МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

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

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

(МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2024**

Глєбова М. Л. Електричні машини (Машини змінного струму) : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / М. Л. Глєбова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024. – 76 с.

Автори:
канд. техн. наук, доц. М. Л. Глєбова,
канд. техн. наук, доц. О. Б. Єгоров,
канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент
О. М. Петренко, доктор технічних наук, професор кафедри електричного транспорту (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики і електротехніки, протокол № 13 від 20.06.2024.

© М. Л. Глєбова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун, 2024
© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2024

ЗМІСТ

ВСТУП.....4
РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ…….....5
1.1 Класифікація електричних машин……..…..…….....5
1.2 Номінальні дані електричних машин……..……..…….....8
1.3 Особливості конструкції електричних машин, що визначають умовами експлуатації…..……..... 9
РОЗДІЛ 2 АСИНХРОННІ МАШИНИ…….....….....21
2.1 Принцип дії та конструкція асинхронних машин..... 21
2.2 Зведений асинхронний двигун, його рівняння та схеми заміщення, векторна діаграма..... 25
2.3 Механічна характеристика, її залежність від напруги й активного опору в полі ротора..... 29
2.4 Енергетична діаграма, ККД і робочі характеристики асинхронного двигуна, колова діаграма..... 35
2.5 Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів із фазними та короткозамкненими роторами..... 39
2.6 Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів..... 40
РОЗДІЛ 3 СИНХРОННІ МАШИНИ.....42
3.1 Принцип дії та конструкція синхронних машин.....42
3.2 Реакція якоря за різного характеру навантаження синхронних генераторів……... 46
3.3 Рівняння синхронних машин.....48
3.4 Векторні діаграми та характеристики синхронних генераторів.....50
3.5 Втрати і ККД синхронних машин.....54
3.6 Кутові характеристики та електромагнітна потужність синхронних машин…… 56
3.7 Паралельна робота синхронних генераторів..... 60
3.8 Реактивна потужність, U-подібні характеристики.....64
3.9 Коливання синхронних генераторів..... 66
3.10 Пускові та робочі характеристики синхронних двигунів.....68
3.11 Синхронні компенсатори.....73
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....75

ВСТУП

Сучасна енергетика становить складну багаторівневу ієрархічну структуру, призначену забезпечити комфортні умови проживання населення, а також нормальне функціонування промислових підприємств, виробництв і закладів. Лише на основі надійної та ефективної системи забезпечення споживачів різного рівня потрібною енергією та енергетичними ресурсами можливі їхнє нормальне функціонування і розвиток. Політична та економічна незалежність і безпека держави багато в чому визначаються виробництвом енергетичних ресурсів, їхньою кількістю та якістю.

Різноманіття форм існування енергії, властивість їхнього взаємоперетворення дозволяє використовувати для виробництва і споживання енергії різні енерготехнології, енергоресурси та енергоносії, визначає їхню взаємозамінність. Енергетична цінність ресурсів, ефективність способів їхнього перетворення, ступінь досконалості процесів і установок, технологічних стадій енергетичного виробництва інтегрально визначається ефективністю використання первинних енергоресурсу (коефіцієнтом корисної дії енергоустановки).

Енергетика – галузь народного господарства, що охоплює виробництво, перетворення і використання різних форм енергії. В енергетиці використовують такі основні п’ять видів установок або систем:

– генеруючи – перетворюють потенційну або хімічну енергію природних енергетичних ресурсів на електричну, теплову, механічну або інший вид енергетичного ресурсу (наприклад, турбоустановки, газогенерувальні установки, котли, компресори);

– перетворювальні – змінюють параметри та інші особливості певного виду енергії (трансформаторні підстанції, інверторні електроустановки, трансформатори теплоти та ін.);

– мережі – призначені для передачі і розподілу енергії (електричні, теплові, газові, нафтопроводи, мережі стиснутого повітря та ін.);

– акумулювальні – призначені для часткового регулювання режиму виробництва енергії (електричні і теплові акумулятори, насосно-акумулювальні гідростанції тощо);

– споживальні – призначені для перетворення енергії до вигляду, у якому її безпосередньо використовують (електричний привід машин, опалювальні установки, промислові печі, світильники та ін.).

Цей лекційний курс присвячений сучасним технологіям виробництва електроенергії на цьому етапі розвитку енергетики, обов’язковою складовою реалізації яких є названі вище енергоустановки і, відповідно, теоретичні та практичні питання, пов’язані з їхнім створенням та експлуатацією.

РОЗДІЛ 1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

1.1 Класифікація електричних машин

Класифікація за призначенням. Електричні машини за призначенням підрозділяють на такі види:

– електромашинні генератори, які перетворюють механічну енергію в електричну. Їх встановлюють на електричних станціях та різних транспортних установках: автомобілях, літаках, тепловозах, кораблях, пересувних електростанціях тощо. На електростанціях вони приводяться в обертання за допомогою потужних парових і гідравлічних турбін, а на транспортних установках – від двигунів внутрішнього згоряння та газових турбін. У низці випадків генератори використовують як джерела живлення в установках зв'язку, пристроях автоматики, вимірювальної техніки тощо;

– електричні двигуни, що перетворюють електричну енергію в механічну; вони приводять в обертання різні машини, механізми і пристрої, що застосовуються в промисловості, сільському господарстві, зв'язку, на транспорті, у військовій справі та в побуті. У сучасних системах автоматичного керування їх використовують як виконавчі, регулювальні і програмувальні органи;

– електромашинні перетворювачі, що перетворюють змінний струм в постійний і, навпаки, змінюють величину напруги змінного і постійного струму, частоту, число фаз та ін. Їх широко використовують у промисловості, на транспорті та у військовій справі, хоча в останнє десятиліття роль електромашинних перетворювачів суттєво зменшилася внаслідок застосування статичних напівпровідникових перетворювачів;

– електромашинні компенсатори, які здійснюють генерування реактивної потужності в електричних установках для поліпшення енергетичних показників джерел і приймачів електричної енергії;

– електромашинні підсилювачі, що використовуються для управління об'єктами великої потужності за допомогою електричних сигналів малої потужності, що подаються на їхні обмотки збудження (управління). Роль електромашинних підсилювачів останнім часом також зменшилася через широке застосування підсилювачів, виконаних на напівпровідникових елементах (транзисторах, тиристорах);

– електромеханічні перетворювачі сигналів, генерують, перетворюють і підсилюють різні сигнали. Їх виконують зазвичай у вигляді електричних мікромашин і широко використовують у системах автоматичного регулювання, вимірювальних і лічильно-обчислювальних пристроях як різні датчики,

диференційних і інтегрувальних елементів, порівнювальних і регулювальних органів тощо.

Класифікація за родом струму та принципом дії. Електричні машини за родом струму поділяють на машини змінного та постійного струму. Машини змінного струму залежно від принципу дії й особливостей електромагнітної системи підрозділяють на трансформатори, асинхронні, синхронні і колекторні машини.

Трансформатори широко застосовують для перетворення напруги: у системах передачі та розподілу електричної енергії, у випрямних установках, пристроїв зв'язку, автоматики і обчислювальної техніки, а також при електричних вимірюваннях (вимірювальні трансформатори) і функціональних перетвореннях (обертові трансформатори).

Асинхронні машини використовують переважно як електричні двигуни трифазного струму. Простота пристрою і висока надійність дозволяють застосовувати їх у різних галузях техніки для привода верстатів, вантажопідйомних і землерийних машин, компресорів, вентиляторів та інші. У системах автоматичного регулювання широко використовують одно- та двофазні керовані асинхронні двигуни асинхронні тахогенератори, а також сельсини.

Синхронні машини застосовують як генератори змінного струму промислової частоти на електричних станціях і генератори підвищеної частоти в автономних джерелах живлення (на кораблях, літаках тощо). В електричних пристроях великої потужності застосовують також синхронні електродвигуни. У пристроях автоматики широко використовують різні синхронні машини малої потужності (реактивні, з постійними магнітами, гістерезисні, крокові, індукторні тощо).

Колекторні машини змінного струму використовують порівняно рідко і здебільшого як електродвигуни. Вони мають складну конструкцію і вимагають ретельного догляду. У пристроях автоматики, а також у різного роду електропобутових приладах застосовують універсальні колекторні двигуни, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі.

Машини постійного струму застосовують як генератори і електродвигуни в пристроях електроприводу, що вимагають регулювання частоти обертання в широких межах: залізничний та морський транспорт, прокатні стани, електротрансмісії великовантажних автомобілів, вантажопідйомні та землерийні машини, складні металообробні верстати та ін., а також у тих випадках, коли джерелом електричної енергії для живлення електродвигунів слугують акумуляторні батареї (стартери двигуни, двигуни підводних човнів, космічних кораблів тощо).

Генератори постійного струму часто застосовують для живлення пристроїв зв’язку, зарядки акумуляторних батарей, як основні джерела живлення на транспортних установках (автомобілях, літаках, тепловозах, пасажирських вагонах). Проте останнім часом генератори постійного струму замінюються генераторами змінного струму, що працюють спільно з напівпровідниковими випрямлячами.

У системах автоматичного регулювання машини постійного струму широко використовують як електромашинні підсилювачі, виконавчі двигуни і тахогенератори.

