вже на низьких частотах. Цей метод зручний, якщо один перетворювач частоти можна використовувати для запуску кількох двигунів.

Порівнюючи синхронні та асинхронні двигуни, варто відзначити ключову перевагу синхронних машин – здатність працювати з коефіцієнтом потужності $\cos = 1$, а при перевантаженні – і з випереджаючим \cos .

Максимальний момент синхронного двигуна прямо пропорційний напрузі U , тоді як у асинхронного – квадрату напруги U^2 . Через це синхронні машини менше реагують на коливання мережевої напруги і мають вищу стійкість до перевантажень. Регулювання потоку збудження зміною струму збудження дає можливість контролювати реактивну потужність у моменти падіння напруги та зниження мережевої частоти.

Недоліком синхронних двигунів є їхня конструктивна складність, потреба в джерелі постійного струму та гірші пускові характеристики порівняно з асинхронними аналогами.

Для двигунів потужністю від кількох кіловат до 100 кВт проявляється ще один мінус синхронних двигунів – їхня схильність до

коливань. При певній комбінації параметрів синхронного двигуна якір може хитатися навколо синхронної швидкості обертання.

Синхронні двигуни, за умови легких умов пуску, доцільно використовувати, коли їхня потужність перевищує 200 кВт. Сфери застосування синхронних машин постійно розширюються, а їхня потужність зростає до 50 МВт.

Синхронні двигуни потужністю до 1-2 кВт виготовляються з явнополюсним ротором, але без обмотки збудження. Завдяки різниці в магнітній проникності вздовж поздовжньої та поперечної осей машини, у таких агрегатах виникає реактивний момент, а асинхронний запуск забезпечується демпферною обмоткою. [6]

На рисунку 2.4 представлено дві найпоширеніші конфігурації роторів синхронних реактивних двигунів. Чотириполюсна будова ротора (рис 2.4, а) включає сталевий шихтований явнополюсний осердя 1 та демпферну обмотку 2. Двополюсний шихтований ротор, залитий алюмінієм, показано на рис 2.4, б. Сердечник ротора 3 заливається алюмінієм 4, який одночасно фіксує осердя та формує демпферну обмотку.

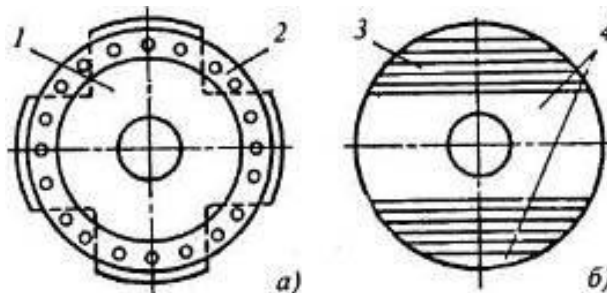


Рис 2.4. Конструкції роторів синхронних реактивних двигунів

Двигуни реактивного типу вирізняються невисоким коефіцієнтом потужності та невисоким ККД, а їхня вага перевищує вагу стандартних трифазних асинхронних машин.

Натомість електромагнітного збудження цілком реально використати постійні магніти. Лінійка моторів, оснащених постійними магнітами, пропонується в діапазоні потужностей від кількох десятків ват до кількох нульових одиниць кіловат. Енергетичні характеристики таких агрегатів кращі, аніж у їхніх реактивних аналогів.

Для досягнення необхідного пускового моменту у двигунах із постійними магнітами передбачено пускову обмотку, виконану у формі надливої алюмінієм "білячої клітки". Ротор, виготовлений із матеріалу, що володіє стійкістю до розмагнічування, отримують литтям зі специфічних сплавів.

Розглянемо основи функціонування синхронного генератора на прикладі дво полюсної моделі синхронної апаратури (рис. 2.5).

Коли на обмотку збудження подається постійний електричний струм, вона формує магнітне поле. Оскільки це поле створене постійним струмом, воно зберігає нерухомість відносно полюсів ротора. У повітряному проміжку на кожній ділянці полюса індукція розподіляється згідно із синусоїдальним законом (рис. 2.6).

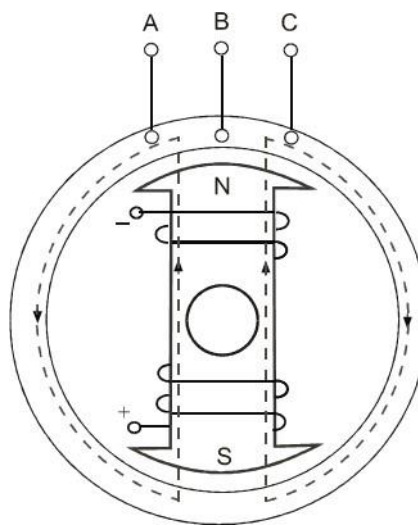


Рис 2.5 - Модель дво полюсної синхронної машини

Якщо ротор не приведений в обертання, в обмотці якоря ЕРС не індукуються.

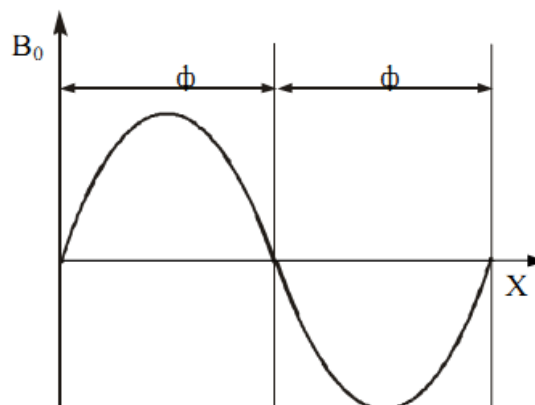


Рис 2.6. Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі

Коли ротор приводиться в обертання приводним двигуном (турбіною), силові лінії поля збудження перетинають провідники обмотки якоря і індують у них ЕРС.

Діюче значення ЕРС фази обмотки якоря визначається виразом:

$$E_{\phi} = 4,44w_{\phi}fK_{об}\Phi_0,$$

де w_{ϕ} - число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки якоря; $f = p_n/60$ частота ЕРС, Гц; p - число пар полюсів ротора; n - частота обертання ротора, об/хв; Φ_0 - магнітний потік зрушення на полюсному поділі, Вб; $K_{об}$ - обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря.

З огляду на подану залежність, електрорушійна сила (ЕРС) та, як наслідок, вихідна напруга, що виробляється генератором, визначається двома основними змінними:

Показник магнітного потоку Φ_0 на полюсному поділі, котрим оперує струм збудження.

Швидкість обертання ротора n .

Зазвичай, для генераторів, котрі використовуються у широкій промисловості, фіксована частота вихідної напруги становить $f = 50$ Гц. Отже, залежно від кількості пар полюсів апарату, швидкість обертання ротора повинна бути закріплена і відповідати наступному усталеному ряду:

p	1	2	3	4
$n, \text{ об/хв}$	3000	1500	1000	750

Отже, у синхронних машинах, що генерують, для встановлення потрібного рівня електрорушійної сили (ЕРС) обмотки якоря, а також відповідної вихідної напруги, єдиним способом є варіація струму, що подається на обмотку збудження.

Орієнтація обертання ротора мусить бути налаштована так, аби на виводах обмотки якоря формувалася фазова послідовність А, В, С у прямому чергуванні.

Висновки до розділу 2

Для досягнення необхідного пускового моменту у двигунах із постійними магнітами передбачено пускову обмотку, виконану у формі надливої алюмінієм "білячої клітки". Ротор, виготовлений із матеріалу, що володіє стійкістю до розмагнічування, отримують литтям зі специфічних сплавів.

У синхронних машинах, що генерують, для встановлення потрібного рівня електрорушійної сили (ЕРС) обмотки якоря, а також відповідної вихідної напруги, єдиним способом є варіація струму, що подається на обмотку збудження.

Орієнтація обертання ротора мусить бути налаштована так, аби на виводах обмотки якоря формувалася фазова послідовність А, В, С у прямому чергуванні.

РОЗДІЛ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ВИПРОБУВАНЬ СИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

3.1. Ремонт синхронних двигунів

Згідно з Правилами технічної експлуатації, у рамках системи планово-запобіжних ремонтів електрообладнання передбачено два типи робіт: поточний та капітальний ремонт.

Поточний ремонт виконується для всіх діючих електродвигунів, включаючи ті, що знаходяться в холодному чи гарячому резерві, з інтервалом, визначеним з огляду на місцеві умови (детальніше – розділ 4). Цей ремонт є основним профілактичним заходом, спрямованим на підтримання заданого рівня надійності та терміну служби електродвигунів. Він здійснюється без виведення двигуна з експлуатації чи його повного розбирання.

Капітальний ремонт. Терміни проведення капітальних ремонтів електродвигунів не встановлюються Правилами технічної експлуатації. Ці терміни визначає особа, відповідальна за електрогосподарство підприємства, базуючись на загальному наробку електродвигунів та специфіці умов їхньої експлуатації. Як правило, капітальний ремонт проводять у спеціалізованому електроремонтному цеху (СЕЦ) або на спеціалізованому ремонтному підприємстві (СРП). Обсяг робіт включає все, що передбачено поточним ремонтом, а також додаткові операції.

Демонтаж електродвигуна здійснюється відповідно до конструктивних особливостей конкретних моделей. Нижче описана послідовність розбирання електродвигунів малої та середньої потужності, оснащених підшипниковими щитами з коченнями або ковзними підшипниками. [6]

Збирання електродвигунів після ремонту. Підшипники кочення запресовуються на вал ротора. Кулькові підшипники монтується цілком. У роликівих підшипниках на вал спочатку насаджується внутрішнє кільце з тілами кочення. Зовнішнє кільце встановлюється окремо у відповідний

підшипниковий щит. Зовнішнє кільце монтується у посадкове місце щита з рухомим з'єднанням (ковзаючим або таким, що допускає невеликий рух). До початку збирання посадочні поверхні очищаються та змащуються. Внутрішні кришки підшипників монтуються на вал до встановлення самих підшипників. Невеликі за розміром підшипники садять на вал у холодному стані. Для запресовки використовують монтажну трубу, яка передає ударне навантаження лише на внутрішнє кільце підшипника. Для кращої орієнтації ударну трубу оснащують мідним кільцем та сферичним наконечником. Внутрішнє кільце підшипника має щільно прилягати до наплічника вала. Зовнішнє кільце повинно легко обертатися вручну. Нерозбірні вкладиші підшипників ковзання запресовуються у гнізда підшипникових щитів і фіксуються стопорним гвинтом.

Слід зазначити, що для підшипників типу 180000 (закритих), що використовуються в електродвигунах серії 4А, залишки мастила видаляють за допомогою ганчірки, змоченої в ацетоні. Встановлюють внутрішню кришку підшипника на вал, змащують посадкове місце вала машинним або дизельним мастилом і методом пресування (молотком) запресовують підшипник на вал ротора. Перед монтажем підшипник слід попередньо нагріти, заповнити його порожнину мастилом, а залишок закласти до камер підшипників. Порожнини підшипників електродвигунів серії 4А з висотами осі обертання 112-280 мм заповнюють мастилом ЛДС-2, серії 4А з висотами 56-100 мм – мастилом ЦИАТИМ-221, а для інших електродвигунів – мастилом 1-13. [6]

Для усунення дефекту на зібраному електродвигуні зі знятою кришкою щіткового вузла необхідно виконати наступні дії, після чого увімкнути двигун у мережу. Зі сторони, протилежної щітковому пристрою, послідовно прикладати до кожного контактної кільця ізолювану планку зі закріпленою на ній абразивною шкуркою та шліфувати поверхню кілець до повного зникнення слідів плям та дрібних подряпин, досягнувши чистоти не нижче 8-го класу. Шліфування контактних кілець можна виконувати на токарному верстаті за допомогою шліфувального пристосування супорта або дерев'яної

колодки з розміщеною під нею шліфувальною шкуркою. Радіальне биття проточених та прошліфованих кілець не повинно перевищувати 0,06 мм, а осьове – 0,1 мм. Зніміть пошкоджений ізоляційний шар з контактної шпильки ножом. Ізолюйте шпильку кабельною або телефонною папером до досягнення таких розмірів ізольованої шпильки: для електродвигуна 6-го габариту – 12 мм по ширині та 4 мм по товщині, а для 7-го та 8-го габаритів – 16 мм по ширині та 6 мм по товщині. При намотуванні паперу на шпильку, перший і останній шари кабельного чи телефонного паперу змащують клеєм БФ-2. Поверхню ізоляції шпильки покрийте ізоляційним лаком БТ-99 і сушать на повітрі протягом 3 годин.

3.2. Аналіз математичної моделі об'єкта вимірювання

Враховуючи, що асинхронні двигуни (АД) є найпоширенішим типом електричних машин, ми надалі зосередимо наше дослідження на моделюванні саме АД.

Існує низка методів для створення моделей електричних машин, серед яких виділяють:

- моделювання на основі теорії поля;
- моделювання на основі теорії електричних кіл;
- інтегрований (комбінований) підхід.