Залежно від призначення електричні мікромашини автоматичних пристроїв підрозділяються на такі групи:

– силові мікродвигуни, що приводять в обертання різні механізми автоматичних пристроїв, самописних приладів тощо;

– керовані (виконавчі) двигуни, що перетворюють підведений до них електричний сигнал у механічне переміщення вала, тобто відпрацьовують певні команди; тахогенератори, перетворюють механічне обертання вала в електричний сигнал – напруга, пропорційна частоті обертання вала;

– обертові трансформатори, що дають на виході напругу, пропорційну тій чи іншій функції кута повороту ротора, наприклад пазухи або косинусу цього кута або самому кутку;

– машини синхронного зв’язку (сельсини, магнесини), здійснюють синхронне і синфазне повертання або обертання декількох механічно не пов’язаних між собою осей;

– мікромашини гіроскопічних приладів (гіроскопічні двигуни, датчики кута, датчики моменту), що здійснюють обертання роторів гіроскопів з високою частотою і корекцію їхнього положення;

– електромашинні перетворювачі і підсилювачі.

Електричні мікромашини перших двох груп часто називають силовими, а третьої – п’ятої груп – інформаційними.

Класифікація за потужністю. Електричні машини по потужності умовно поділяють на мікромашини, машини малої, середньої та великої потужності.

Мікромашини мають потужність від часток вата до 500 Вт. Ці машини працюють як на постійному, так і на змінному струмі нормальної і підвищеної (400–2 000 Гц) частоти.

Машини малої потужності – від 0,5 кВт до 10 кВт. Вони працюють як на постійному, так і на змінному струмі нормальної або підвищеної частоти.

Машини середньої потужності – від 10 кВт до декількох сотень кіловат.

Машини великої потужності – понад кілька сотень кіловат. Машини великої і середньої потужності зазвичай призначені для роботи на постійному або змінному струмі нормальної частоти.

Класифікація за частотою обертання. Електричні машини за частотою обертання умовно поділяють на: тихохідні – з частотами обертання 300 об/хв; середньої швидкохідності – 300–1 500 об/хв; швидкохідні – 1 500–6 000 об/хв; надшвидкохідні – понад 6 000 об/хв. Мікромашини виконують для частот обертання від декількох оборотів у хвилину до 60 000 об/хв; машини великої і середньої потужності – зазвичай до 3 000 об/хв.

1.2 Номінальні дані електричних машин

Кожна електрична машина має паспортну табличку, вибиту на металевій пластині і прикріплену до корпусу. У цій табличці вказано тип машини і її номінальні дані, що характеризують основні енергетичні показники і умови роботи, на які вона розрахована. До номінальних даних належать: потужність, напруга, струм, частота обертання, частота змінного струму, коефіцієнт корисної дії (ККД), число фаз, коефіцієнт потужності і режим роботи (тривалий, короткочасний і т. п.). Крім того, у табличці наведені такі дані: завод-виготовлювач, рік випуску, клас ізоляції, а також додаткові дані, необхідні для монтажу і експлуатації машини (маса, схема включення обмоток та ін.). Термін «номінальний» можна застосовувати і до величин, що не наведені в табличці, але належать до її номінальному режиму, наприклад номінальний обертальний момент, номінальне ковзання та ін.

Номінальною потужністю електричної машини називають потужність, на яку розрахована ця машина за умовами нагрівання та безаварійної роботи протягом встановленого терміну експлуатації. Для електричних двигунів під номінальною потужністю розуміють корисну механічну потужність на валу, виражену у ватах або кіловатах; для генераторів постійного струму – корисну електричну потужність на затискачах машини (у ватах або кіловатах); для генераторів змінного струму – повну електричну потужність на затискачах (у вольт-амперах або кіловольт-амперах). Номінальні потужності всіх видів електричних машин і трансформаторів стандартизовані; точно так само стандартизовані номінальні частоти обертання електричних машин.

Електричні машини можуть працювати і при неномінальних умовах (зменшена або збільшена потужність, напруга та струм, відмінні від номінальних тощо). Однак під час роботи в цих умовах енергетичні показники машини відрізняються від паспортних даних. Зазвичай при навантаженнях, менших номінального, ККД і коефіцієнт потужності машини менше номінальних. При навантаженнях, більших за номінальне, з’являється небезпека надмірного підвищення температури частин електричної машини, насамперед її обмоток, що може призвести до передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток і, отже, всієї машини. Максимально допустима температура обмотки залежить від властивостей застосовуваної ізоляції (класу) і терміну

експлуатації машини та становить від 105 °С до 180 °С. Гранично допустимі температури різних частин обмоток регламентуються за стандартами, що мають силу законів.

До стандартів на електричні машини і трансформатори включаються також інші нормативні матеріали, що здебільшого визначають допустимі короткочасні перевантаження та методи випробування машини і окремих її частин, а також основні умови експлуатації машини цього типу. Матеріали, що включаються в стандарти, перевірені багаторічною практикою виробництва та експлуатації, тобто мають статистичне обґрунтування.

Електричні машини є оборотними, тобто вони можуть працювати і в генераторному, і в руховому режимі. Точно так само в електромашинні перетворювачі і трансформаторі напрям перетворення електричної енергії може бути змінено на протилежний. Однак машини, що випускаються електропромисловістю, зазвичай призначаються для кращої роботи в якомусь одному режимі. Це дозволяє краще пристосувати машину до вимог експлуатації, не роблячи її надмірно важкою і дорогою.

Електричні машини випускають на стандартні напруги, узгоджені зі стандартними напругами електричних мереж. Стандартні напруги генераторів приблизно на 5–10 % вище, ніж у двигунів; наприклад, якщо стандартна напруга двигуна 220 В, то стандартна напруга генератора – 230 В і т. п. Різниця в стандартних напругах двигунів і генераторів обумовлена втратами напруги в електричних мережах, до яких підключено генератори і двигуни. У трансформаторах стандартні напруги на первинних обмотках приймаються рівними «руховим», а на вторинних обмотках – «генераторним».

Машини змінного струму призначені зазвичай для роботи з синусоїдальною напругою, симетричною по фазах. Неминучі відхилення від цих умов регламентуються стандартами. Наприклад, тривалі відхилення по значенню напруги в мережі, що живить силове обладнання, не повинні перевищувати -5 % та +10 % ; коефіцієнт спотворення синусоїдальної кривої повинен бути не більше 5 % і т. п. Машини, що працюють спільно з вентильними перетворювачами, зазвичай мають не синусоїдну напругу і струм, що викликає в них додаткові втрати енергії і підвищує температуру обмоток і магнітопроводу машини. Режими роботи таких машин регламентуються спеціальними технічними умовами.

1.3 Особливості конструкції електричних машин, що визначають умовами експлуатації

Захист від зовнішніх впливів. Конструктивне виконання електричної машини багато в чому визначають вимоги, що висуваються до захисту її від зовнішніх впливів. Залежно від цього стандарт встановлює

буквено-цифрове позначення виконані електричних машин, що складається з двох букв IP (International Protection) і двох цифр. Перша цифра (від 0 до 6) характеризує ступінь захисту обслуговуючого персоналу від зіткнення з струмопровідними й обертовими частинами машини і від потрапляння всередину її твердих сторонніх предметів. Друга цифра (від 0 до 8) характеризує ступінь захисту машини від проникнення в неї вологи.

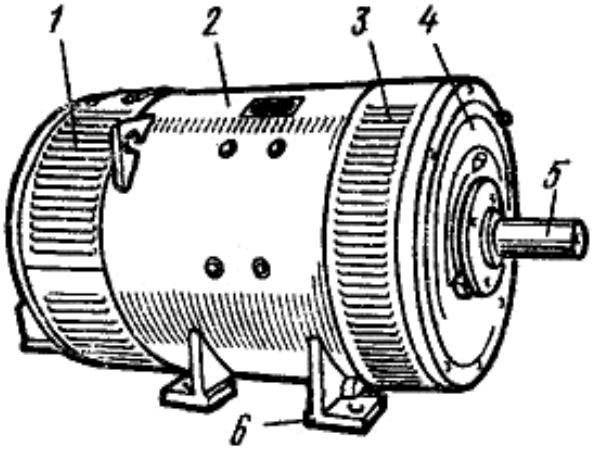


Рисунок 1.1 – Двигун постійного струму захищеного виконання (ступінь захисту IP22):
1, 3 – вентиляційні вікна для входу і виходу охолоджуючого повітря; 2 – станина; 4 – підшипниковий щит; 5 – вал; 6 – лапи

Розрізняють такі види виконання електричних машин: відкрите, захищене, краплезахищене, бризкозахищене, водозахищене, пилозахищене, закрите, герметичне, вибухозахищене.

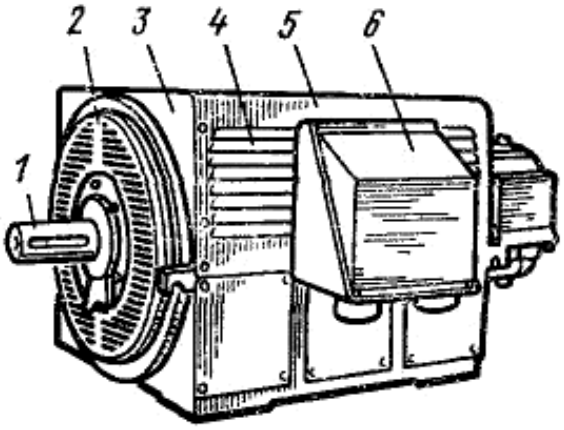


Рисунок 1.2 – Асинхронний двигун у краплезахищеному виконанні (ступінь захисту IP23):
1 – вал; 2,4 – вентиляційні вікна для входу і виходу охолоджуючого повітря; 3 – підшипниковий щит; 5 – станина; 6 – коробка з виводами

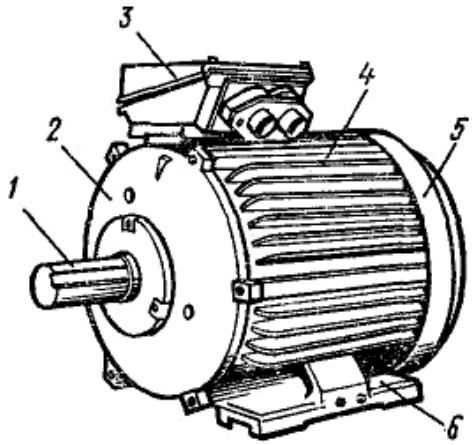


Рисунок 1.3 – Асинхронний двигун закритого виконання
(ступінь захисту IP44):
1 – вал; 2, 5 – підшипникові щити; 3 – коробка з виводами;
4 – охолоджуючі ребра станини; 6 – лапи

Відкрите (IP00) – машина не має спеціальних пристосувань, що оберігають від попадання всередину сторонніх предметів і випадкового дотику обслуговуючого персоналу з струмопровідними й обертовими частинами; машини відкритого виконання зустрічаються зрідка і лише в застарілих конструкціях.

Захищене (IP21–IP22 та ін.) – машини мають спеціальні пристосування, виконані, наприклад, у вигляді відповідних кришок, кожухів, сіток (рис. 1.1). При цьому між кришками і щитами або станиною машини залишають щілини, необхідні для циркуляції повітря, охолоджуючого машину. Такі машини можуть встановлюватися тільки в закритих приміщеннях, оскільки вони не мають пристосувань, що захищають від дощу.

Бризкозахищене і краплезахищене (IP23–IP24 та ін.) – машини обладнані пристосуваннями, що захищають їх від проникнення до струмопровідних і обертових частин крапель води або бризок (рис. 1.2). У цих машинах всі отвори, розташовані у верхній частині корпусу і підшипникових щитів, закривають глухими кришками; отвори, розташовані збоку, зазвичай захищають кожухами, кришками і жалюзі, а розташовані знизу – сітками. Такі машини можуть встановлюватися на відкритому повітрі.

Водозахищене (IP55–IP56) – машини недоступні проникненню всередину струменів води будь-якого напрямку (також знизу). У них передбачені посилені ущільнення гумовими прокладками і сальниками. Вода, що випадково потрапила в машину, витікає з неї або віддаляється охолоджуючим повітрям. Подібні машини застосовують переважно на суднових установках.

Пилозахищене (IP65–IP66) – машини захищені від попадання всередину пилу в небезпечних для нормальної роботи кількостях.

Закрите (IP44–IP54) – внутрішній простір машини ізольовано від зовнішнього середовища (рис. 1.3). Такі машини застосовують для роботи в запилених приміщеннях, на рухомих транспортних засобах (автомобілях, залізничних вагонах, локомотивах), в авіації та ін. До закритого виконання відносять також машини з охолодженням по замкнутому циклу (повітрям, воднем і ін.).

Герметичне (IP67–IP68) – машини виконують з особливо щільною ізоляцією від навколишнього середовища, що запобігає сполученню її з внутрішнім простором за певної різниці тисків зовні і всередині машини. Такі машини можуть працювати під водою (водонепроникні машини), у наповнених газом камерах (газонепроникні) і в інших подібних середовищах.

Є також виконання машин, призначених для роботи в особливих умовах:

– *вибухозахищене (вибухобезпечне)* – машини можуть працювати у вибухо- й пожежонебезпечному середовищі, оскільки ізоляція їхніх струмопровідних і обертових частин від зовнішнього середовища виключає виникнення вибуху і займання газів у навколишньому просторі при іскрінні та інших ненормальних явищах. Під час вибуху всередині машини накопичених газів виникле полум’я не може проникнути в навколишнє середовище;

– *вологостійке* – для роботи в умовах великої вологості;

– *морозостійке* – для роботи за особливо низьких температур і при можливому утворенні інею;

– *хімічностійке* – для роботи в умовах наявності парів агресивних хімічних речовин і при впливі хімічних реагентів;

– *тропікостійке* – для роботи в тропічних умовах за можливого утворення цвілевих грибів.

Кліматичні умови і умови розміщення. Під час експлуатації електричних машин в нормальних кліматичних умовах температура навколишнього середовища становить (25±10) °С, відносна вологість повітря 35–80 % і атмосферний тиск 84–106 кПа. Залежно від макрокліматичних умов стандарт передбачає різні їхні кліматичні виконання, яким присвоюються певні позначення. Електричні двигуни, призначені для експлуатації на суші, ріках і озерах у макрокліматичних районах з помірним кліматом, мають позначення – У; з холодним – Хл; з вологим тропічним – ТВ; з сухим тропічним – ТЗ; з сухим і з вологим тропічним – Т; для всіх макрокліматичних районів на суші (загальнокліматичне виконання) – О. Двигуни, призначені для установки на морських суднах в макрокліматичних районах з помірно-холодним морським кліматом, мають позначення М, з тропічним

морським – ТМ; для необмеженого району плавання – ОМ; двигуни, призначені для всіх макрокліматичних районів на суші і на морі, – В.

Залежно від умов розміщення ДОСТ (ДСТУ) передбачає різні виконання електричних двигунів, яким також присвоюються певні позначення. Двигуни, які можуть експлуатуватися на відкритому повітрі, мають позначення 1; в закритому приміщенні, де температура і вологість повітря несуттєво відрізняються від зовнішнього повітря, – 2; в закритих приміщеннях, в яких коливання температури і вологості, а також вплив піску та пилу на машину істотно менше, ніж на відкритому повітрі, – 3; в приміщеннях з штучно регульованими кліматичними умовами (наприклад, у закритих опалювальних приміщеннях) – 4; в приміщеннях з підвищеною вологістю (наприклад, в неопалюваних і не вентильованих підземних приміщеннях) – 5. Наприклад, двигуни, які можуть працювати в районах з холодним кліматом при установці на відкритому повітрі, мають позначення ХЛ1; в районах з помірним кліматом в закритих приміщеннях – У3 або У4.

Залежно від кліматичного виконання машини та умов її розміщення відповідно змінюють конструкцію її корпусу, застосовують різні ущільнення, підсилюють ізоляцію обмоток і здійснюють інші конструктивні заходи, що забезпечують нормальну експлуатацію машини протягом встановленого терміну.

Спосіб охолодження. Для запобігання надмірного нагріву частин машини (теплота, що виділяється в ній, залежить від значення втрат потужності) застосовують різні способи охолодження електричних машин. Спосіб охолоджування залежить від виду виконання машини і її потужності. При підвищенні потужності електричної машини потрібно збільшувати інтенсивність її охолодження.

Електричні мікромашини зазвичай не мають штучного охолодження. Відведення теплоти від нагрітих частин (обмоток, ротора, статора, колектора) здійснюється у них шляхом природної тепловіддачі довкіллю (машини з природним охолоджуванням).

Обертові електричні машини малої, середньої та великої потужності виконують зі штучним охолодженням. У цих машинах за допомогою спеціальних пристосувань досягається збільшення швидкості руху охолоджуючого середовища. Для більшості електричних машин охолоджуючим середовищем слугує повітря, але іноді для цієї мети застосовують водень. Такі машини називають вентильованими. Вентильовані машини, у яких охолоджуюче повітря чи інший газ проходить через внутрішній простір машини, називають непродувними; якщо ж вони обдувають тільки зовнішню поверхню машини – обдувними.

Позначення способу охолодження складається з букв IC (International Cooling) і двох цифр: перша (від 0 до 6) умовно позначає пристрій ланцюга для циркуляції холодоагенту, друга (від 0 до 7) – спосіб його переміщення.

Обертові електричні машини малої та середньої потужності зазвичай виконують з самовентиляцією. У цьому випадку охолодження нагрітих частин здійснюється вентилятором, який насаджують на вал ротора. У деяких машинах вентиляторами є вентиляційні лопаті або інші пристосування, що прибудовують до торцевої частини сердечника ротора.

Машини закритого виконання зазвичай виконують обдувними (рис. 1.4, а). У таких машинах вентилятор обдуває зовнішню поверхню корпусу, сприяючи більш інтенсивному відведенню від нього теплоти (IC01).