Найбільш довершеним вважається саме інтегрований підхід, котрий об'єднує рівняння поля та рівняння кіл. Тут, спираючись на розподіл поля у повітряному зазорі електродвигуна, виводяться рівняння напруг, а через показники струмів чи потокозчеплень – рівняння електромагнітного моменту. У цьому контексті розглядається ідеалізована машина, що є симетричним електромагнітним перетворювачем, який характеризується рівномірним зазором, сталевими елементами з нульовим магнітним опором та синусоїдальним обмотками. Застосування такого підходу дає найбільш поширений вигляд рівнянь для асинхронної машини, записаних у системі координат $\alpha, \beta, 0$:

$$\begin{cases} \frac{d\psi_{s\alpha}}{dt} = U_{s\alpha} - i_{s\alpha}R_{s\alpha}; \\ \frac{d\psi_{s\beta}}{dt} = U_{s\beta} - i_{s\beta}R_{s\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\alpha}}{dt} = U_{r\alpha} - i_{r\alpha}R_{r\alpha} - \omega_r\psi_{r\beta}; \\ \frac{d\psi_{r\beta}}{dt} = U_{r\beta} - i_{r\beta}R_{r\beta} - \omega_r\psi_{r\alpha}, \end{cases} \quad (3.6)$$

де $\psi_{s\alpha}, \psi_{s\beta}, \psi_{r\alpha}, \psi_{r\beta}$ – потокозчеплення статора і ротора в координатах, $\alpha, \beta, 0$;

$U_{s\alpha}, U_{s\beta}, U_{r\alpha}, U_{r\beta}$ – проєкції напруг статора і ротора на вісі координат, $\alpha, \beta, 0$;

$i_{s\alpha}, i_{s\beta}, i_{r\alpha}, i_{r\beta}$ – струми в обмотках статора і ротора;

$R_{s\alpha}, R_{s\beta}, R_{r\alpha}, R_{r\beta}$ – активні опори статора і ротора;

ω_r – кутова швидкість обертання ротора.

Потокозчеплення в (3.6) мають вигляд:

$$\begin{cases} \psi_{s\alpha} = L_{s\alpha}i_{s\alpha} + L_m i_{r\alpha}; \\ \psi_{s\beta} = L_{s\beta}i_{s\beta} + L_m i_{r\beta}; \\ \psi_{r\alpha} = L_{r\alpha}i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}; \\ \psi_{r\beta} = L_{r\beta}i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}, \end{cases} \quad (3.7)$$

де $L_{s\alpha}, L_{s\beta}, L_{r\alpha}, L_{r\beta}$ – індуктивності в обмотках статора і ротора;
 L_m – взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора.

Приймаючи узвичаєні допущення: $L_s=L_{s\alpha}=L_{s\beta}$; $L_r=L_{r\alpha}=L_{r\beta}$; $R_s=R_{s\alpha}=R_{s\beta}$;
 $R_r=R_{r\alpha}=R_{r\beta}$ і підставивши (3.7) в (3.6), отримаємо:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s\alpha} = R_{s\alpha} i_{s\alpha} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}); \\ U_{s\beta} = R_{s\beta} i_{s\beta} + \frac{d}{dt}(L_s i_{s\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}); \\ U_{r\alpha} = R_{r\alpha} i_{r\alpha} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\alpha}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\alpha}) + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_{r\beta} i_{r\beta} + \frac{d}{dt}(L_r i_{r\beta}) + \frac{d}{dt}(L_m i_{r\beta}) - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{array} \right. \quad (3.8)$$

Розглядаючи асинхронну машину як систему із зосередженими параметрами, запишемо:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_{s\alpha} = R_s i_{s\alpha} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\alpha} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\alpha}; \\ U_{s\beta} = R_s i_{s\beta} + L_s \frac{d}{dt} i_{s\beta} + L_m \frac{d}{dt} i_{r\beta}; \\ U_{r\alpha} = R_r i_{r\alpha} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\alpha} + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta}); \\ U_{r\beta} = R_r i_{r\beta} + L_r \frac{d}{dt} i_{r\beta} - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha}). \end{array} \right. \quad (3.9)$$

Провівши відповідні математичні перетворення, запишемо систему рівнянь (3.9) у матричній формі:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{s\alpha} \\ i_{s\beta} \\ i_{r\alpha} \\ i_{r\beta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_r (U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) - L_m (U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ L_r (U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) - L_m (U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \\ -L_m (U_{s\alpha} - R_s i_{s\alpha}) + L_s (U_{r\alpha} - R_r i_{r\alpha} + \omega_r (L_r i_{r\beta} + L_m i_{s\beta})) \\ -L_m (U_{s\beta} - R_s i_{s\beta}) + L_s (U_{r\beta} - R_r i_{r\beta} - \omega_r (L_r i_{r\alpha} + L_m i_{s\alpha})) \end{bmatrix}, \quad (3.10)$$

$$\text{де } k = \frac{1}{L_s L_r - L_m^2}.$$

Рівняння руху ротора електродвигуна має вигляд:

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{p}{J} (M_e - M_0), \quad (3.11)$$

де M_e – електромагнітний момент електричних машин, який визначається рівнянням:

$$M_e = \frac{mp}{2} L_m (i_{s\beta} i_{r\alpha} - i_{s\alpha} i_{r\beta}); \quad (3.12)$$

M_0 – момент опору на валу; J – момент інерції ротора; m – кількість фаз; p – кількість пар полюсів.

Формула (3.12) окреслює залежність між швидкістю обертання ротора та динамічним моментом у неявній формі, що, по суті, є записом механічної характеристики. Комплексне розв'язання рівнянь (3.10) – (3.12) методом Рунге-Кутта четвертого порядку дало можливість обчислити теоретичні механічні характеристики асинхронних двигунів. Графічне відображення цих розрахованих теоретичних механічних характеристик для електричних машин представлено на рисунку 3.2.

Ключові точки на кривій $M=f(\omega r)$ включають пусковий момент M_p (коли $\omega r = 0$), найменший момент M_{\min} при мінімальній швидкості ωr_{\min} , найбільший момент M_{\max} при максимальній швидкості ωr_{\max} , критичний момент $M_{\text{кр}}$, що відповідає критичній швидкості $\omega r_{\text{кр}}$, та номінальний момент $M_{\text{ном}}$ за номінальної швидкості $\omega r_{\text{ном}}$. Моменти M_p , M_{\min} та M_{\max} корелюють із високими значеннями струму (пусковий струм може бути у 5-7 разів більшим за номінальний) і вони відображають динамічні показники двигуна. Це підкреслює високу інформаційну цінність механічних характеристик, одержаних у динамічних умовах експлуатації електричних машин. Проте, для досягнення точності у визначенні механічних характеристик, потрібно також встановити залежності $J(\omega r)$ та $M_0(\omega r)$.

3.3. Розробка та дослідження способу вимірювання механічних характеристик

Оцінювальні методики дають змогу з пристойною точністю встановити значення величин J та M_0 , спираючись на математичну модель досліджуваного об'єкта. Проте тут електрична машина трактується як така, що має зосереджені параметри, і це унеможливорює визначення M_0 як залежності від кутового швидкообертання. З іншого боку, існують різноманітні підходи для знаходження J та M_0 . Проте всі ці способи

характеризуються суттєвою похибкою у визначенні J та M_0 , є громіздкими у впровадженні та не допускають засобів для автоматизації етапу вимірювальних робіт.

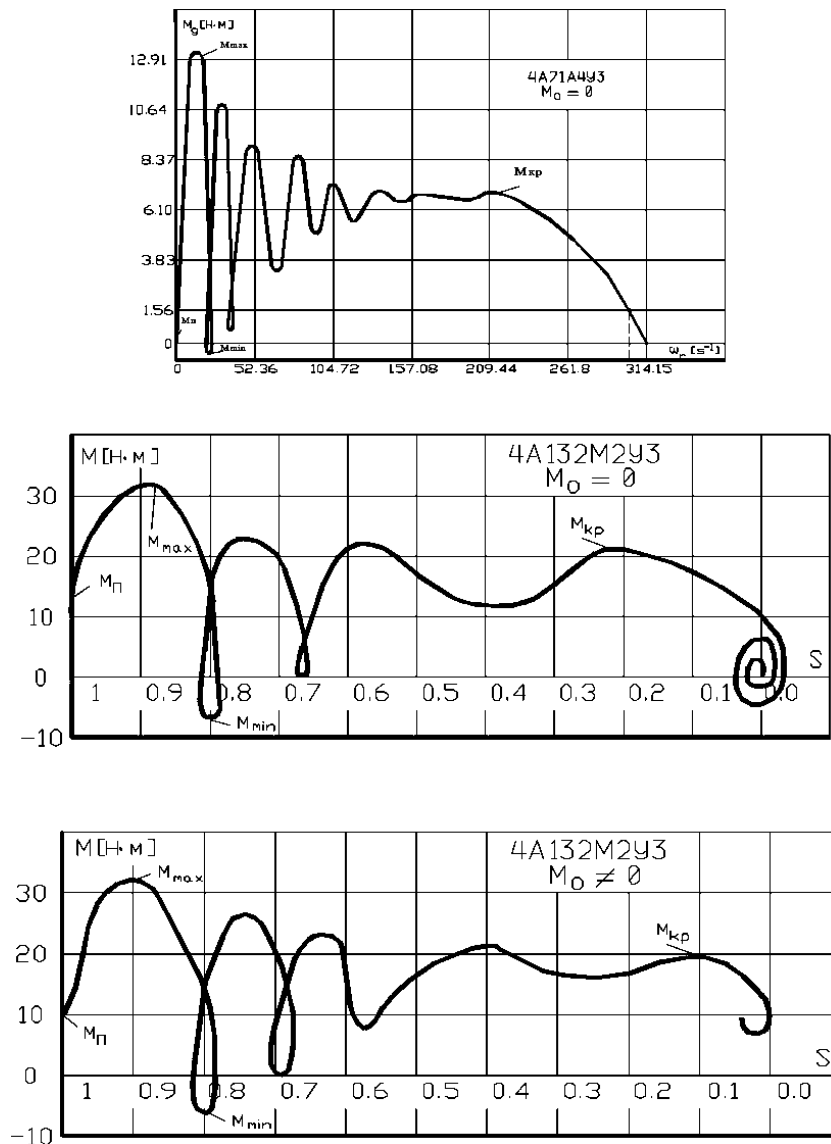


Рис. 3.2 Розраховані механічні характеристики АД

Ключовою ідеєю цього методу є потреба у двох еталонних зразках, що мають форму тіл обертання, скажімо, дисків чи циліндрів. Моменти інерції цих зразків розраховуються на основі їхніх габаритних та масових характеристик.

На кінцевій осі ротора електромашини закріплюється перший еталонний зразок, після чого машина підключається до мережі. У фазі пускового (перехідного) режиму фіксується кутова швидкість обертання ротора ω_r ; після завершення цієї фази живлення машини припиняється, і під

час процесу природного уповільнення (самогальмування) також реєструється ω_r .

Після повної зупинки електромашини перший зразок демонтується, а на його місце встановлюється другий еталонний зразок. З електромашиною, що тепер з'єднана із другим зразком, повторюються ті самі маніпуляції з пуском та самогальмуванням, як і з першим зразком, з реєстрацією ідентичних параметрів.

Рівняння, що описують рух електромашини відповідно при роботі з першим та другим зразками, виглядатимуть так:

$$\begin{cases} M_{ем}(\omega_r) = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{31}(\omega_r))\varepsilon_{n1}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{31}(\omega_r))\varepsilon_{e1}(\omega_r); \\ M_{ем}(\omega_r) = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{32}(\omega_r))\varepsilon_{n2}(\omega_r); \\ 0 = M_0(\omega_r) + M_{ЗВ}(\omega_r) + (J(\omega_r) + J_{ЗВ}(\omega_r) + J_{32}(\omega_r))\varepsilon_{e2}(\omega_r), \end{cases} \quad (3.13)$$

де $M_{ем}$ – динамічний електромагнітний момент; M_0 – момент механічних втрат електричної машини; $M_{ЗВ}$ – момент механічних втрат ЗВ; J – момент інерції ротору електричної машини; $J_{ЗВ}$ – момент інерції вхідного валу ЗВ; J_{31} – момент інерції першого зразку; J_{32} – момент інерції другого зразку; прискорення розгону електричної машини з першим зразком; ε_{n1} – кутове прискорення розгону електричної машини з першим зразком; ε_{e1} – кутове прискорення самогальмування електричної машини з першим зразком; ε_{n2} – кутове прискорення розгону електричної машини з другим зразком; ε_{e2} – кутове прискорення самогальмування електричної машини з другим зразком.

При цьому відмітимо, що всі вищеперераховані величини представлені в функції кутової швидкості ω_r .

Здійснення двох експериментів є методичною основою запропонованого методу і дозволяє з використанням (3.13) скласти і вирішити систему з трьох рівнянь з трьома невідомими $M_{ем}$, M_0 , J .

Запишемо систему (3.13), перенісши невідомі в ліві частини рівнянь і опустивши для зручності запис кутової швидкості:

$$\begin{cases} M_{em} - M_0 - J\varepsilon_{n1} = (J_{3B} + J_{31})\varepsilon_{n1} + M_{3B}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{e1} = (J_{3B} + J_{31})\varepsilon_{e1} + M_{3B}; \\ M_{em} - M_0 - J\varepsilon_{n2} = (J_{3B} + J_{32})\varepsilon_{n2} + M_{3B}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{e2} = (J_{3B} + J_{32})\varepsilon_{e2} + M_{3B}. \end{cases} \quad (3.14)$$

Оскільки $J_{3B} \ll J$ та $M_{3B} \ll M_0$, то значеннями J_{3B} , M_{3B} можна знехтувати.

Тоді система (3.14) запишеться:

$$\begin{cases} M_{em} - M_0 - J\varepsilon_{n1} = J_{31}\varepsilon_{n1}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{e1} = J_{31}\varepsilon_{e1}; \\ M_{em} - M_0 - J\varepsilon_{n2} = J_{32}\varepsilon_{n2}; \\ -M_0 - J\varepsilon_{e2} = J_{32}\varepsilon_{e2}. \end{cases} \quad (3.15)$$

Прийmemo $J_{31}=0$, $J_{32}=J_3$. Тоді, вирішивши спільно друге і четверте рівняння системи (3.15), отримаємо:

$$M_0 = \frac{\varepsilon_{e1}\varepsilon_{e2}J_3}{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}}; \quad (3.16)$$

$$J = \frac{J_3\varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}}. \quad (3.17)$$

Щодо загального підходу, для визначення невідомих величин, маємо право обрати будь-яку трійку рівнянь із системи (3.15). Цей вибір, власне, диктується умовами, за яких здійснюється збір вимірювальних даних. Конкретно ж, у цій ситуації, рішення зупинитися на другому та четвертому рівняннях системи (3.8) для розрахунку M_0 та J було прийняте з огляду на той факт, що під час процесу самогальмування електричного двигуна ефекти, спричинені нестійкістю мережевої напруги та частоти, нівелюються стосовно точності визначення M_0 та J .