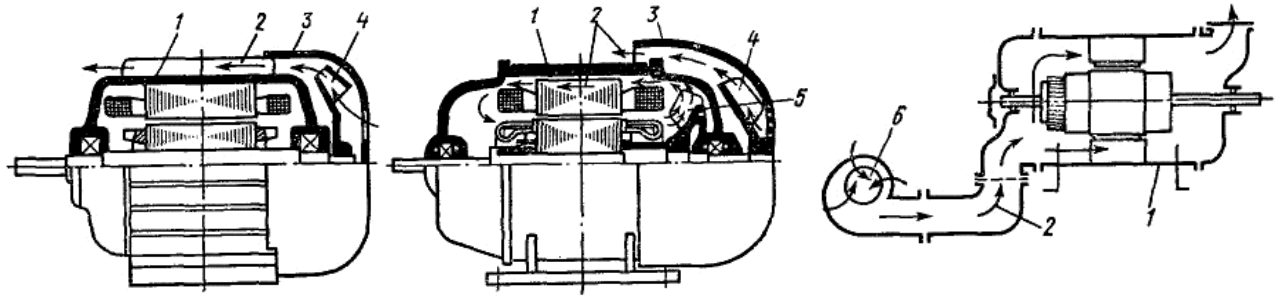


Рисунок 1.4 – Способи вентиляції закритих електричних машин:
1 – корпус машини; 2 – потоки охолоджуючого повітря;
3 – кожух; 4 – зовнішній вентилятор; 5 – внутрішній вентилятор;
6 – допоміжний вентилятор

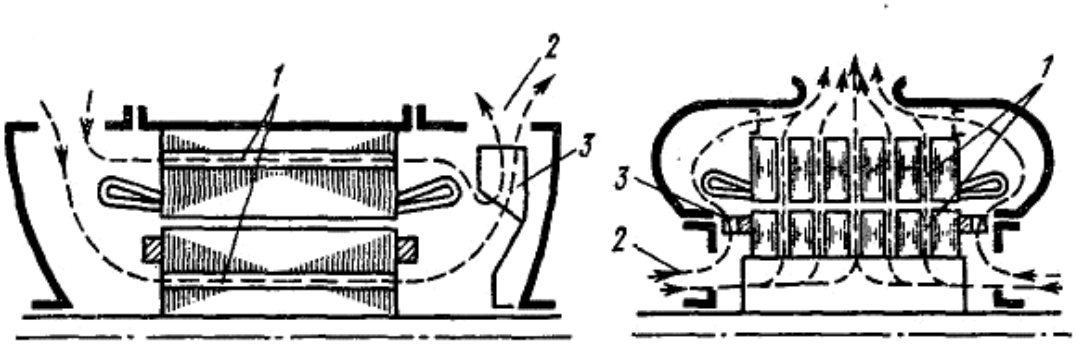
Для збільшення поверхні охолодження станини закритих машин зазвичай постачають зовнішніми охолоджуючими ребрами. Іноді на валу ротора встановлюють також внутрішній вентилятор (рис. 1.4, б), що забезпечує додаткову циркуляцію повітря усередині машини і посилення інтенсивності теплообміну між її закритими частинами та станиною. У закритих машинах великої потужності часто застосовують незалежну вентиляцію, за якої охолоджуюче повітря проходить через машину допоміжним вентилятором (рис. 1.4, в), що приводився в обертання окремим електродвигуном (IC17). В електричних машинах, вживаних в авіації, замість вентилятора для продувки охолоджуючого повітря через машину використовується аеродинамічний напір, що виникає під час руху літака.

У машинах відкритого, захищеного, а також бризко-, крапле- і водозахищеного виконань охолоджуюче повітря зазвичай проганяється вентилятором навколо обмоток і по вентиляційних каналах, наявними в статорі, роторі і колекторі.

Система вентиляції може бути осьовою і радіальною. У разі осьової системи (рис. 1.5, а) охолоджуюче повітря проходить через машину в напрямку осі вала, у разі радіальної (рис. 1.5, б) – у радіальному напрямку. Залежно від місця установки вентилятора осьова система вентиляції може бути витяжною або нагнітальною. За витяжної системи (рис. 1.6, а) вентилятор встановлюють у місці виходу повітряного потоку з машини; за нагнітальної (рис. 1.6, б) – у місці входу його в машину.

У деяких випадках застосовують комбіновану радіально-осьову систему вентиляції.

Як охолоджуючий агент у машинах великої потужності іноді застосовують водень. Використання водню дозволяє зменшити втрати потужності, викликані тертям між частинами машини і потоком охолоджуючого газу, і поліпшити відведення теплоти, оскільки водень має меншу щільність і більшу теплопровідність, ніж повітря. У машинах, в яких потрібно забезпечити високу інтенсивність охолодження, застосовують рідинне охолодження, використовуючи для цієї мети трансформаторне масло, дистильовану воду, газ і т. п.



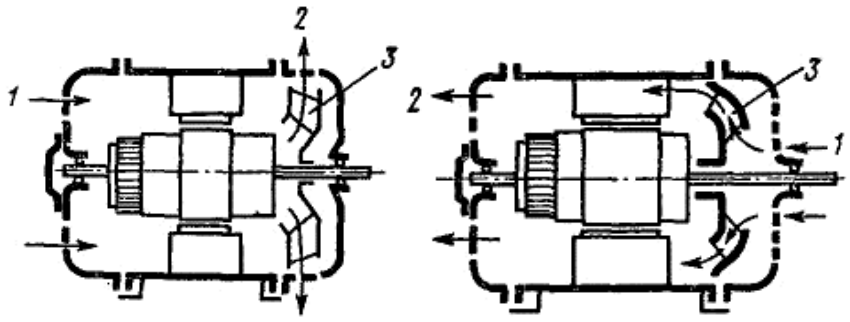
а б

Рисунок 1.5 – Осьова і радіальна системи вентиляції відкритих і захищених електричних машин:
1 – вентиляційні канали; 2 – потоки охолоджуючого повітря; 3 – вентилятор

У машинах з рідинним охолодженням охолоджуючу рідину (трансформаторне масло, дистильовану воду) зазвичай пропускають безпосередньо через порожнисті провідники, обмотки ротора і статора або за спеціально охолоджуючими каналами, виконаними у вигляді вбудованих в обмотку тонкостінних коробок з немагнітного матеріалу. Якщо охолодження здійснюють завдяки випаровуванню рідини, то систему охолодження називають випарниковою. В одній машині можуть бути застосовані одночасно кілька охолоджуючих агентів, наприклад водневе охолодження ротора і водяне охолодження статора.

Електричні машини великої потужності зазвичай мають замкнуту систему вентиляції з охолоджуванням нагрітого повітря, водню, води або масла в спеціальних теплообмінниках (охолоджувачах), охолоджуваних водою або повітрям. Іноді охолоджувач вбудовують безпосередньо в машину.

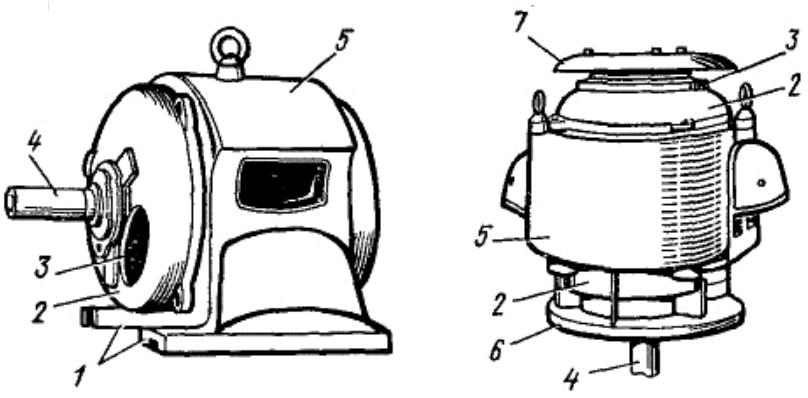
У трансформаторах необхідна інтенсивність охолодження також залежить від потужності. Трансформатори малої потужності виконують з природним повітряним охолодженням; їх називають сухими трансформаторами. Трансформатори середньої та великої потужності мають зазвичай рідинне охолодження, за якого сердечник і обмотки поміщають в бак, заповнений трансформаторним маслом або негорючим рідким діелектриком.



а б

Рисунок 1.6 – Витяжна й нагнітальна системи вентиляції:
1 – вхідне повітря; 2 – виходить повітря; 3 – вентилятор

Установка і кріплення. Для установки і кріплення машини в її конструкції передбачають лапи на станині (рис. 1.7, а) і фланці на підшипниковому щиті або на станині (рис. 1.7, б).



а б

Рисунок 1.7 – Загальний вигляд електричних машин:
а – з кріпленням за допомогою лап; б – з фланцевим кріпленням і вертикальним розташуванням вала; 1– лапи для кріплення; 2 – підшипниковий щит; 3 – вентиляційні вікна для входу охолоджуючого повітря; 4 – вал; 5 – станина; 6 – фланець; 7 – кришка

Залежно від способу установки і кріплення, напрями осі вала і конструкції підшипникових вузлів, електричні машини, відповідно до стандарту РЕВ, поділяють на дев'ять конструктивних груп. Кожна з них поділяється на види, що складаються з декількох форм виконання. Всім їм присвоєні відповідні позначення, які містять літери ІМ (International Mountning) і чотири цифри: перша визначає конструктивну групу, друга і третя – спосіб монтажу, четверта (від 0 до 8) – форму кінця валу.

Є такі конструктивні групи: ІМ1 – машина на лапах з підшипниковими щитами; ІМ2 – на лапах з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті; ІМ3 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті; ІМ4 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на станині; ІМ5 – без підшипників; ІМ6 – з підшипниковими щитами і стояковими підшипниками; ІМ7 – зі стояковими підшипниками (без щитів); ІМ8 – з вертикальним валом (що не охоплюються групами ІМ1–ІМ4); ІМ9 – спеціальне виконання. У таблиці 1.1 наведені деякі приклади конструктивних форм виконання електричних машин.

Кінці валів електричних машин мають стандартні розміри. Стандарти встановлюють строго фіксовані висоти осей обертання електричних машин, а також конструкції і розміри місць кріплення.

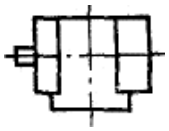
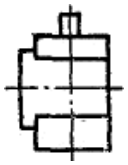
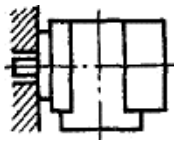
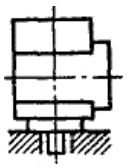
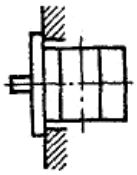
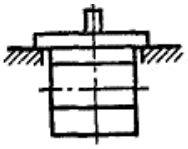
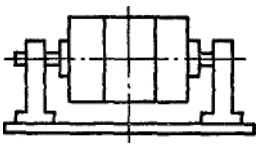
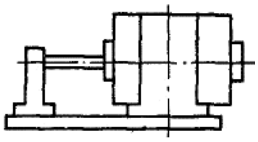
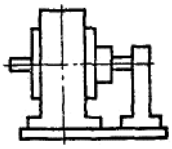
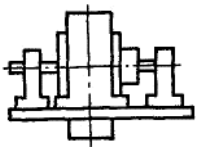
Віброакустичні умови. Під час проєктування і виготовлення електричних машин у багатьох випадках застосовують спеціальні конструктивні заходи для зменшення шуму.

В електричних машинах шуми виникають із механічних, вентиляційних і магнітних причин.

Механічні шуми виникають через вібрації окремих частин машини внаслідок неточного балансування ротора, тертя щіток об колектор, тертя в підшипниках і ін. Для зниження механічного шуму здійснюють точне динамічне балансування ротора, збільшують жорсткість вала, застосовують високоякісні підшипники, ретельно притирають щітки, підвищують жорсткість щіткотримачів і виконують колектор зі строго циліндричної і гладкою поверхнями.

Вентиляційні шуми обумовлені коливаннями тиску повітряного потоку, що охолоджує машину, і вихорами на окремих ділянках системи охолодження. Зниження вентиляційного шуму досягається раціональною конструкцією вентилятора і всієї системи охолодження, підвищенням жорсткості вентилятора, ретельним його балансуванням і встановленням достатньо великого зазору між вентилятором і підшипниковим щитом.

Таблиця 1.1 – Конструктивні форми виконання електричних машин

Вид машини	**Форми виконання**	
На лапах з підшипниковими щитами (група IM1)	*IMI001* 	*1M1031* 
На лапах з двома підшипниковими щитами з фланцем на підшипниковому щиті (група IM2)	*1M2101* 	*IM2111* 
Без лап з підшипниковими щитами з фланцем на одному підшипниковому щиті (група IM3)	*IM3I01* 	*M3131* 
На лапах з підшипниковими щитами і стояковими підшипниками (група IM6)	*IM6010* 	*IM681I* 
На лапах зі стояковими підшипниками (без підшипникових щитів) (група IM7)	*IM7011* 	*IM7311* 

Магнітні шуми з’являються через вібрацію окремих частин магнітної системи електричної машини під дією змінних електромагнітних сил, що виникають у результаті зміни магнітної провідності повітряного зазору при обертанні зубчастого якоря, явища магнітострикції, а в машинах змінного струму і трансформаторах – внаслідок періодичного перемагнічування сталі.

Зменшення шуму досягається раціональним вибором кількості зубців ротора і статора, створенням ексцентричного повітряного зазору (в машинах постійного струму), скосом зубців ротора, застосуванням напівзакритих пазів та ін.

Допустимі рівні шуму електричних машин строго нормовані. Для оцінки шуму прийнятий середній (для декількох точок) рівень звуку А, виміряний на

відстані d = 1 м від контуру машини (позначається Ld1A), а для деяких машин спеціального виконання – також і середній рівень звуку А, виміряний на опорному радіусі 3 м (позначається LA3).

Рівень звуку (дб) визначається відношенням

$$A = 20 \bullet lg(p/p_0),$$

де p – звуковий тиск у цій точці. Па, $p_0 = 2 \times 10^{-5}$ Па – звуковий тиск, відповідний порогу чутності.

Залежно від вимог, що висуваються до рівня шуму, електричні машини поділяють на такі класи: 0; 1; 2; 3; 4. Наприклад, для машин класу 1 рівень звуку L_{d1A} в режимі холостого ходу не повинен перевищувати 64–109 дБ, а рівень звуку L_{A3} – не повинен перевищувати 55–104 дБ.

До класу 0 відносять машини, що працюють у короткочасному і повторно-короткочасному режимах, з примусовою вентиляцією від стороннього вентилятора, полегшеною масою, багатополюсні з кількістю полюсів більше 12, деякі типи однофазних та індукторних генераторів, зварювальні генератори і перетворювачі, багатошвидкісні асинхронні двигуни, двигуни з підвищеним пусковим моментом і підвищеним ковзанням та ін.; до класу 1 – машини постійного струму, асинхронні, синхронні і колекторні машини нормального виконання; до класу 2 – машини з малошумними підшипниками, зі спеціальними малошумними вентиляторами і т. п.; до класу 3 – машини зі зниженим використанням активних матеріалів, закриті, з глушниками вентиляційного шуму; до класу 4 – машини з звукоізолювальним кожухом або іншими спеціальними конструктивними вузлами, що забезпечують зниження шуму.

Зниження радіоперешкод. Колекторні машини постійного і змінного струму є інтенсивними джерелами радіоперешкод. Іскріння, що виникає в цих машинах під щітками, створює імпульсні коливання струму і напруги, що мають безперервний частотний спектр. У результаті цього утворюються перешкоди радіоприйому у вигляді різкого тріску або безперервного шуму у всьому діапазоні частот, прийнятих для радіозв’язку.

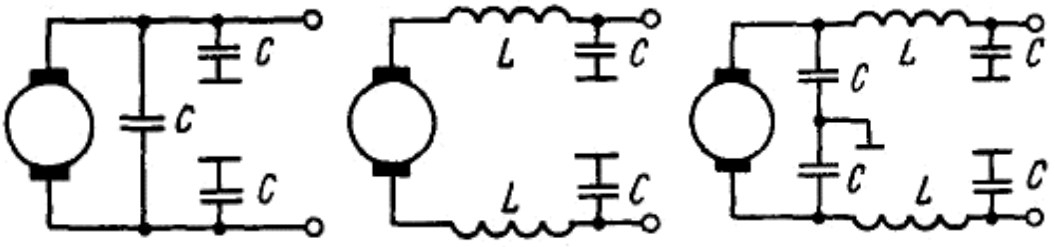


Рисунок 1.8 – Схеми перешкодоподавлювальних фільтрів

Рівень перешкод, поширюваних по дротах і кабелях, приєднаних до електричної машині, визначають за виміряним на затискачах машини напрузі (у мікровольтах). Рівень перешкод, випромінюваних машиною в навколишній простір, визначають за максимальною напругою (у мікровольтах), яку вимірюють на однометрову штирову антену, встановлену на певній відстані від машини; цю величину називають рівнем поля. Зменшення радіоперешкод досягають шляхом зниження ступеня іскріння, екранування самої машини, під'єднувальних проводів і застосування перешкодоподавлювальних фільтрів, що перешкоджають поширенню високочастотних коливань по проводах мережі, до якої приєднана машина. Найпростішими перешкодоподавлювальними фільтрами є ємнісні, що становлять конденсатори С, включаються між струмопровідними затискачами, а також між цими затискачами і корпусом машини (рис. 1.8, а). Найефективнішими є прохідні конденсатори, у яких один вивідний кінець приєднують до корпусу, а інший проходить всередині конденсатора і є струмоведучим провідником, що приєднується до вихідних затискачів машини. У низці випадків застосовують більш складні фільтри – Г-подібний (рис. 1.8, б) і П-подібний (рис. 1.8, в), що складаються з індуктивності L і ємності С. Такі фільтри пропускають в зовнішній ланцюг як постійну складову струму і сильно послаблюють гармонійні складові, що створюють радіоперешкоди. Ємність перешкодоподавлювального конденсатора зазвичай підбирають дослідним шляхом; вона становить 0,1–1 мкФ, а індуктивність дроселя фільтра – 50–500 мкГн.

РОЗДІЛ 2 АСИНХРОННІ МАШИНИ

2.1 Принцип дії та конструкція асинхронних машин

Принцип дії асинхронного двигуна, оснований на взаємодії струму з магнітним полем, може бути поясненим за допомогою макета, який складається з електропровідного диску та підковоподібного магніту (рис. 2.1).

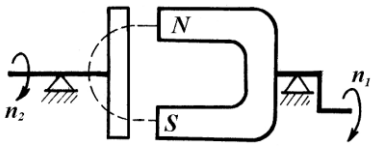


Рисунок 2.1 – Макет асинхронного двигуна

Диск і магніт закріплені так, що можуть вільно обертатись. Якщо обертати підковоподібний магніт з частотою обертання n_1, то його поле, перетинаючи електропровідний диск, індукує в ньому ЕРС та струм. Взаємодія струму з полем приведе до появи електромагнітних сил (рис. 2.2), які будуть обертати диск в тому ж напрямі, в якому обертається магніт, але з меншою частотою обертання n_2. Дійсно, як тільки частота обертання n_2 стає з якоїсь причини рівною n_1, – диск обертається синхронно з магнітом, магнітне поле перестає індукувати в диску ЕРС і струми (отже, зникають електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1.