Електромагнітний момент M_{em} визначиться із першого рівняння системи (3.15):

$$M_{em} = J_3\varepsilon_{n1} + \frac{\varepsilon_{e1}\varepsilon_{e2}J_3}{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}} - \frac{J_3\varepsilon_{e2}}{\varepsilon_{e2} - \varepsilon_{e1}}\varepsilon_{n1}. \quad (3.18)$$

Відмітимо, що M_{em} - це динамічний електромагнітний момент, без врахування моменту опору M_0 . - Повний динамічний момент M_D визначиться як $M_{em} + M_0$.

Висновки до розділу 3

Згідно з Правилами технічної експлуатації, у рамках системи планово-запобіжних ремонтів електрообладнання передбачено два типи робіт: поточний та капітальний ремонт.

Наші дослідження зосереджені на моделюванні асинхронних двигунів АД, оскільки вони є найпоширенішим типом електричних машин.

Для створення моделей електричних машин вибраний інтегрований (комбінований) підхід, оскільки саме інтегрований підхід об'єднує рівняння поля та рівняння кіл. Тут, спираючись на розподіл поля у повітряному зазорі електродвигуна, виводяться рівняння напруг, а через показники струмів чи потокозчеплень – рівняння електромагнітного моменту.

Для розрахунку M_0 та J було прийняте з огляду на той факт, що під час процесу самогальмування електричного двигуна ефекти, спричинені нестійкістю мережевої напруги та частоти, нівелюються стосовно точності визначення M_0 та J .

РОЗДІЛ 4. УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДІВ ТЕХНІЧНОГО ОБСЛУГОВУВАННЯ Й РЕМОНТ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

4.1. Обсяг робіт по технічному обслуговуванню й ремонту

Ключовою засадою для забезпечення належної експлуатації електричних агрегатів є своєчасне проведення запланованих заходів із технічного обслуговування та періодичних випробувань.

Окрім щоденного догляду та огляду електричних машин відповідно до системи планово-запобіжних ремонтів, через певні інтервали часу організовуються планові профілактичні огляди, перевірки (випробування) та різні види відновлювальних робіт. Застосування системи планово-запобіжних ремонтів дає змогу утримувати електромашини в стані, що гарантує дотримання їхніх стандартних технічних характеристик, частково попереджує виникнення аварійних зупинок, а також покращує параметри машин при планових відновленнях завдяки модернізації. Наразі, застосовують два типи ремонту — поточний та капітальний, хоча для окремих категорій електрообладнання може бути передбачений і середній ремонт. [7]

Проміжок часу між двома запланованими капітальними ремонтами зветься ремонтним циклом. Для електричних машин, які вперше вводяться в експлуатацію, ремонтний цикл — це напрацювання від моменту введення в роботу до першого планового капітального ремонту.

Існує три схеми організації ремонтних процесів: централізована, децентралізована та змішана. За централізованої моделі ремонт, випробування та налагодження електромашин виконуються спеціалізованими ремонтними та налагоджувальними установами. Ця форма вважається найбільш прогресивною, оскільки вона забезпечує мінімальну вартість ремонту при вищій якості робіт.

При децентралізованому підході ремонт, випробування та налагодження здійснюються ремонтними підрозділами, що входять до складу

виробничих відділів підприємств, тоді як за змішаної схеми частина робіт проводиться централізовано, а частина — децентралізовано; ступінь централізації залежить від типу підприємства, а також від характеристик та потужності електроустаткування.

Із розширенням мережі спеціалізованих ремонтних підприємств та зростанням їхньої потужності спостерігається покращення якості відновлювальних робіт, зниження їхньої собівартості та скорочення термінів виконання, що робить централізований ремонт дедалі вигіднішим як для окремих промислових об'єктів, так і для національної економіки в цілому. Вдосконалення централізованого ремонту передбачає створення централізованого фонду обміну електромашин та розширення їхньої номенклатури, а також поширення спектра послуг ремонтних установ на виконання поточних ремонтів та профілактичного обслуговування.

Тривалість ремонтного циклу визначається умовами експлуатації, вимогами до показників надійності, ремонтпридатністю, нормами технічної експлуатації та інструкціями від виробника. Зазвичай ремонтний цикл розраховується у календарному часі, виходячи з 8-годинного робочого дня при 41-годинному робочому тижні. Фактична інтенсивність роботи обладнання та його сезонність враховуються за допомогою відповідних коефіцієнтів.

При визначенні тривалості ремонтного циклу орієнтуються на графік розподілу виходів з ладу електричних машин залежно від часу їхньої роботи. На цьому графіку можна виділити три ділянки: ділянка I — післяремонтне напрацювання, де імовірність відмов зростає через можливе використання неякісних компонентів, матеріалів або порушення технології ремонту; ділянка II — стабільний етап роботи електромашин із майже незмінною частотою відмов; ділянка III — зношування окремих елементів машини, що проявляється у збільшенні кількості відмов. [7]

Тривалість ремонтного циклу не повинна перевищувати тривалості стабільного етапу роботи II. Плануючи структуру ремонтного циклу (види та послідовність планових відновлень), виходять з того, що в електричній

машині, окрім швидкозношуваних частин (щітки, підшипники, контактні кільця), які потребують лише незначного ремонту чи заміни, є вузли з більшим ресурсом (обмотки, механічні елементи, колектори), ремонт яких є досить складним і займає багато часу. Через це протягом напрацювання між капітальними ремонтами електричні машини повинні пройти кілька етапів поточного ремонту.

Поточні ремонти, як правило, не порушують виробничий ритм, тоді як капітальний ремонт без наявності резерву веде до зупинки виробництва (технологічного процесу). Отже, міжремонтний інтервал для електричних машин слід узгоджувати з міжремонтним періодом основного технологічного обладнання, якщо останній виявляється меншим. Для масово використовуваних електричних машин, які не належать до основного обладнання і мають достатній резерв, можливий перехід від системи планово-запобіжного ремонту до системи ремонту за фактом відмови. Доцільність такого переходу має бути обґрунтована техніко-економічним аналізом.

Тривалість T ремонтного циклу, а також тривалість міжремонтного інтервалу t визначають, виходячи з типових умов експлуатації при двозмінній роботі за даними, представленими у табл. 4.1. Для колекторних машин постійного та змінного струму наведені в табл. значення тривалості ремонтного циклу та міжремонтного інтервалу зменшують, застосовуючи коефіцієнт $K_{ТГ} = 0,75$.

Таблиця 4.1. Типові умови експлуатації при двозмінній роботі

Умови роботи електричних машин	Коефіцієнт попиту K_c	T табл, років	t табл, мес
Сухі приміщення	0,25	12	12
Гарячі гальванічні, хімічні цеха	0,45	4	6
Забруднені ділянки - сухого шліфування й ін.	0,25	6	8
Тривалі цикли безперервної роботи з високим ступенем завантаження - приводи насосів, вентиляторів, компресорів, кондиціонерів і ін.	0,75	9	9

Параметри T і t також детермінуються зважаючи на мінливість роботи електромашин, коефіцієнта їхньої експлуатації, а також з огляду на режим роботи (чи то пересувні, або стаціонарні установки, чи основне, чи допоміжне обладнання). [7]

Система профілактичного планового ремонту охоплює технічне обслуговування, поточні й капітальні ремонти, а також профілактичні й післяремонтні випробування. З огляду на значну різноманітність електромашин, що знаходяться в експлуатації, неможливо надати вичерпний перелік робіт для кожного з тридцятирічних циклів цієї системи (окрім випробувань), тому ми обмежимося типовими обсягами робіт. Перед виконанням ремонту проводять тестування електромашин з метою виявлення й подальшого усунення недоліків.

Стандартний перелік робіт із технічного обслуговування містить: щоденний моніторинг дотримання експлуатаційних правил та інструкцій виробника (перевірка навантаження, температури окремих вузлів машини, температури зовнішнього середовища при закритій системі охолодження, наявності мастила у підшипниках, відсутності незвичайних шумів та вібрацій, надмірного іскріння на колекторі та контактних кільцях та ін.); щоденний контроль функціональності заземлення; нагляд за дотриманням вимог техніки безпеки працівниками, які обслуговують електроустановки; вимкнення електромашин у разі аварійних ситуацій; дрібний ремонт, який виконується під час робочих пауз основного технологічного обладнання й не вимагає спеціального зупинення машини (підтяжка контактів та кріплень, заміна щіток, регулювання траверс, системи захисту, очищення доступних частин машини тощо); участь у приймальних випробуваннях після монтажу, ремонту та налагодження електромашин та систем їхнього захисту і керування; планові огляди експлуатованих машин згідно із затвердженим графіком головного енергетика із заповненням відповідної карти огляду.

До типового обсягу робіт у рамках поточного ремонту належить: виконання операцій технічного обслуговування; відключення від електромережі та від'єднання від привідного механізму (двигуна); очищення

зовнішніх поверхонь від забруднень; часткове розбирання електромашини в межах необхідності для ремонту; огляд стану підшипників, їх промивання, заміна кочення підшипників, якщо їхні зазори перевищують допустимі норми, перевірка та ремонт системи примусового змащування, заміна мастила; перевірка та ремонт кріплення вентилятора, перевірка та налагодження системи примусової вентиляції; огляд, очищення та продування стисненим повітрям обмоток, колектора, вентиляційних каналів; перевірка стану та надійності фіксації лобових частин обмоток, усунення виявлених несправностей; ліквідація локальних пошкоджень ізоляції обмоток, сушіння обмоток, нанесення покривного лаку на лобові частини обмоток; перевірка та підтягування кріпильних з'єднань і контактів із заміною пошкоджених кріплень; перевірка та регулювання щіткотримачів, траверс, короткозамкнених пристроїв, механізму підйому щіток; зачищення та шліфування колектора й контактних кілець, перевірка стану та коректності маркування вивідних кінців обмоток та клемних колодок із необхідним ремонтом; заміна фланцевих прокладок та ущільнювачів; підключення машини до мережі та її перевірка на холостому ходу та під навантаженням; усунення дефектів фарбування; проведення приймальних випробувань та оформлення акту здачі машини в експлуатацію. [7]

Типовий перелік робіт при капітальному ремонті включає: виконання операцій поточного ремонту; перевірку осьового зсуву ротора та радіальних зазорів корінних підшипників з подальшим переливанням вкладишів; заміну кочення підшипників; повне розкриття машини з очищенням та промиванням усіх механічних компонентів; заміну дефектних обмоток (включаючи відновлення короткозамкнених обмоток)*, очищення та продувка обмоток, що зберігаються; просочення та сушіння обмоток, покриття лобових частин обмоток захисними лаками та емалями; ремонт колекторів, контактних кілець та щіткових вузлів (до їх повної заміни на нові); відновлення статора та ротора, у тому числі часткову заміну пакетів пластин; відновлення пресування; ремонт підшипникових щитів, корпусу, відновлення розмірів посадкових місць; ремонт вала; ремонт або заміна вентилятора; заміна

несправних пазових клинів, різноманітних ізоляційних елементів; складання та фарбування машини; проведення випробувань та оформлення здачі машини в експлуатацію.

Обмотки з прямокутним профілем ремонтують із використанням наявного дроту. Кругле проведення, як правило, не використовується повторно.

Перш ніж монтувати двигун на робочу установку, необхідно виконати наступні попередні роботи:

Очистити корпус двигуна від пилу. Видалити консерваційне мастило з вільного кінця вала за допомогою ганчірки, змоченої у гасі або бензині. Перевірити надійність кріплень двигуна. Пересвідчитися у вільному обертанні ротора у будь-який бік. Перевірити наявність мастила у вузлах підшипників. Виміряти мегомметром напругою 500В опір ізоляції між фазами та корпусом. Якщо опір ізоляції менший за 0,5 МОм, обмотку двигуна потрібно підсушити.

Сушіння обмотки можна здійснити фотополяриметричним методом (з розбиранням двигуна або без нього), у сушильній шафі або за допомогою ламп розжарювання. Під час сушіння температура обмоток не повинна перевищувати 100 градусів Цельсія. У процесі сушіння фотополяриметром слідкуйте за температурою обмотки.

Температуру обмотки двигуна в будь-якій його частині можливо зареєструвати термопарою або термометром, кульку якого обгортають алюмінієвою фольгою, а зовнішню поверхню укутують теплоізоляційним матеріалом (повстю, ватою тощо). Температура у пазовій зоні обмотки буде вищою на 10 – 15 градусів, ніж у лобовій.

Температурний режим обмоток також можна визначити за зміною їхнього опору (в Ом) у процесі нагрівання. Опір обмотки вимірюють вольтметром-амперметром або мостом постійного струму. Розрахунок температури обмотки здійснюється за формулою:

$$t_{об} = (235 + t_1) * (R_2/R_1) - 235, \quad (4.1)$$

де $t_{об}$ – температура обмотки в момент сушіння, у градусах; R_1 – опір обмотки в холодному стані, Ом; R_2 – опір обмотки під час сушіння, Ом; t_1 –

температура обмотки до початку сушіння, у градусах.

Обмотки сушать доти, доки опір ізоляції не досягне позначки 0,5 МОм. Якщо опір ізоляції не зростає до вказаного значення (обмотка сильно насичена вологою), процес сушіння продовжують. [7]

Слід виконати монтаж двигуна на робочу машину відповідно до правил встановлення та підключити його до мережі живлення. Якщо маркування вивідних кінців відсутнє, початки та кінці фаз можна визначити експериментальним шляхом. Для цього можна скористатися двома простими методами.