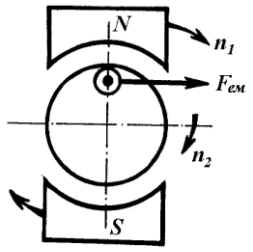


Рисунок 2.2 – До визначення напряму обертання асинхронного двигуна

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначають напрям ЕРС і, відповідно, струму) та лівої (напрям електромагнітної сили $F_{ем}$) руки. Водночас варто пам’ятати, що відносно магнітного поля рух провідника зворотній: так на (рис. 2.2) магнітне поле обертається за годинниковою стрілкою, отже, провідник, по відношенню до поля, рухається проти годинникової стрілки (на рисунку не показано).

У реальному асинхронному двигуні кругове обертове поле, яке створює трифазна обмотка статора при живлені від мережі змінного струму, наводить ЕРС та струми в замкненій обмотці ротора, що й приводить до появи електромагнітного моменту і обертання ротора.

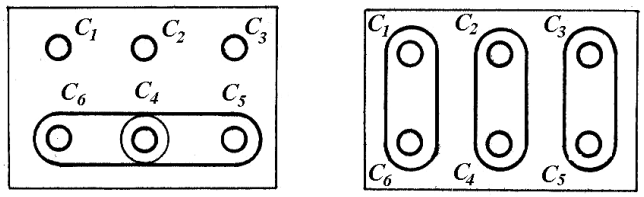
Важливою величиною, що характеризує роботу асинхронного двигуна, є різниця між частотами обертання статора і ротора, виражена у відносних одиницях:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \tag{2.1}$$

Ця величина називається *ковзанням*. Доволі часто ковзання асинхронної машини виражають у відсотках:

$$S = \frac{(n_1 - n_2)100}{n_1}[\%]. \qquad (2.2)$$

Статор машини має достатньо просту конструкцію. Він складається з корпусу, осердя та статорної обмотки. Розглянемо конструкцію статора асинхронного двигуна потужністю до 100 кВт. Корпус такого двигуна виконують зазвичай литим із чавуну або сплавів алюмінію з ребристою поверхнею для збільшення площі охолодження. Необхідність у цьому виникає через магнітні втрати, що наявні в осерді статора (у машині постійного струму такі втрати відсутні і тому її зовнішня поверхня не має ребер). Разом з корпусом відливаються лапи для кріплення машини на фундаменті (у деяких двигунів незначної потужності кріплення здійснюється за один із підшипникових щитків – *фланцеве кріплення*). Зовні на корпусі розташовують клемну коробку, у яку виводять кінці обмоток. У трифазних двигунів таких кінців зазвичай шість, що дає змогу з'єднати обмотки за зіркою чи трикутником (рис. 2.3).



а б

Рисунок 2.3 – Розташування кінців статорних обмоток та сполучення їх у зірку (а) та трикутник (б) у клемній коробці

З боків корпус має спеціальні проточки для посадки підшипникових щитків, які також відливаються (матеріал корпусу і підшипникових щитків може бути різним: корпус – зі сплаву алюмінію, а підшипникові щитки – чавунні).

Осердя має циліндричну форму і шихтовану конструкцію, тобто набирається із пластин електротехнічної гарячекатаної сталі товщиною 0.35–0.5 мм. Ці пластини виготовляють шляхом штамповки з подальшим двостороннім покриттям ізоляційною плівкою, наприклад, шаром лаку.

На внутрішній поверхні осердя статор має повздовжні пази, у які закладаються провідники обмотки статора.

Обмотка виконується з мідного (алюмінієвого) дроту круглого чи прямокутного перерізу.

Обмоткою статора машини змінного струму називається розімкнена система провідників, визначеним способом укладена в пази і з'єднана в фази.

Пази, у яких розміщують провідники обмотки, мають *трапецоїдну* чи *грушувату форму* для машин потужністю до 100 Вт і *прямокутну* форму для машин більшої потужності (рис. 2.4).

Трапецоїдні та грушуваті пази з боку, зверненого до повітряного зазору, напівзакриті, що дозволяє знизити магніторушійну силу обмотки.

У машинах потужністю до 100 кВт виконують всипну обмотку з круглого ізольованого дроту. Для ізоляції обмотки від корпусу в пази закладають вигнуті по формі пазу короби, що складаються з одного чи кількох шарів ізоляційного матеріалу.

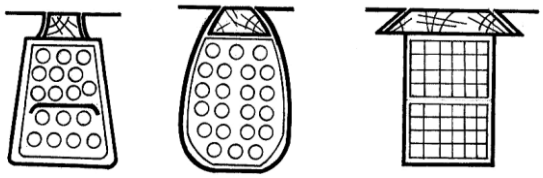


Рисунок 2.4 – Пази статора машини змінного струму трапецоїдний (а), грушуватий (б) та прямокутний (в)

Провідники по черзі опускають (всипають) у паз через щілину, яку створюють сусідні зубці. Після укладки обмотки в пази осердя, її просочують у спеціальних лаках, що надає їй монолітної конструкції, покращує теплопровідність, вологостійкість, електричну та механічну міцність. У машинах потужністю більше 100 Вт і напругою вище 660 В, для підвищення електричної та механічної міцності ізоляції, обмотки виконують із жорстких секцій (котушок), які вкладають в прямокутні пази (рис. 2.4, в).

Секції виготовляють на спеціальних шаблонах із прямокутного обмоткового дроту, їм надають закінченої форми з усіма характерними вигинами, потім ізолюють, просочують у компаундах і в готовому вигляді укладають в пази.

Трифазна обмотка статора складається з трьох ідентичних частин – обмоток фаз. Кожна з них у просторі осердя статора займає 1/3 площі, а отже третину пазів $\boldsymbol{Z_1 / 3}$.

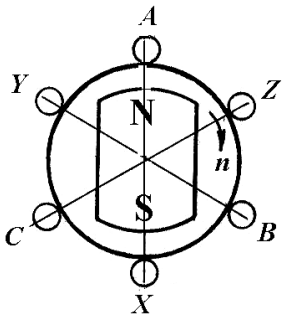


Рисунок 2.5 – До пояснення принципу утворення трифазної обмотки

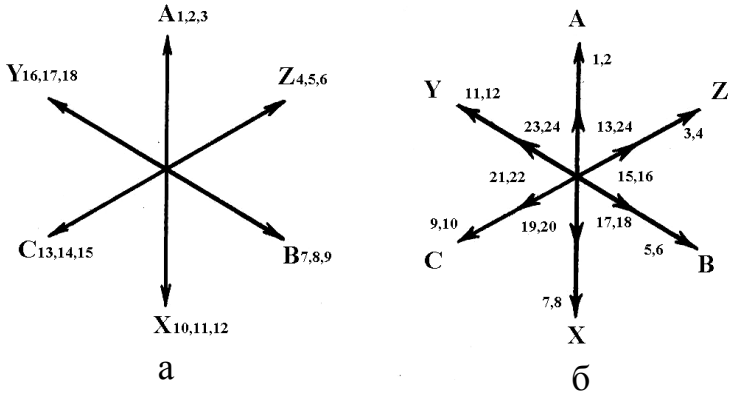


Рисунок 2.6 – Зірки пазових ЕРС трифазних обмоток $2p = 2;\ q = 3$; (а) та $2p = 4;\ q = 2$ (б)

На поперечному розрізі статора трифазної двополюсної машини зі скупченою обмоткою (рис. 2.5) показані обмотки трьох фаз, початки яких (А, В, С) мають зсув у просторі осердя на 120°.

При положенні ротора, зображеному на (рис. 2.5), максимальна ЕРС індукується у фазі А. Максимальна ЕРС такого ж напряму створиться в фазі В через проміжок часу, що відповідає повороту ротора на кут 120°. При повороті ротора ще на 120° максимальна ЕРС буде створюватись в фазі С. Отже, при такому розміщенні обмоток в просторі статора, можна отримати необхідний зсув між ЕРС фаз у часі.

Із сказаного випливає, що при трифазній обмотці двополюсної машини з рівномірним розподілом пазів по колу статора, останнє розбивають на шість рівних зон (із q пазів) у такій послідовності (за напрямом обертання ротора): початок першої фази (А), кінець третьої (Z), початок другої (В), кінець першої (Х), початок третьої (С), кінець другої (У). На (рис. 2.6, а) зображена просторова зірка пазових ЕРС трифазної обмотки при $2p = 2$ і $q = 3$ з розбивкою пазів по зонах.

Якщо число пар полюсів машини більше одиниці, то зірку пазових ЕРС при розподілі пазів «обходять» p раз (рис. 2.6, б), і отримають шість p зон. При $p > 1$ виникає необхідність увести поняття *електричного кута*. Між осями сусідніх полюсів (N та S) електричний кут складає 180°. Якщо машина двополюсна, то геометричний кут також 180°. Якщо ж у машині $p = 2$, то геометричний кут між осями полюсів зменшується вдвічі і дорівнює лише 90° (360 : 4), у шестиполюсній машині цей кут складає лише 60° і т. д. Отже, геометричний кут у машині менший від електричного в p раз.