У першому варіанті, після визначення початків та кінців фаз за допомогою контрольної лампи або мегомметра, з'єднують між собою два провідники, що належать до різних фаз. На ці дві послідовно з'єднані фази подають змінну напругу. До керуючої фази підключають вольтметр або контрольну лампу. Якщо фази з'єднані однойменними виводами (наприклад, обома "початками" або обома "кінцями"), напруга на третій фазі буде нульовою. Фазу, яка була раніше підключена до вольтметра або лампи, міняють місцями з однією з двох послідовно з'єднаних фаз і проводять ідентичне маркування третьої фази.

У другому випадку знайдені кінці фаз збирають разом (по три) і до отриманих точок підключають міліамперметр постійного струму або прилад Ц-435, використовуючи його як амперметр постійного струму. Якщо при ручному обертанні ротора двигуна стрілка приладу відхиляється, необхідно змінити місцями виводи однієї з фаз. Якщо після переключення однієї фази стрілка продовжує відхилятися, слід повернути перемкнену фазу до початкового стану та змінити місцями виводи іншої фази. В одному з трьох можливих конфігурацій стрілка приладу перестане відхилятися, що сигналізуватиме про те, що всі фази з'єднані виводами з однаковою полярністю. Обертання ротора при маніпуляціях з фазними виводами необхідно здійснювати в одному напрямленні.

Після завершення ремонту електромашини проходять випробування на ремонтному підприємстві, обсяг яких залежить від типу машини та

виконаного виду ремонту. Рішення про придатність до експлуатації ухвалюється не лише на основі зіставлення результатів випробувань з нормативними показниками, а й на підставі сукупності отриманих результатів випробувань та оглядів. Отримані в ході випробувань параметри слід порівняти з вихідними даними, а також з результатами попередніх випробувань електромашини. [7]

4.2. Техніка безпеки при ремонті електричних машин

Під час виконання планових запобіжних, технічного обслуговування, поточних та капітальних ремонтів електричних машин, фахівець зобов'язаний дотримуватися правил техніки безпеки під час експлуатації.

І, у свою чергу, мусить знати наступне:

Виводи обмоток та кабельні вводи електромоторів мають бути закриті захисними кожухами, для зняття яких необхідно викрутити гайки або гвинти. Знімати ці захисні елементи, коли електромотор працює, суворо заборонено. Рухомі частини електромоторів, а саме: контактні кільця, шків, муфти, вентилятори – мають бути надійно огорожені.

Дозволяється відкривати корпуси пускових пристроїв електродвигунів, встановлених у цеху, під час їхньої роботи під напругою, але лише для зовнішнього огляду і виключно персоналу, який має кваліфікаційну групу не нижче четвертої.

Операції з увімкнення та вимкнення електродвигунів за допомогою пускової апаратури з ручними приводами слід виконувати, використовуючи діелектричні рукавички або відповідну ізолюючу підставку.

Включення та відключення вимикачів електромоторів виконується черговим персоналом агрегату одноосібно.

5. У робочому синхронному електродвигуні частини обмотки, що не задіяні, та кабель живлення повинні вважатися такими, що перебувають під напругою.

6. Роботи в колі пускового реостата увімкненого електромотора

допустимі лише за умови піднятих щіток та замкненого накоротко ротора.

Роботи в ланцюгах регульовального реостата працюючого електродвигуна слід розглядати як роботу під напругою в колах до 1000В та виконувати з дотриманням усіх необхідних запобіжних заходів. [8]

Шліфування кілець ротора дозволено проводити на обертовому електродвигуні лише застосовуючи колодки з ізоляційного матеріалу.

7. Перед початком будь-яких робіт на електромоторах, які приводять у рух насосне чи інше обладнання, слід вжити заходів, що унеможливають обертання електромотора за рахунок механізму, до якого він приєднаний (наприклад, насос може почати функціонувати як турбіна, димосос може почати обертатися у зворотному напрямку через засмоктування холодного повітря по трубі, тощо). До таких заходів належать: перекриття відповідних запірних клапанів або засувок з їхнім фіксацією або обв'язуванням ланцюгом із замком (або зняттям маховика), а також вивішування попереджувальних плакатів "Не відчиняти – працюють люди" або роз'єднання муфт.

8. При від'єднанні живильного кабелю від синхронного електродвигуна, кінці всіх трьох фаз кабелю повинні бути замкнені накоротко та заземлені. [8]

Заземлення кабельних кінців має здійснюватися з використанням спеціально призначеного для цього переносного заземлювального пристрою, виготовленого відповідно до загальних вимог.

Висновки до розділу 4

Ключовою засадою для забезпечення належної експлуатації електричних агрегатів є своєчасне проведення запланованих заходів із технічного обслуговування та періодичних випробувань.

Існує три схеми організації ремонтних процесів: централізована, децентралізована та змішана. За централізованої моделі ремонт, випробування та налагодження електромашин виконуються спеціалізованими ремонтними та налагоджувальними установами. Ця форма вважається найбільш прогресивною, оскільки вона забезпечує мінімальну вартість ремонту при вищій якості робіт.

Після завершення ремонту електромашини проходять випробування на ремонтному підприємстві, обсяг яких залежить від типу машини та виконаного виду ремонту. Рішення про придатність до експлуатації ухвалюється не лише на основі зіставлення результатів випробувань з нормативними показниками, а й на підставі сукупності отриманих результатів випробувань та оглядів. Отримані в ході випробувань параметри слід порівняти з вихідними даними, а також з результатами попередніх випробувань електромашини.

Під час виконання планових запобіжних, технічного обслуговування, поточних та капітальних ремонтів електричних машин, фахівець зобов'язаний дотримуватися правил техніки безпеки під час експлуатації.

РОЗДІЛ 5. ЕКСПЕРИМЕНТАЛЬНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНХРОННОЇ МАШИНИ МАЛОЇ ПОТУЖНОСТІ

5.1. Результат дослідження синхронної машини малої потужності в режимі двигуна

Під час функціонування синхронної машини як двигуна, було здійснено низку експериментальних досліджень:

- Побудова V-подібних кривих синхронного двигуна
- Визначення робочих характеристик синхронного двигуна

Складання V-подібних залежностей проводили у трьох режимах: холостий хід, при завантаженні 20% від номінальної потужності ($0.2P_2$) та при завантаженні 60% від номінальної потужності ($0.6P_2$). Ці виміри демонструють зв'язок між величиною струму в обмотці якоря та струмом у системі збудження. Результати, отримані в процесі цих випробувань, задокументовано у таблиці 5.1.

Таблиця 5.1 V-подібні характеристики синхронного двигуна

P ₂ =0		P ₂ =0.2		P ₂ =0.6	
I _a	I _з	I _a	I _з	I _a	I _з
2,86	0,46	2,41	0,84	3,14	1,04
1,16	1,23	1,56	1,19	2,72	1,38
0,5	1,54	0,69	1,61	2,18	1,65
0,83	2,0	0,92	1,92	1,47	1,92
1,9	2,54	1,68	2,39	2,12	2,58

За результатами отриманих даних були побудовані графіки V – подібних характеристик (рис.5.1).

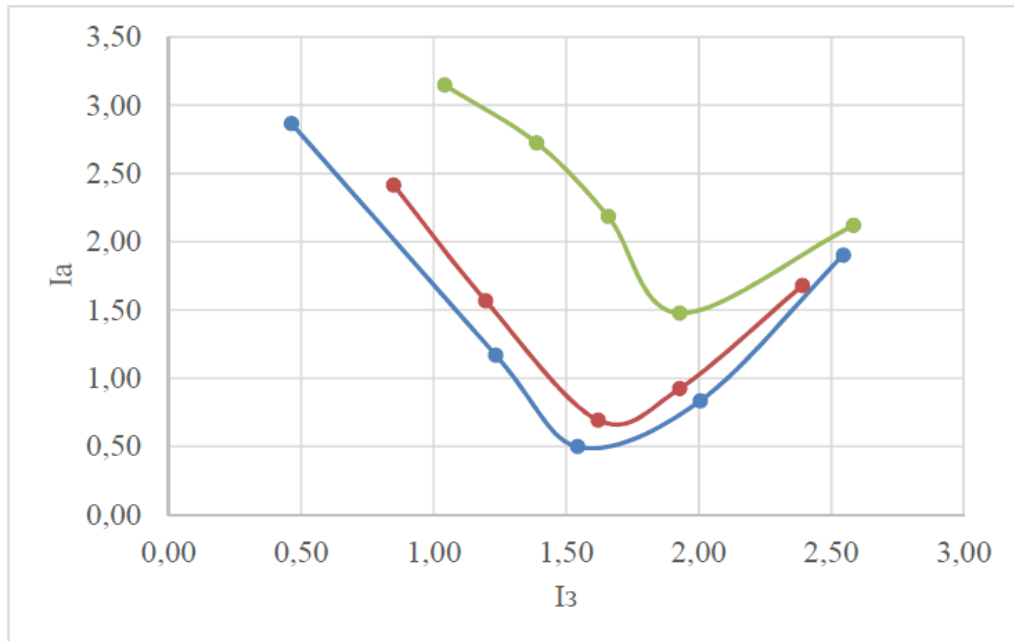


Рис.5.1 V-подібні характеристики синхронного двигуна

Аби здійснити випробування роботи синхронного двигуна, його було запущено, використовуючи допоміжний приводний двигун, після чого синхронний двигун вийшов на свій штатний режим експлуатації. Зведені результати цих вимірювань зафіксовані в табл. 5.2

Таблиця 5.2. Дані робочих характеристик синхронного двигуна

P2	P1	η	I	n	$\cos\varphi$
0	210	0	0,48	3000	1
100	300	0,2	0,65	3000	0,95
250	360	0,5	0,88	3000	0,88
400	520	0,9	1,30	3000	0,83
500	650	0,8	1,78	3000	0,8
750	980	0,77	3,08	3000	0,76

За результатами отриманих даних були побудовані графіки V – подібних характеристик (рис.5.2).

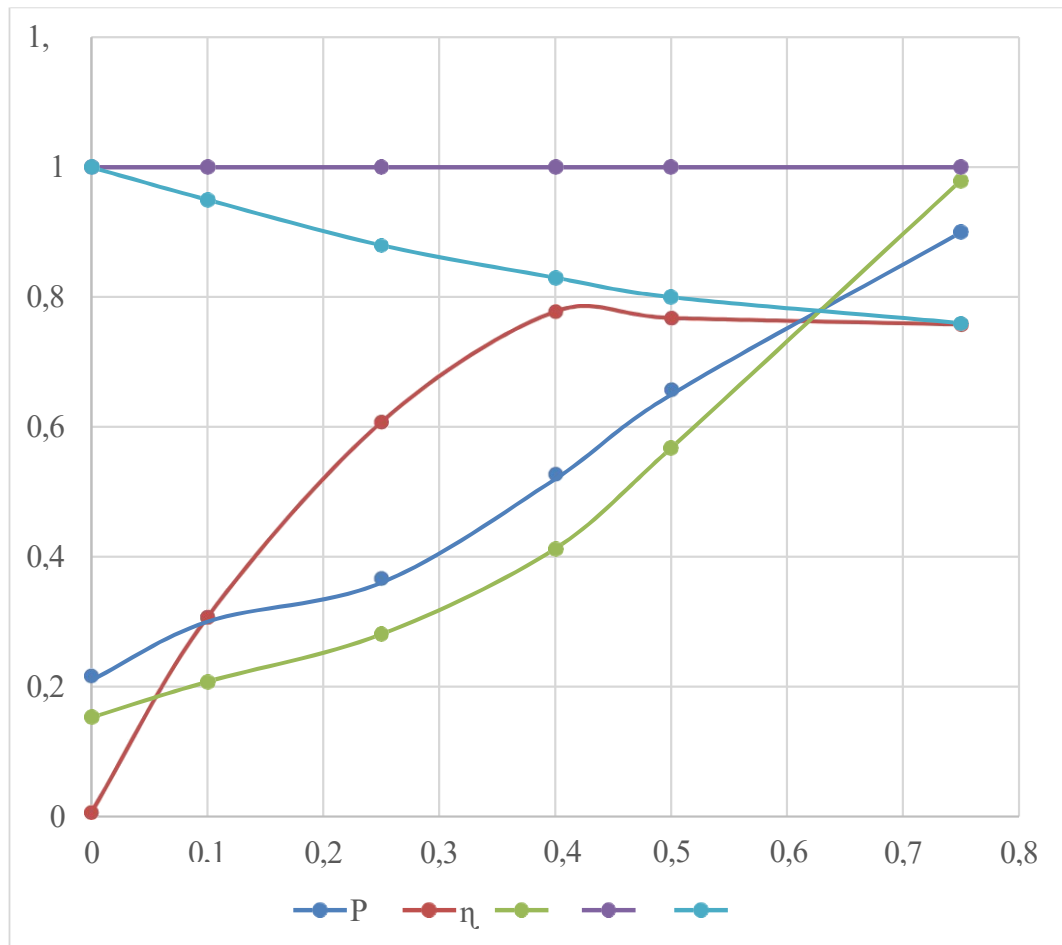


Рис.5.2. Робочі характеристики синхронного двигуна

Отримані результати відповідають теоретичним даним про синхронні двигуни.

5.2. Результат дослідження синхронної машини малої потужності в режимі генератора

Під час експлуатації синхронної машини як генератора, первинним рушієм слугував двигун постійного струму. Було виконано такі випробування:

- Визначення холодохідної характеристики синхронного генератора
- Визначення характеристики холостого ходу синхронного генератора
- Складання V-подібних кривих синхронного генератора

Вивчення роботи синхронного генератора на холостому ходу полягає у встановленні взаємозв'язку між електрорушійною силою (ЕРС) в обмотці якоря та струмом збудження, за умови повної відсутності споживачів. Результати,

отримані в ході цих експериментів, наведено у таблиці 5.3.

Таблиця 5.3. Дані характеристик холостого ходу

E_a	I_z
236	1,44
220	1,2
210	0,85
180	0,56
140	0,35
100	0,2
0	0

З отриманих даних були побудовані наступні графічні відображення (рис.5.3).

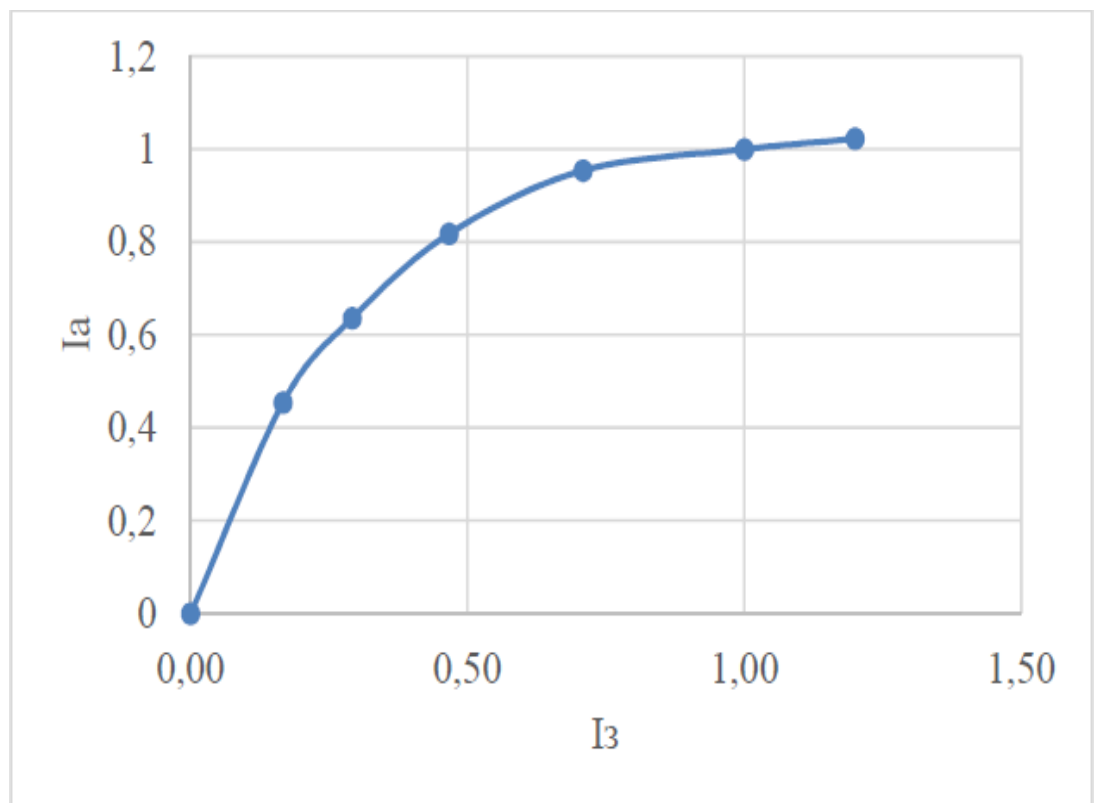


Рис. 5.3 Характеристика холостого ходу

Дослідження синхронного генератора в режимі короткого замикання це залежність струму якоря від струму збудження при замкнутій обмотці якоря.

Дані отримані під час досліджень зображенні в табл. 3.4.

Таблиця 5.4 Дані характеристики короткого замикання

I_a	I_z
3,14	0,246
2,85	0,22
2,5	0,19
2,2	0,17
1,9	0,15
1,2	0,1
0	0

З отриманих даних були побудовані наступні графічні відображення (рис. 5.4).

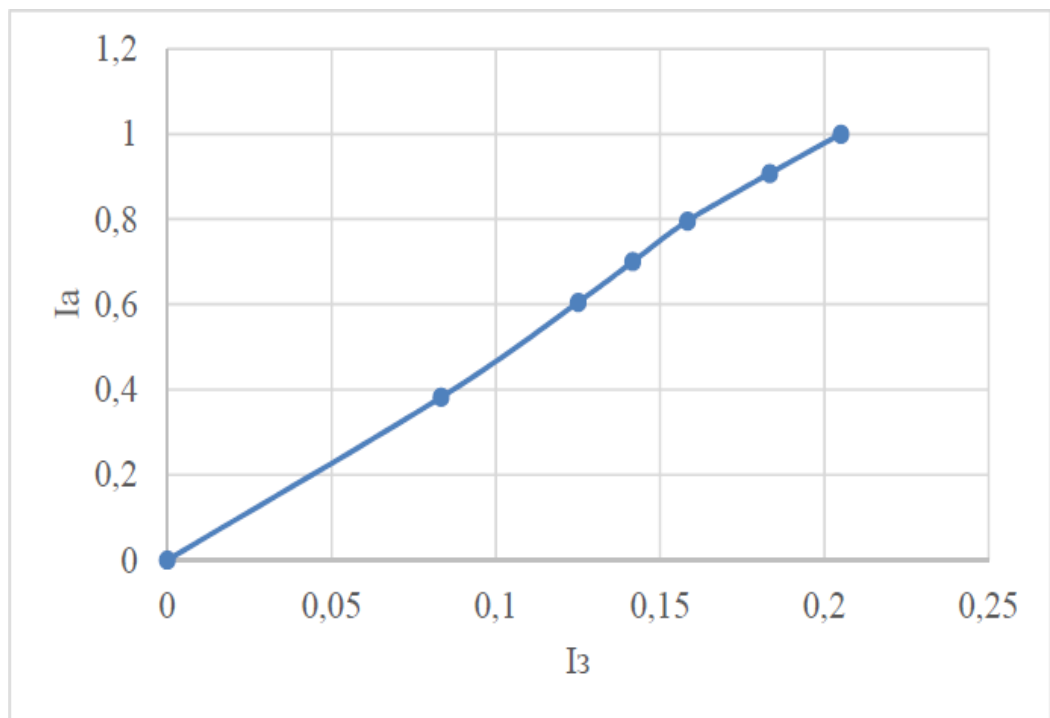


Рис. 5.4 Характеристики короткого замикання

Вимірювання V-подібних кривих проводилися за умов холостого ходу, а також при прикладених навантаженнях у $0.2P_2$ та $0.6P_2$; при цьому зафіксовано співвідношення між струмом якоря та струмом його обмотки збудження. Результати експериментів, виконаних у рамках дослідження, представлені у таблиці 3.5.

Таблиця 3.5 V-подібні характеристики синхронного двигуна

Ia	Iв	Ia	Iв	Ia	Iв
2,67	0,32	2,36	0,75	2,98	0,96
1,17	0,86	1,21	1,20	2,35	1,29
0,00	1,42	0,48	1,59	1,65	1,56
0,76	2,15	0,86	1,93	1,32	1,89
1,90	2,68	1,45	2,45	2,12	2,58

За результатами отриманих даних були побудовані графіки V – подібних характеристик (рис.5.5)

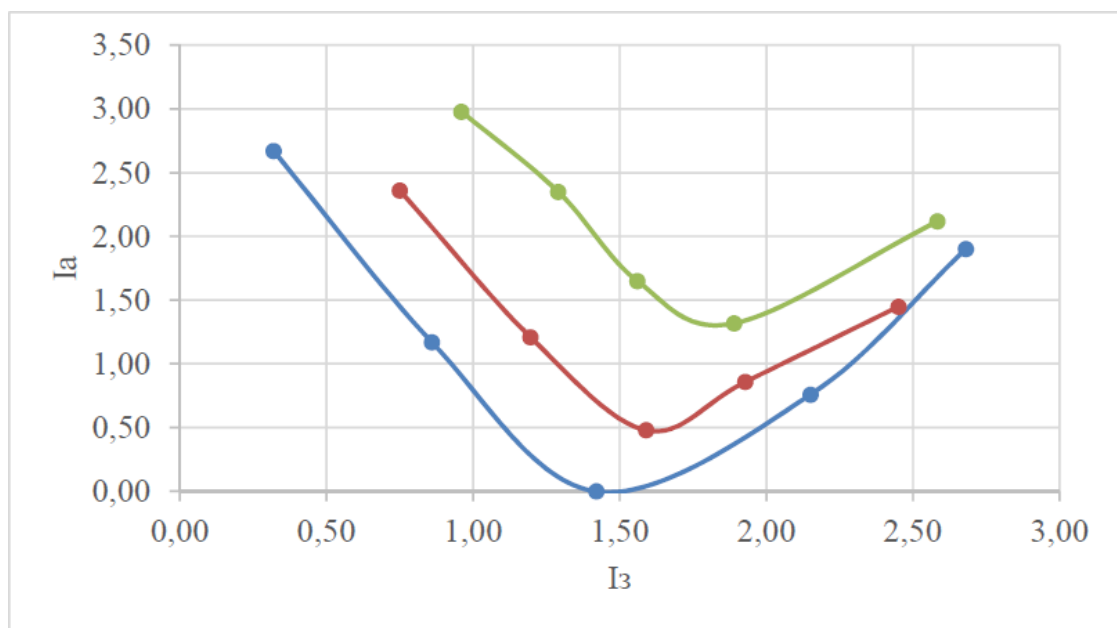


Рис.5.5 V-подібні характеристики синхронного генератора

Створена експериментальна установка успішно реалізує своє ключове призначення, будучи пристосованою для вивчення синхронної машини, зокрема для проведення випробувань як у моторі, так і в генераторному режимах роботи.

Зібрані натурні показники збігаються з теоретичними положеннями, що стосуються синхронних машин, дозволяючи зробити висновок про коректне калібрування установки та функціонування усіх її складових елементів.

Висновки до розділу 5

Під час експлуатації синхронної машини як генератора, первинним рушієм слугував двигун постійного струму. Було виконано такі випробування:

- Визначення холодохідної характеристики синхронного генератора
- Визначення характеристики холостого ходу синхронного генератора
- Складання V-подібних кривих синхронного генератора

Дослідження синхронного генератора в режимі короткого замикання це залежність струму якоря від струму збудження при замкнутій обмотці якоря.

Вимірювання V-подібних кривих проводилися за умов холостого ходу, а також при прикладених навантаженнях у $0.2P_2$ та $0.6P_2$; при цьому зафіксовано співвідношення між струмом якоря та струмом його обмотки збудження. Результати експериментів, виконаних у рамках дослідження,

Створена експериментальна установка успішно реалізує своє ключове призначення, будучи пристосованою для вивчення синхронної машини, зокрема для проведення випробувань як у моторному, так і в генераторному режимах роботи.

РОЗДІЛ 6. БЕЗПЕКА ПРАЦІ ПРИ ЕКСПЛУАТАЦІЇ ЕЛЕКТРОУСТАНОВОК

6.1. Загальні вимоги

Зокрема, діяльність будь-якої особи, незалежно від її професії, роду занять чи рівня освіти, нерозривно пов'язана з використанням електричної енергії. Де б не перебувала особа, вона так чи інакше залучена до взаємодії з електрообладнанням, споживаючи її. Проте, сприймаючи електроенергію як щось, необхідне для повсякденного життя, ніколи не варто забувати про її потенційну небезпеку та унікальні властивості.

Першою особливістю є те, що електрична напруга на відстані жодним чином не видає себе. Людські органи чуття не здатні визначити наявність цієї загрози дистанційно. Про те, чи присутня електрична напруга, можна дізнатися лише за опосередкованими ознаками: показаннями вимірювальних приладів, положенням важелів апаратури комутації, спрацюванням сигнальних ламп тощо.

Друге, небезпека ураження електричним струмом виникає лише у момент фізичного контакту зі струмовідними частинами електроустановки. При цьому загроза настає блискавично, з такою швидкістю, що людина фізично неспроможна встигнути вжити заходів для самостійного припинення дії небезпечного струму. При електротравмі швидкість, з якою струм впливає на організм, значно перевищує швидкодію захисних рефлексів організму, заснованих на безумовних рефлексах.

Як шкідливий фактор, електричний струм, взаємодіючи з організмом, може спричинити електротравми з важкими наслідками, аж до летального результату. Крім того, навіть невеликі значення сили струму здатні викликати патологічні зміни у кровоносній системі, а також у серцево-судинній та центральній нервовій системах людини.

З огляду на поширеність та активне застосування електроенергії, володіння певним обсягом знань у сфері електробезпеки є життєво

необхідним.

Електробезпека визначається як комплекс організаційних та технічних дій і засобів, призначений для убезпечення людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), це стан, за якого відсутні загрози для життя, здоров'я та майна людей, тварин, рослин і навколишнього середовища, що перевищують прийнятний рівень ризику, спричинені електроустановкою.

6.2. Дія електричного струму на організм людини

Дія електричного струму на людський організм спричиняє термічний, електролітичний та біологічний ефекти. Унаслідок теплового впливу можуть з'являтися опіки, а також нагрівання тканин, крові та лімфатичної рідини. Електролітичний вплив тягне за собою розпад крові, а біологічний – подразнення та стимуляцію живих тканин, що проявляється тетанічними скороченнями м'язів (включно з тими, що відповідають за роботу серця та легень). Умовно усі наслідки ураження електрикою поділяють на два типи: локальні електротравми та електричний удар. Перші мають п'ять різновидів, які ми зараз розглянемо.

Електричний опік — це ушкодження, спричинене тепловою дією струму, що виникає при контакті струмопровідного елемента з тілом (при температурі 60–70 °С відбувається денатурація білка, що й спричиняє опік). Розрізняють чотири гради екстенсивності опіків, які характеризуються наступними проявами:

- 1 – почервоніння шкірного покриву;
- 2 – формування пухирів;
- 3 – обуглення шкірного покриву;
- 4 – обуглення підшкірної основи, м'язової тканини та кісток.