Ротор двигуна з короткозамкненою обмоткою складається з вала, на який насаджено пакет заліза з пазами, у яких розміщена короткозамкнена обмотка. Така обмотка, її ще називають «біляча клітка», становить ряд металевих (алюмінієвих чи мідних) стрижнів, розташованих у пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків короткозамкненими кільцями (рис. 2.7). Осердя ротора набирається з пластин, які штампують одночасно з пластинами осердя статора, але не покриваються ізоляційним лаком, як пластини статора, а мають лише оксидну плівку, яка є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми. Величина цих струмів у робочому режимі незначна, тому що частота перемагнічування осердя ротора мала.

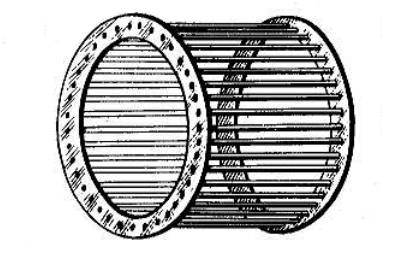


Рисунок 2.7 – «біляча клітка» – обмотка ротора

Короткозамкнена обмотка ротора у більшості двигунів виконується шляхом заливки зібраного осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом. Разом із тим у деяких двигунів одночасно на короткозамкнених кільцях відливаються і вентиляційні лопатки. Принципова схема увімкнення такого двигуна до мережі зображена на рисунку 2.8, а. Як і ротор двигуна з короткозамкненою обмоткою, фазний ротор має вал з осердям, в пази якого вкладається обмотка. Обмотка такого ротора виконується, по аналогії з обмоткою статора, трифазною з'єднаною в зірку, а її кінці виведені на три контактних кільця. Тому такий двигун ще називають асинхронним двигуном з *контактними кільцями*. Контактні кільця ізолюються одне від одного і від вала, на якому жорстко закріпляються. Для здійснення електричного контакту з обмоткою ротора, який обертається, на кожне контактне кільце накладають зазвичай дві щітки, що розташовані у щіткотримачах. Кожен щіткотримач має пружину, яка забезпечує необхідний тиск щітки на контактне кільце. Самі щіткотримачі закріпляються на передньому підшипниковому щиті двигуна і закриваються спеціальним кожухом.

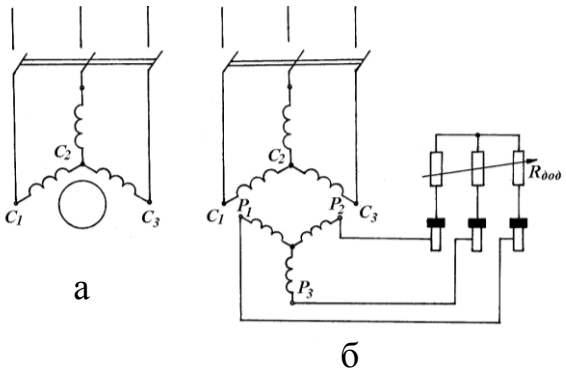


Рисунок 2.8 – Принципові схеми увімкнення трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим (а) і фазнім (б) ротором

Асинхронні двигуни з фазним ротором, у конструктивному відношенні, більш складні, ніж двигуни з короткозамкненим ротором, а тому, і менш надійні в роботі, але вони мають кращі регулювальні та пускові властивості завдяки можливості увімкнення в коло ротора додаткових опорів $\boldsymbol{R_{дод}}$.

2.2 Зведений асинхронний двигун, його рівняння та схеми заміщення, векторна діаграма

Проводити розрахунки для реального двигуна доволі складно: магнітний зв'язок між ротором і статором, різні по величині ЕРС та струми в обмотках ротора і статора, різні частоти струмів та ЕРС і різна кількість фаз на статорі та роторі – все це практично унеможливлює розрахунки необхідних величин машини.

Враховуючи це, реальний асинхронний двигун замінюють уявним, теоретичним, так званим *зведеним,* параметри обмотки ротора якого перераховані, зведені, до обмотки статора (по аналогії зі зведеним трансформатором). При цьому обмотку ротора з числом фаз $\boldsymbol{m_2}$, обмотковим

коефіцієнтом $k_{об2}$ числом витків W_2 замінюють обмоткою з m_1, W_1, $k_{об1}$. При такій зміні (як і при аналогічній у трансформатора) потужності, втрати на фазові зсуви векторів ЕРС і струмів після зведення повинні залишитись такими ж, як і до зведення. Перерахунок реальних параметрів обмотки ротора на зведені можна виконати за формулами, аналогічними формулам зведення параметрів вторинної обмотки трансформатора до первинної.

Таким чином, при нерухомому роторі зведені величини (як у трансформатора позначені штрихом) можуть бути визначені співвідношеннями:

$$E_2^{'} = E_2 k_{\varepsilon} \tag{2.3}$$

$$I_2^{'} = I_2 / k_i \tag{2.4}$$

$$R_2^{'} = R_2 k_r \tag{2.5}$$

$$X_2^{'} = X_2 k_r \tag{2.6}$$

$$\frac{m_1 (W_1 k_{об1})^2}{m_2 (W_2 k_{об2})^2} = k_r \tag{2.7}$$

З урахуванням зведених величин, представляють систему рівнянь зведеного асинхронного двигуна, що складається з рівнянь ЕРС обмоток ротора і статора та рівняння струмів:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 \\ 0 = \dot{E}_1{}' - \dot{I}_2{}' R_2{}' / s - j\dot{I}_2{}' X_2{}' \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-I_2). \end{cases} \tag{2.8}$$

У другому рівнянні (2.8) порівняно з аналогічним рівнянням трансформатора, не має лівої частини $U_2' = 0$ і є велична R_2'/s, тоді як в аналогічному рівнянні трансформатора зведений активний опір вторинної обмотки не має коефіцієнта. Однак рівняння (2.8) можна легко привести до такого вигляду, якщо представити опір R_2'/s двома складовими:

$$\frac{R_2{}'}{s} = R_2{}' + R_2{}' \frac{1-s}{s}. \tag{2.9}$$

Враховуючи (2.9), рівняння ЕРС зведеної обмотки ротора виглядає як

$$\dot{I}_2{}' R_2{}' \frac{1-s}{s} = \dot{E}_2{}' - \dot{I}_2 R_2{}' - j\dot{I}_2{}' X_2{}'. \tag{2.10}$$

У такому вигляді рівняння ЕРС зведеної обмотки ротора уже не відрізняється від рівняння вторинної обмотки трансформатора, яка навантажена

зведеним опором навантаження $Z_н'\left(U_2' = I_2' Z_н'\right)$. Іншими словами, зведений асинхронний двигун можна розглядати, у такому випадку, як зведений трансформатор, що працює на змінне активне навантаження $R_2'(1-s)/s$.

$$P_2' = m_1 I_2'^2 R_2'(1-s)/s\,. \tag{2.11}$$

Активна потужність, що виділяється вторинною обмоткою цього трансформатора становить *повну механічну потужність,* яку розриває асинхронний двигун.

Заміна реального асинхронного двигуна зведеним дозволяє, як і для трансформатора, побудувати *векторно-потенційну діаграму.* Основою для побудови такої діаграми є рівняння (2.8). При побудові діаграми вважають відомими параметри обмоток статора $\boldsymbol{R_1}$; $\boldsymbol{X_1}$ та зведеного ротора $\boldsymbol{R_2'}$ і $\boldsymbol{X_2'}$. Діаграму будують для заданого навантаження, тобто при відомому ковзанні двигуна $\boldsymbol{s}$ (рис. 2.9).

Побудову діаграми найпростіше починати з вектора струму $\boldsymbol{I_2'}$, який відкладається у довільному напрямі. Падіння напруги на опорах $\boldsymbol{R_2'(1-s)/s}$ та $\boldsymbol{R_2'}$ співпадають за напрямом зі струмом і викладаються послідовно з початку координат у масштабі напруги. Вектор падіння напруги на зведеному індуктивному опорі $\boldsymbol{jI_2'X_2''}$ відстає від вектора струму на кут в 90° і відкладається з кінця вектора $\boldsymbol{\dot{I}_2'R_2'}$.

Вектор ЕРС $\boldsymbol{\dot{E}_2' = \dot{E}_1'}$ є результуючим вектором, що з'єднує початок координат з кінцем вектора $\boldsymbol{j\dot{I}_2'X_2'}$. Магнітний потік $\boldsymbol{\Phi_0}$, що відстає від намагнічуючого струму $\boldsymbol{\dot{I}_0}$ на кут магнітного запізнення α, також на прямий кут випереджає ЕРС, яку він створює. Побудувавши, з вже відомих векторів, рівняння струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \left(-\dot{I}_2'\right)$, отримаємо струм обмотки статора, за

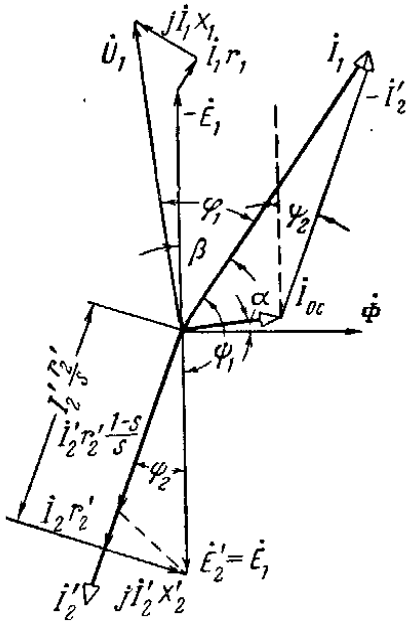


Рисунок 2.9 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

напрямом якого визначають напрями падіння напруги в колі обмотки статора і саму напругу $\dot{U}_1$, прикладену до машини. Кути між величинами обмоток статора φ_1 та ротора ψ_2 отримують побудовою, проте кут зсуву струму $\dot{I}_2'$ відносно ЕРС, що його створює, $\dot{E}_2'$ може бути отриманий і аналітичним шляхом.