Такі травми, як електричні знаки та мітки, постають у вигляді чітко окреслених плям сірого або блідо-жовтого відтінку, діаметром від 1 до 5 мм,

що утворюються в місці безпосереднього контакту провідника з тілом.

Металізація шкіри полягає у вrostанні частинок металу у шкіру, що відбувається через його розплавлення під впливом електричної дуги, яка виникає при короткому замиканні. Механічні травмування зумовлені ушкодженнями людини внаслідок втрати свідомості або м'язових спазмів, спричинених ураженням нервової системи. Електроофтальмія – це ураження, що виявляється запаленням слизової оболонки очей через експозицію потужному потоку ультрафіолетового випромінювання від електричної дуги.

Під електричним ударом розуміють процес порушення життєдіяльності організму під впливом електричного струму, що супроводжується сильними м'язовими скороченнями. Виділяють чотири стадії цього впливу:

- 1 – тетанічні скорочення м'язів без втрати орієнтації;
- 2 – тетанічні скорочення м'язів із втратою свідомості;
- 3 – фібриляція серця (хаотичні, невпорядковані скорочення серцевого м'яза — окремих волокон чи шлуночків — з частотою до кількох сотень на хвилину, через що серце не здатне ефективно перекачувати кров, що призводить до зупинки серця та клінічної смерті);
- 4 – настання клінічної смерті.

Особливості реакції людського організму на вплив змінного струму промислової частоти відображено у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1. Вплив змінного струму промислової частоти на організм людини

Сила струму, мА	Відчуття і реакції організму людини
До 1	Вплив струму не відчувається
1-6	Безболісні відчуття. Управління м'язами не втрачене. Можливо самостійне звільнення від контакту з провідником
6-20	Хворобливі відчуття. Управління м'язами утруднено, однак самостійне звільнення людини від контакту з провідником можливо
20-30	Вельми хворобливі відчуття впливу струму. Самостійне відділення людини від провідника неможливо
30-50	Сильні судомні скорочення м'язів. Дихання утруднено. Можлива зупинка дихання і серця
50-80	Зупинка дихання. Початок фібриляції серця
90-100	Зупинка дихання. При тривалості контакту 3 с і більше зупинка серця
Більше 100	Параліч дихання і параліч серця

Розглядаючи дані, що містяться у цій таблиці, можна дійти висновку про пряму залежність тяжкості ураження людини від величини змінного струму. У міру наростання сили струму, початково безболісні відчуття від його дії перетворюються на болісні, а згодом – на дуже сильні. Досягається такий поріг, коли людина вже не здатна самотійно відірватися від джерела струму; у цей момент може виникнути фібриляція серця, аж до його повної зупинки.

Для практичного застосування відомостей, представлених у таблиці, визначено три ключові критерії електробезпеки:

1. – Струм, який не спричиняє відчутних ефектів: струм такої сили, проходження якого крізь тіло людини протягом доби (не більше 10 хвилин) не викликає жодних порушень у функціонуванні організму. Для змінного струму цей показник становить $I_{\sim}=0,6$ мА, а для постійного – $I_{-}=15$ мА;

2. – Струм, що дозволяє звільнитись: це струм, дія якого допустима, якщо він проходить через тіло людини не довше 30 секунд (для змінного струму $I_{\sim}=6$ мА, а для постійного $I_{-}=15$ мА);

3. – Струм, що не спричиняє фібриляції: це граничний струм, який ще не викликає серцевої фібриляції.

Величина цього струму варіативна і залежить від тривалості його проходження через тіло людини, що детально відображено у таблиці 6.2.

Таблиця 6.2. Сила струму, яка відповідає критерію "фібриляційний струм"

t, с	1,0	0,5	0,2	0,1	0,01-0,08
I_{\sim} , мА	50	100	250	500	650
I_{-} , мА	200	250	400	500	650

Згідно з аналізом інформації з таблиці 6.2, ступінь впливу електричного струму корелює з часом його проходження крізь людський організм.

Зокрема, гранично допустима величина струму зростає у тринадцять разів, якщо тривалість впливу скорочується від однієї секунди до однієї сотої частки секунди.

Окрім таких параметрів, як величина струму та тривалість його дії, на організм впливають рід електричного струму, його частота, траєкторія проходження через тіло, а також особистісні характеристики людини та загальний опір її тканин. Розглянемо детальніше ці аспекти.

Електричний струм класифікують за родом: це може бути змінний, постійний або випрямлений змінний струм. Найбільш загрозливим вважається змінний струм у межах напруги приблизно 250–300 Вольт. У частотному спектрі найбільшу небезпеку становлять струми з частотою в діапазоні від 20 до 1000 Герц. Серед шляхів проходження струму через тіло найбільш небезпечними є ті, що охоплюють критично важливі системи життєзабезпечення (серце, легені, головний та спинний мозок). До індивідуальних особливостей людини належать стан покривних тканин (вологі чи сухі) та функціональний стан нервової системи тощо. Ключовим фактором у формуванні загального опору тіла виступає опір шкіри (зокрема, її зовнішнього, рогового шару, що не містить судин).

6.3. Умови ураження людини електричним струмом

Ключовою передумовою для отримання електротравми слугує контакт людини з елементами під напругою: оголеними проводами, частинами електрообладнання, якщо ізоляція пошкоджена, або з землею чи мокрою стіною при доторканні до них дроту, що обірвався. Навіть за умови повної цілісності ізоляції існує ризик ураження струмом, що виникає через ємнісний ефект.

Величина струму, що проходить крізь тіло людини, визначається типом електричної мережі. Існують мережі змінного струму з робочою напругою, що перевищує 1000 В, які можуть мати як ізольовану, так і глухозаземлену нейтраль, а також мережі до 1000 В з аналогічними конфігураціями нейтралі.

Зведемо до купи ризику ураження людини змінним електричним струмом у найбільш загальноживаних трифазних системах (звернімося до зображення 6.1).

На рисунку 6.1 зображено трифазну мережу, що має глухозаземлену нейтраль.

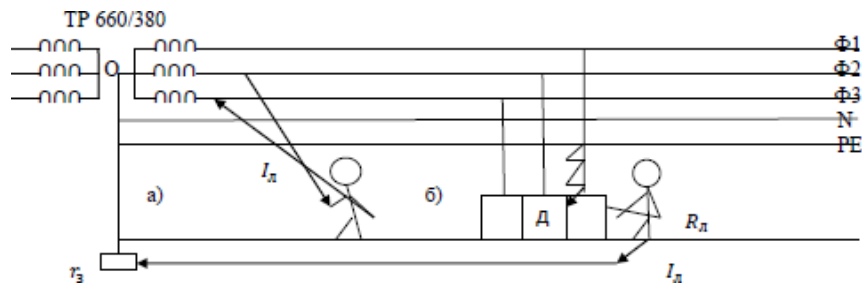


Рис. 6.1. Схема трифазної мережі з глухо-заземленою нейтраллю:

O – нейтраль;

Тр – понижуючий трансформатор;

r_3 – опір заземлення нейтралі не більше 2,4-8,0 Ом;

R_l – опір людини;

Д – силова установка трифазного струму;

PE – захисний (нульовий захисний) провідник; N – нейтральний (нульовий робочий) провідник

Перевагою такої мережі є те, що вона дозволяє від одного джерела одночасно жити силові та освітлювальні агрегати. Напряга між фазами 1, 2 і 3 складає 380 В, а між кожною фазою і нульовим проводом – 220 В.

При торканні двох фаз (рис.6.1 а) людина опиняється під напругою 380 В. Струм, що протікає через неї, дорівнює

$$I_n = \frac{U}{R_n} = \frac{380}{1000} = 380 \text{ мА} \quad 6.1$$

Найбільш часті випадки однофазного дотику або контакту людини з електроустановкою, що виявилася під напругою при пошкодженні ізоляції (рис. 6.1 б). При цьому струм, що проходить через людину, дорівнює

$$I_n = \frac{U}{r_3 + R_l} = \frac{220}{4 + 1000} = 220 \text{ мА} \quad 6.2$$

де $r_3 = 4$ Ом – опір заземлення нейтралі, який, згідно з нормативом, не повинний перевищувати 2,4-8,0 Ом.

Такий струм, безумовно, є теж небезпечним і неприпустимим.

Визначимо особливість трифазної мережі з ізольованою нейтраллю.

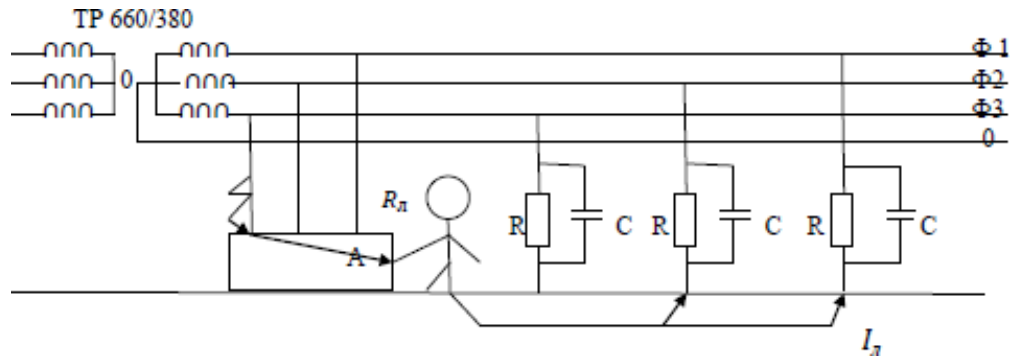


Рис. 6.2. Схема трифазної мережі з ізольованою нейтраллю:

О – нейтраль;

Тр – понижуючий трансформатор;

$R_{л}$ – опір людини;

А – точка дотику людини до корпусу електроустановки, на яку при пошкодженні ізоляції подана напруга;

С – ємність фаз відносно землі;

R – опір ізоляції фаз відносно землі; Ф1, Ф2, Ф3 – фази

У разі дотику людини до фази або корпусу електроустановки, який опинився під напругою, струм проходить через тіло людини і опір ізоляції двох інших фаз. якщо прийняти $U_{\phi} = 220$ В, $R_{л} = 1000$ Ом, $R = 10000$ Ом, то

$$I_{л} = \frac{3U_{\phi}}{3R_{л} + R} = \frac{3 \cdot 220}{3 \cdot 1000 + 10000} = 50 \text{ мА} \quad 6.3$$

Такий струм значно менше, ніж у мережі з глухо-заземленою нейтраллю.

Слід зазначити, що його величина отримана в припущенні про мале значення ємностей фаз щодо землі ($C = 0$). Якщо ємність значна, то струм, що приходить через тіло людини, дорівнює:

$$I_{л} = \frac{6U_{\phi}}{\sqrt{1 + 36\pi^2 f^2 C^2 R^2}} * \pi * f * C = \frac{6 \cdot 220 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,5}{\sqrt{1 + 36 \cdot 3,14^2 \cdot 2500 \cdot 0,25 \cdot 1000^2}} = 220 \text{ мА} \quad 6.4$$

де U_{ϕ} – фазна напруга;

$f = 50$ Гц – частота струму;

$C = 0,5 \text{ мкФ}$ – ємність фаз відносно землі;

$R_L = 1000 \text{ Ом}$ – опір людини.

Дане явище має місце в кабельних мережах і носить назву ємнісного

струму. Людина може бути вражена їм навіть при ідеальній ізоляції ($R \rightarrow \infty$).

Розгляд електричних мереж показав, що дотик до оголених проводів і корпусу електроустановки є небезпечним. Розрахунки проводилися при опорі тіла людини $R_L = 1000 \text{ Ом}$. У реальних же умовах на струм, що протікає через тіло людини, впливає опір взуття ($R_{об}$) та підлоги (R_n):

$$I_L = \frac{U_\phi}{R_L + R_{об} + R_n}$$

6.5

Електричний опір взуття коливається у вельми широкому спектрі, починаючи від 1,5 кілоома і сягаючи 8 мегаом.

Спротив підлоги безпосередньо залежить від таких факторів, як матеріал, ступінь вологості та її структурні особливості, демонструючи наступні значення:

- Суха дерев'яна підлога: 10 000 Ом;
- Дерев'яна підлога, зволожена водою: 20–25 кілоом;
- Суха бетонна підлога: 75 кілоом;
- Волога бетонна підлога: 1,5 кілоома.

Таким чином, у випадку, коли підлога та взуття інтегровані в замкнутий контур пересування людини, вони здатні значно (у діапазоні від 1,5 до 1000 разів) послабити величину електричного струму, що проходить крізь тіло.

Ключовим моментом у вивченні електробезпеки є визначення того, чи утворюється замкнений контур для циркуляції електричного струму.

У системах з глухозаземленою нульовою точкою при контакті людини

з однією фазою струм протікає наступним чином: від нульового проводу, через обмотку трансформатора, фазний провід, корпус електрообладнання, людину, ґрунт, до заземлення нульового проводу, повертаючись таким чином до джерела живлення (див. Рисунок 6.1). У мережах, де нульова точка ізольована (як показано на Рисунку 6.2), струм надходить від нульового проводу, проходить через обмотку трансформатора, фазний провід, корпус електроустановки, далі через людину, землю, і повертається до джерела живлення завдяки опору R і ємності C інших, не пошкоджених фаз щодо землі.

Важливо візуалізувати траєкторію руху струму для адекватного розуміння роботи захисних механізмів та оцінки наслідків ураження людини. Розглянемо детально, яким чином шлях, яким електричний струм проходить через людське тіло, впливає на поріг виникнення фібриляції серцевих шлуночків, що несе загрозу життю.

Далі буде представлено графік, що ілюструє взаємозв'язок між напругою дотику та силою струму для різних траєкторій проходження струму через організм людини (Рисунок 6.3).

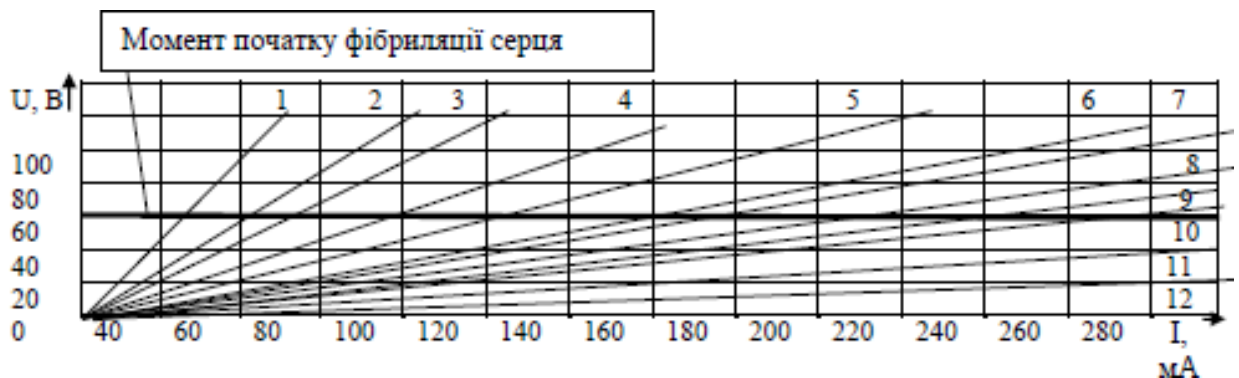


Рис. 6.3. Залежності напруги дотику від сили струму і моменту настання фібриляції серця при проходженні струму через тіло людини по шляху: 1 – ліва рука-груди; 2 – права рука-груди; 3 – руки-груди; 4 – ліва рука-ліва нога; 5 – руки-седалище; 6 – ліва рука-спина; 7 – права рука-седалище; 8 – руки-спина; 9 – рука-рука; 10 – права рука-спина чи ліва рука-горло; 11 – права рука-горло; 12 – руки-горло

З наведеної діаграми вимальовується, що для траєкторії струму під назвою «рука-груди» (шлях 1) небезпека є найбільшою, адже фібриляція

серця діагностується вже при силі струму в 55 мА. Це пояснюється тим, що серце опиняється безпосередньо на шляху проходження електричного струму.

Якщо ж розглядати траєкторію «рука-рука» (лінія 9), то фібриляційні явища починаються лише від 220 мА. Причина цьому — розташування серця поза головним вектором руху струму (у відгалуженні, нижче його шляху).

Розглянемо детальніше причини появи фібриляції. Наслідок ураження електричним струмом відчутно залежить від того, скільки часу струм проходить крізь тіло. Це пов'язано з низкою факторів, зокрема з тим, що протягом часу опір шкіри знижується, що призводить до збільшення реальної величини струму. Чим довший контакт, тим вища ймовірність, що момент проходження струму через серце збігатиметься з чутливою (вразливою) стадією Т серцевого циклу.

Кожен цикл роботи серця складається з двох основних інтервалів (рис 6.4, а). Перший інтервал, позначений як Р, — це фаза діастолі, коли шлуночки серця перебувають у стані релаксації та наповнюються кров'ю. Другий інтервал, який називається систолою, — це пік QRS, коли серце скорочується, виштовхуючи кров у судини.

Після систолі настає період, коли скорочення шлуночків завершується, і вони переходять у стан спокою — це так звана фаза Т, яка триває приблизно 0,2 секунди. Зазвичай, якщо струм проходить через міокард саме у фазі Т, це провокує фібриляцію. Якщо ж час контакту зі струмом не збігається з цією фазою, ризик розвитку фібриляції значно знижується.

Таким чином, імовірність початку фібриляції серцевого м'яза та небезпека для життя людини визначаються не лише чисельним значенням струму, а й тим, з яким саме етапом серцевого циклу збігається проходження струму через ділянку, де розташоване серце (рис. 6.4, б).

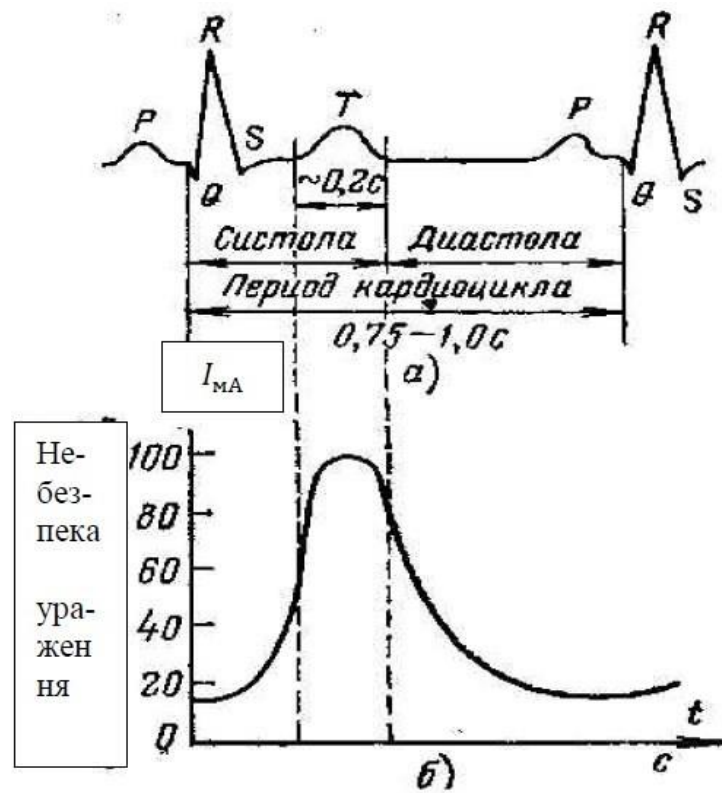


Рис. 6.4. Небезпека ураження людини струмом залежно від збігу часу проходження струму з різними фазами кардіологічного циклу:
 а) електрокардіоцикл здорової людини; б) ймовірність виникнення фібриляції серця від моменту протікання струму через серце

На те, як струм позначиться на людині, значною мірою впливає тривалість, протягом якої вона контактує з джерелом під напругою. Якщо цей час збільшується, показник опору шкірних покривів та крові падає, що дозволяє значному електричному заряду проникати до життєво важливих органів.

Таким чином, зроблено висновок, що чим більша потужність струму та коротший шлях його проходження до серця, тим небезпечнішим є контакт людини з електричним провідником. Крім того, вирішальне значення має період, протягом якого струм безпосередньо проходить крізь тіло людини.

6.4. Небезпека ураження електричним струмом від крокової напруги

У реальній роботі доволі часто трапляються ситуації, коли

струмопровідні елементи апаратури замикаються на землю. Такий контакт із землею може статися через пошкодження ізоляції, що призведе до потрапляння на корпус електроустановки під напругою, або ж унаслідок падіння на ґрунт обірваного проводу через руйнування ізоляторів на опорах ЛЕП, тощо.

У всіх подібних інцидентах струм, що проходить через струмовідні частини обладнання, знаходить шлях до землі у місці контакту, формуючи навколо себе потенційний розподіл на поверхні. Різниця потенціалів, зафіксована між двома точками на цій поверхні, розташованими на відстані одного кроку (прийнято 0,8 м), називається кроковою напругою.

Аби убезпечити людей від ризику ураження електричним струмом через імпет крокової напруги, критично важливо розуміти, як саме розподіляється потенціал на земній поверхні довкола місця, куди струм витікає у землю.

Для початку, розглянемо найбільш елементарну гіпотетичну ситуацію: струм потрапляє у ґрунт через заземлювач, який має форму півсфери, заглибленої у ґрунт (рис. 6.5).

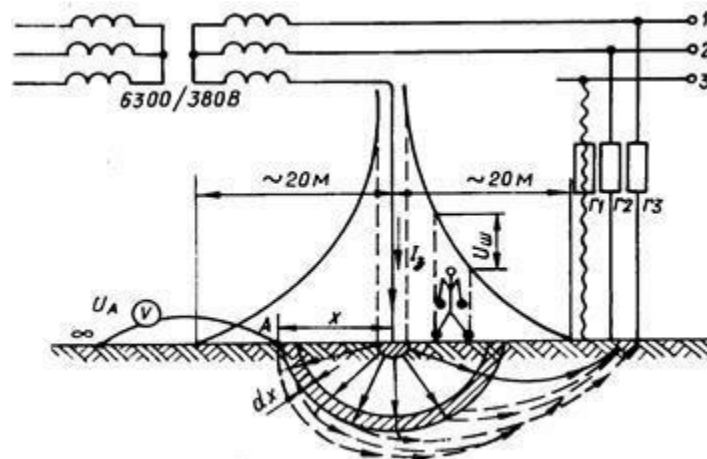


Рис. 6.5. Розподіл потенціалу по поверхні землі навколо напівкульового заземлювача

Тоді щільність струму в землі буде убувати і на відстані x від центра напівкульового заземлювача буде дорівнювати

$$J = \frac{I_3}{2\pi x^2} \quad (6.6)$$

де J – щільність струму, A/m^2 .

Поле розтікання постійного і перемінного струмів частотою 50 Гц в однорідному провідному середовищі можна вважати стаціонарним електричним полем. У ньому щільність струму і напруженість E у точці x зв'язані залежністю закону Ома в диференціальній формі

$$J = \frac{E}{\rho} \quad (6.7)$$

де E – напруженість електричного поля, V/m ; ρ – питомий опір ґрунту, $Om \cdot cm$.

Спадання напруги d у шарі dx

$$dU = E dx = \frac{I_3 \rho}{2\pi x^2} dx \quad (6.8)$$

Потенціал точки A (ϕ_A), якому відповідає півсфера між точкою з радіусом x і точкою, що відстоїть на нескінченно великій відстані (∞), визначиться при розв'язанні інтеграла

$$\phi_A = U_A = \int_x^{\infty} dU = \int_x^{\infty} \frac{I_3 \rho}{2\pi x^2} = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \int \frac{dx}{x^2} = \frac{I_3 \rho}{2\pi} \frac{1}{x} \quad (6.9)$$

$$\phi_B = U_B = \frac{I_3 \rho}{2\pi x_1} dx \cdot \frac{I_3 \rho}{2\pi x} \quad (6.10)$$

Позначивши постійний добуток через k , одержимо рівняння рівносторонньої гіперболи:

$$U_x = k \frac{1}{x} \quad (6.11)$$

Отже, електричний потенціал, що поширюється від точки обриву дроту по рівномірній поверхні ґрунту, спадає в усіх напрямках відповідно до закону, що описується гіперболою. Різниця ж електричних потенціалів між двома

точками, розташованими на відстані одного кроку (а саме 0,8 метра), іменується напругою кроку. Значення цього потенціалу знижується зі збільшенням відстані від місця пробою, і вже на дистанції понад 20 метрів у мережах з напругою до 0,4 кВ вона вже не несе загрози для життя людини.

У реальних умовах ґрунт навколо зони замикання зазвичай неоднорідний. У такому разі лінії, що мають однаковий потенціал, не виглядатимуть як концентричні кола, а розподіл потенціалу від джерела замикання відбуватиметься за більш заплутаною формулою, що визначається питомим електричним опором ґрунтового середовища навколо точки заземлення.

З небезпечної зони, де присутня крокова напруга, слід вибиратися, роблячи маленькі кроки, при цьому рухаючись у напрямку, де електрична дія струму слабшає. Категорично заборонено стрибати чи намагатися швидко втекти, оскільки у випадку падіння на тіло людини може бути прикладена напруга, що перевищує навіть саму напругу кроку.

6.5. Захист від ураження людини електричним струмом

Засоби захисту від ураження електричним струмом поділяють на організаційні та технічні. До організаційних належать: належне налагодження обслуговування працюючих установок та проведення ремонтів, оформлення робіт за допомогою наряду чи усного розпорядження, допуск до роботи, контроль під час виконання робіт, фіксація перерв у роботі та переходів на інші робочі місця, завершення робіт, перевірка відсутності напруги та стану заземлення. Розглянемо детальніше кожен із цих пунктів.

Організація обслуговування, профілактичних заходів та ремонту електрообладнання здійснюється відповідно до правил технічної експлуатації (ПТЕ) та правил технічної безпеки (ПТБ) електроустановок споживачів, а також правил улаштування електроустановок (ПУЕ). Електроустановки, що постійно перебувають під напругою або можуть бути підключені за допомогою пускачів тощо, вважаються діючими. На виконання робіт з

обслуговування та ремонту електрообладнання суттєво впливають умови навколишнього робочого середовища. Приміщення класифікуються як:

- з підвищеною небезпекою ураження струмом (відносна вологість повітря $W > 75\%$, температура повітря $t > 35\text{ }^{\circ}\text{C}$, наявність струмопровідного пилу і (або) підлоги, можливість контакту людини з металевими корпусами апаратури з одного боку та заземленими металевими конструкціями – з іншого);

- особливо небезпечні – $W \geq 100\%$, присутність хімічно активних речовин, які руйнують ізоляцію, або одночасна наявність двох умов, що визначають приміщення з підвищеною небезпекою;

- без підвищеної небезпеки – відсутні вищезгадані чинники.

Категоризація приміщень накладає певні обмеження на захисні методи при обслуговуванні та ремонті електроустановок. Наприклад, у приміщеннях із підвищеною небезпекою електроінструмент та переносні світильники повинні мати подвійну ізоляцію або живитися від напруги не вище 42 В. До робіт на електроустановках допускаються лише спеціально підготовлені працівники, яким надано одну з п'яти кваліфікаційних груп з електробезпеки та відповідне посвідчення; вони мають бути не молодше 18 років і мати медичний дозвіл на виконання таких робіт.

Оформлення робіт за нарядом передбачає створення, підписання та видачу документа, що містить інформацію щодо категорії та типу роботи, місця, часу, умов безпечного виконання, кваліфікаційного складу бригади та розподілу відповідальності за безпеку.

Перед допуском до роботи відповідальний керівник перевіряє робочу зону, відповідність кваліфікаційного рівня бригади характеру роботи, впевнюється у відсутності напруги на відключеній ділянці, проводить інструктаж для бригади та передає робоче місце виконавцю.

Нагляд під час роботи здійснюється керівником робіт або спостерігачем. При цьому, якщо виконавець може брати участь у роботі, то спостерігач не може.

Перед початком перерви у роботі керівник дає команду про зупинку,

перевіряє, чи прибрано інструменти, та чи приведено робоче місце у безпечний стан.

Після завершення роботи керівник оглядає місце виконання робіт та робить відмітку про закінчення у наряді.

Перевірка відсутності напруги виконується між усіма фазами, між кожною фазою та нульовим проводом, а також між кожною фазою та землею. Заземлення струмопровідних частин обладнання за допомогою переносних заземлювачів застосовується для захисту персоналу у разі помилкової подачі напруги на робочу зону. Заземленню підлягають усі фази електроустановки; при цьому спочатку заземлювач приєднують до землі, а вже потім (після перевірки відсутності напруги) – до фази. Зняття заземлювача виконується у зворотному порядку. Кріплення заземлювача допускається за допомогою болтів або струбцин.

До технічних заходів захисту від електричного струму належать:

відключення, встановлення попереджувальних плакатів, електрична ізоляція, захисне заземлення, занулення,

зрівнювання потенціалів, захисне відключення, електричне розділення мережі, застосування малої напруги,

подвійна ізоляція.

Відключення має бути виконано з явним розривом (вимкнення роз'єднувачів, вимикачів, викручування плавких вставок тощо), охоплюючи струмопровідні частини, де проводяться роботи, а також ті, до яких можливий випадковий дотик.

Плакати «Не вмикати – працюють люди» слід вивішувати на ручках вимикачів (пускачів), на цоколях запобіжників. На переносних огородженнях вивішується плакат «Стій! Напруга!», а на підготовлених робочих місцях – «Працювати тут!».

Фізична суть ізоляції полягає у обмеженні сили струму, що проходить через тіло людини в процесі експлуатації електроустановки. Стан ізоляції залежить від матеріалу, конструкції установки та умов середовища у приміщенні (t , W , пил тощо). Якість ізоляції оцінюється її опором струмам

витоку. Згідно з ПУЕ, допустимий струм витоку між двома запобіжниками не повинен перевищувати $I_{ут} < 0,001 \text{ А}$. Контроль якості ізоляції здійснюється періодично (за допомогою мегомметра) та постійно (вентильними приладами). Мегомметр – це ручний генератор постійного струму. У тому ж корпусі інтегровано магнітоелектричний вимірювальний прилад постійного струму. Вентильні прилади налаштовані таким чином, щоб подати звуковий та світловий сигнал у разі $I_{ут} > I_{кр}$, що свідчить про недопустиме зниження опору ізоляції.

Захисне заземлення використовується у мережах з глухозаземленою нейтраллю та передбачає цілеспрямоване електричне з'єднання із землею металевих частин обладнання, що не проводять струм, які можуть опинитися під напругою. Заземлювач складається із заземлювача та заземлюючого провідника. Перший може бути штучним (система горизонтальних чи вертикальних провідників, підключених до землі) або природним (сталеві неокрашені труби, обсадні труби, металева оболонка кабелю тощо). Захисний ефект заземлення полягає в тому, що в аварійній ситуації струм, що проходить через людину, у 100-250 разів менший (у стільки, наскільки опір тіла людини ($R_{л} = 1000 \text{ Ом}$) перевищує опір заземлювача ($R_{з} = 2,4-8,0 \text{ Ом}$)).

Занулення застосовується у мережах з ізолюваною нейтраллю і полягає у цілеспрямованому електричному з'єднанні металевих частин обладнання, що не проводять струм (які можуть мати напругу), з нульовим захисним провідником. Суть занулення полягає у створенні струму короткого замикання, який активує швидкодіючий струмовий захист, що відключає електроустановку від мережі. При зануленні час дії струму на людину є мінімальним.

Під зрівнюванням потенціалів розуміють технічний спосіб захисту, який зменшує напругу дотику та кроку за допомогою влаштування контурних заземлювачів. Коли струм стікає з такого заземлювача, ділянки землі всередині контуру набувають потенціалу, близького до потенціалу заземлювача, що знижує напругу дотику та кроку.

Захисне відключення – це швидкодіючий захист, що автоматично

відключає електроустановку від мережі при виникненні небезпеки ураження людини струмом (застосовується у комплексі із зануленням).

Електричне розділення мережі знижує вірогідність ураження емнісним струмом і досягається шляхом поділу мережі на електромагістралі обмеженої довжини.

Застосування малої напруги покращує умови електробезпеки. Наприклад, при $U = 10-12 \text{ В}$ та $R_{\text{л}} = 5-6 \text{ кОм}$, величина $I_{\text{л}} < 2 \text{ мА}$. Такий струм є безпечним навіть при тривалому протіканні через людину.

Подвійна ізоляція – це спосіб захисту, який передбачає наявність, окрім основного робочого ізоляційного шару струмопровідних частин обладнання, ще одного додаткового ізоляційного шару. При цьому не потрібні заземлення чи занулення корпусів електрообладнання. Подвійна ізоляція використовується як захисний елемент у персональних комп'ютерах та побутовій електротехніці.

Висновки до розділу 6

Електробезпека визначається як комплекс організаційних та технічних дій і засобів, призначений для убезпечення людей від шкідливого та небезпечного впливу електричного струму. Відповідно до Правил улаштування електроустановок (ПУЕ), це стан, за якого відсутні загрози для життя, здоров'я та майна людей, тварин, рослин і навколишнього середовища, що перевищують прийнятний рівень ризику, спричинені електроустановкою.

ВИСНОВОК

Вивчення та розгляд застосування засобів підтримання працездатності електромашин, зокрема синхронних електрогенераторів, є надзвичайно важливим для підвищення їхньої продуктивності та гарантування стійкості їхньої роботи. У першому параграфі було докладно проаналізовано загальноприйняті ідеї та визначення електромашин, їхні основні типи та характерні риси, а також проведено аналіз трифазних синхронних генераторів, які відіграють ключову роль у процесах електрифікації народного господарства.

Другий розділ сфокусований на загальній характеристиці синхронного електромотора та принципах його функціонування. Це дало змогу усвідомити значущість цих пристроїв у широкому спектрі промислових та побутових застосувань. Раціональне використання електромашин невеликої потужності є необхідним для оптимізації функціонування різноманітних механізмів, що працюють у режимі двигуна, а також для подачі енергії у мережі, де спостерігаються незначні пікові навантаження.

Третя частина детально охоплює особливості проведення випробувань синхронних двигунів, процедури їхнього відновлення та аналіз математичної моделі об'єкта, що підлягає вимірюванню. Ці відомості створюють основу для забезпечення ефективного сервісного обслуговування та ремонту електромашин. Особливу увагу було приділено розробці методів фіксації механічних показників, що дає змогу виявляти потенційні збої та проводити необхідне коригування для збереження оптимального режиму роботи.

У четвертій параграфі було розглянуто обсяги робіт, пов'язаних із сервісним обслуговуванням та ремонтом електромашин, а також висвітлено норми техніки безпеки під час виконання цих операцій. Належне обслуговування та ремонт гарантують тривалу й надійну експлуатацію електромашин у промисловому секторі та інших сферах. Забезпечення безпеки під час сервісних робіт із електромашинами є критично важливим

аспектом, оскільки ці дії пов'язані з потенційно небезпечними електричними параметрами та ризиком отримання травм персоналом.

П'ятий розділ викликав значну увагу, оскільки в ньому було здійснено експериментальне дослідження робочих параметрів синхронної машини малої потужності. Виявлені V-подібні криві та робочі характеристики синхронного двигуна дозволять удосконалити його функціонування у різних режимах, забезпечуючи більш точне коригування потужності та кращу адаптацію до мінливих умов. Крім того, дослідження синхронного генератора у станах холостого ходу та короткого замикання надають важливу інформацію для його ефективного застосування у процесі електрогенерації. Отримані результати можуть слугувати фундаментом для подальших наукових пошуків та розробок у галузі підвищення продуктивності та надійності синхронних машин різної потужності.

Загалом, представлені у розділах матеріали демонструють, що підвищення ефективності застосування методів технічного обслуговування електромашин, зокрема синхронних генераторів, має істотне значення для стабільного розвитку електроенергетичної індустрії та інших промислових секторів. Впровадження найкращих практик обслуговування та ефективних стратегій ремонту сприятиме досягненню максимальної доступності та продуктивності електромашин, що, у свою чергу, призведе до зменшення витрат на їхню експлуатацію та підвищення загальної енергоефективності.

Дослідження робочих параметрів синхронної машини малої потужності, отримані у п'ятій частині, можуть бути використані як основа для конструювання та виробництва нових високоефективних електромашин. Удосконалення механізмів керування параметрами синхронних генераторів під час роботи дозволить забезпечити стабільний та точний контроль виробленої потужності відповідно до потреб кінцевих споживачів.

Процес технічного обслуговування та ремонту електромашин вимагає високого рівня професійної підготовки персоналу, а також використання спеціалізованого обладнання та інструментарію. Тому першочергової уваги потребує навчання та підвищення кваліфікації фахівців у цій сфері, що

сприятиме безперебійній та безпечній роботі електротехнічного оснащення.

Аби гарантувати стабільний прогрес та надійність роботи електромашин, необхідно активно впроваджувати передові технології обслуговування, такі як інтеграція датчиків стану, системи моніторингу та діагностики на базі штучного інтелекту та аналіз даних. Ці новітні підходи дадуть можливість прогнозувати можливі виникнення несправностей та своєчасно вживати превентивних заходів, що знизить ризик аварій та непередбачених простоїв у функціонуванні електромашин.

Окрім того, розвиток автоматизації сервісного обслуговування та ремонту електромашин дозволить мінімізувати вплив людського чинника та досягти вищої точності й ефективності робочих процесів. Застосування роботизованих комплексів для обслуговування та ремонту електромашин може посприяти зростанню продуктивності та скороченню часу простою обладнання.

Узагальнюючи, високий рівень технічного обслуговування та ремонту електромашин є абсолютно необхідним для забезпечення стабільного та надійного електропостачання у сучасному світі. Впровадження сучасних технологічних рішень, підвищення рівня експертизи фахівців та забезпечення безперебійної функціональності електротехнічного обладнання допоможуть досягти цієї мети та гарантувати стійке функціонування енергетичної галузі на користь суспільства.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Матвійчук В.А., Штуць А.А. Методичні вказівки до виконання кваліфікаційної роботи здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти галузі знань 14 «Електрична інженерія» спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» денної та заочної форм навчання. Вінниця: ВНАУ, 2022. 98 с.
2. Матвійчук В. А. Рубаненко О. Є. Гунько І.О. Діагностування електрообладнання. Вінниця: ВНАУ. 2020. 138 с.
3. Лазарєв В.С. Технічне обслуговування електричних машин і трансформаторів: навчальний посібник. – Київ: Аргумент Принт, 2010.
4. Рубаненко О.Є. "Діагностика і контроль електричних машин і апаратів". Київ: Ліра-К, 2007. - 320 с.
5. Рубаненко О.Є. "Системи безперебійного живлення електрообладнання промислових підприємств". Вінниця: ВНТУ, 2012. - 300 с.
6. Рубаненко О.Є., Білоус В.П., Серета М.І. "Якість електричної енергії: діагностика, підвищення та забезпечення сталості". Київ: НТУУ "КПІ", 2014. - 256 с.
7. Рубаненко О.Є., Панченко Ю.О., Чумаченко І.І. "Основи регулювання електроприводів". Вінниця: ВНТУ, 2006. - 196 с.
8. Рубаненко О.Є. "Технічне обслуговування електрообладнання та промислових роботів". Вінниця: ВНТУ, 2009. - 272 с.
9. Бурковський Ю.М., Косолапов С.М. Електричні машини: навчальний посібник. – Київ: Видавничий дім "Техніка", 2016.
10. Громова Л.І., Горбатюк І.П., Жилиєва О.М. Основи діагностики електричних машин: навчальний посібник. – Київ: Логос, 2015.
11. Гладун А.М., Меркулов В.А. Експлуатація електрообладнання промислових підприємств: підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Видавництво НТУУ «КПІ», 2012.
12. Чигаров А.І., Гончарук В.М., Рябошапка В.А. Електричні машини:

підручник для студентів вищих навчальних закладів. – Київ: Вища освіта, 2013.

13. Зінкевич М.Д. Експлуатація електроустаткування: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2016.

14. Романов Ю.І., Левченко А.В. Діагностика та ремонт електротехнічного обладнання: навчальний посібник. – Київ: Центр учбової літератури, 2013.

15. Терещук О.В. Технічне обслуговування електроенергетичного обладнання. - Київ: Вид-во ТОВ "Техніка", 2016.

16. Голуб О.В. Електротехніка. Підручник для вищих навчальних закладів. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2018.

17. Марусин В.Ф. Електричні машини. Конспект лекцій. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2015.

18. Макаров В.В. Трансформатори. Підручник. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2017.

19. Калашников С.Г. Діагностика електромеханічних систем. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2014.

20. Поляков С.О. Методика визначення технічного стану трансформаторів. - Київ: Вид-во ТОВ "Техніка", 2019.

21. Іванов О.І. Підвищення надійності роботи трансформаторів та електричних машин. - Київ: Вид-во ТОВ "Техніка", 2018.

22. Перельмутер А.В. Методика діагностики технічного стану електромашин. - Київ: Вид-во НТУУ "КПІ", 2013.

23. Шишов В.П. Електричні машини та апарати: навч. посіб. - Київ: Вид-во Центр учбової літератури, 2018.

24. Москаленко Ю.С. Основи технічного обслуговування та ремонту електричних машин. - Київ: Вид-во "Нова Книга", 2017.