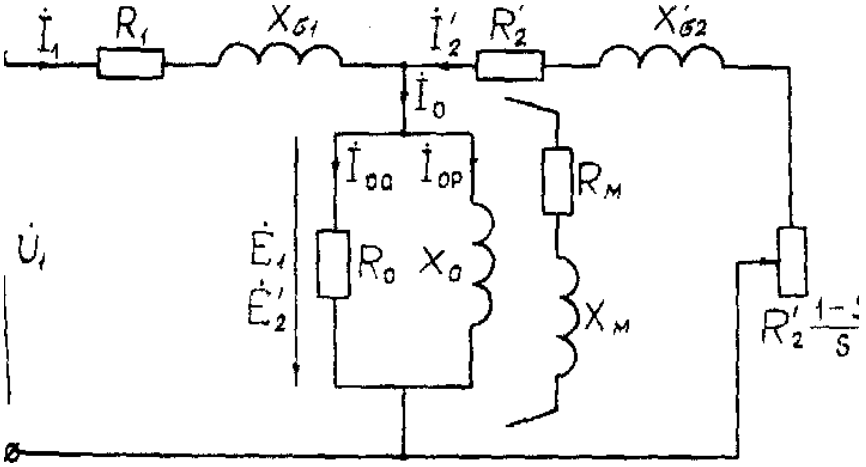


Рисунок 2.10 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

$$\psi_2 = arctg(X_2' s / R_2) \qquad (2.12)$$

Можливість зведення рівнянь асинхронного двигуна до вигляду рівнянь зведеного трансформатора дозволяє стверджувати, що схема заміщення зведеного трансформатора є одночасно і схемою заміщення зведеного асинхронного двигуна, якщо в ній опір $\boldsymbol{Z_н'}$ замінити опором $\boldsymbol{R_2'(1-s)/s}$ (рис. 2.10).

Таким чином, складання рівнянь ЕРС обмоток і струмів двигуна та зведення параметрів обмотки статора дало можливість, зрештою, побудувати електричну схему заміщення асинхронного двигуна. У ній реальний магнітний зв'язок між обмотками статора і ротора замінено електричним зв'язком обмоток. Активний опір $\boldsymbol{R_2'(1-s)/s}$ – єдиний змінний параметр у схемі, значення якого визначається ковзанням, а отже, механічним навантаженням на валу. Якщо момент навантаження відсутній $\boldsymbol{M_2 = 0}$ і ковзання вважати рівним нулю $(\boldsymbol{s \approx 0})$, то $\boldsymbol{R_2'(1-s)/s = \infty}$, що відповідає розімкненій обмотці ротора, тобто, режиму холостого ходу. Якщо момент навантаження перевищує момент, який може розвивати двигун, то останній зупиняється ($\boldsymbol{n_2 = 0,\ s = 1}$). При цьому $\boldsymbol{R_2'(1-s)/s = 0,}$ що відповідає режиму короткого замикання асинхронного двигуна. Іншими словами Т-подібна схема заміщення дозволяє проаналізувати роботу двигуна у всьому діапазоні навантаження від Н.Х. до К.З.

Більш зручною для користування є Г-подібна схема, яку отримують винесенням на затискачі напруги намагнічуючої вітки ($\boldsymbol{Z_m = R_m + jX_m}$).

При спрощенні схеми заміщення трансформатора намагнічуючу вітку відмикали, нехтуючи незначним, у порівнянні з номінальним, намагнічуючим струмом. Поводитись аналогічно у схемі заміщення асинхронного двигуна неможливо, тому що його намагнічуючий струм, враховуючи наявність в магнітній системі повітряного зазору та нищу якість сталі, складає 20–50 % від номінального струму. Щоб намагнічуючий струм не став більшим, при винесені намагнічуючої вітки на затискачі схеми заміщення, послідовно з опорами намагнічуючої вітки умикають опори обмотки статора R_1 та X_1. Отримана, таким чином, схема (рис. 2.11) зручна тим, що має дві паралельні вітки: намагнічуючу зі струмом $\dot{I}_0$ та робочу зі струмом $-\dot{I}_2'$.

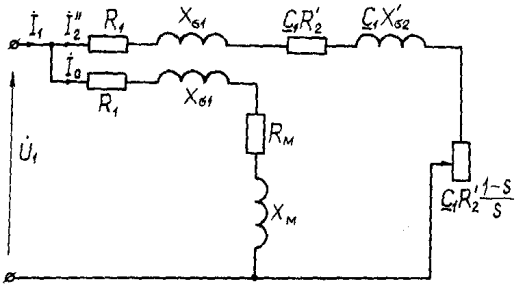


Рисунок 2.11 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Щоб винесення намагнічуючої вітки на затискачі схеми не порушувало співвідношень між величинами, уводиться коефіцієнт пропорційності опорів і струму ротора c_1, який в машинах потужністю 3 кВт і більше складає 1,05–1,02, тому при практичних розрахунках приймається рівним одиниці. За Г-подібною схемою визначається зведений струм обмотки ротора асинхронного двигуна:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R_1 + R_2' + R_2'(1-s)/s\right]^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2}} \qquad (2.13)$$

або з урахуванням (3.9) отримують

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{\left[R_1 + R_2'/s\right]^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2}}, \qquad (2.14)$$

де знаменником формули є повний опір робочого контуру Г-подібної схеми заміщення.

2.3 Механічна характеристика, її залежність від напруги й активного опору в полі ротора

Електромагнітний момент асинхронного двигуна може бути виражений через електромагнітні величини машини. Зокрема, $M_{ем} = P_{ем}/\omega_1$, де $\omega_1 = 2\pi f_1/p$ – кутова частота обертання магнітного поля, скориставшись, що $P_{ем} = m_2E_2I_2\cos\psi_2$, а $E_2 = 4.44 f_1 \Phi_{макс} W_2 k_{об2}$ і, врахувавши що $4{,}44 = 2\pi/\sqrt{2}$, отримують:

$$M_{ем} = pm_2 W_2 k_{об} \Phi_{макс} I \cos\psi_2 / \sqrt{2} \qquad (2.15)$$

або, замінивши $pm_2 W_2 k_{об} = k_м i \Phi_{макс} / \sqrt{2}$, кінцеву формулу

$$M_{ем} = k_м \Phi I_2 \cos\psi_2 . \qquad (2.16)$$

Порівнюючи (2.16) та рівняння електромагнітного моменту для машин постійного струму, легко переконатись, що природа електромагнітного моменту асинхронного двигуна та машини постійного струму однакова, оскільки добуток $I_2 \cos\psi_2$ є активною складовою струму ротора. Отримана формула, пояснюючи природу електромагнітного моменту, зручна лише для якісного аналізу робочого процесу асинхронної машини. Її недоліком є те, що момент визначається як функція трьох величин, які залежать від навантаження: $\Phi, I_2, \cos\psi_2$.

Тому виводять іншу формулу, користуючись тим, що

$$P_{ем} = P_{e2} / s = m_1 I_2'^2 R'_2 / s.$$

Підставивши визначений за схемою заміщення зведений струм I_2' (2.14) та значення $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$, отримують формулу, у якій електромагнітний момент двигуна виражається через параметри схеми зміщення (рис. 2.11) та параметри мережі (U_1 і f_1):

$$M_{ем} = \frac{m_1 p U_1 R_2' / s}{2\pi f \left[\left(R_1 + R_2' / s \right)^2 + \left(X_1 + X_2' \right)^2 \right]}. \qquad (2.17)$$

Враховуючи незмінність параметрів машини, електромагнітний момент, за $U_1 = const$, є лише функцією ковзання s, тому формула (2.17) зручна для побудови механічної характеристики машини $M_{ем} = f(s)$.

При малих ковзаннях ($s << 1$) у знаменнику (2.17) можна знехтувати всіма величинами, крім $(R_2' / s)^2$, і тому

$$M_{ем} \approx \frac{m_1 p U_1 R_2'}{2\pi f_1 R_2} s ,$$

тобто при малих ковзаннях електромагнітний момент пропорційний ковзанню і залежність $M_{ем} = f(s)$ має лінійний характер. При ковзаннях близьких до одиниці, або й більших одиниці (гальмівний режим) можна знехтувати активними опорами обмоток R_1 та R_2' порівняно з індуктивними X_1 та X_2', і то

$$M_{ем} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f \left(X_1 + X_2' \right)^2 s}.$$

Звідси випливає, що при значних ковзаннях момент зворотно пропорційний ковзанню і крива $M_{ем} = f(s)$ має гіперболічний характер. При зміні ковзання в широких межах, і $U_1 = const$, крива $M_{ем} = f(s)$ має вигляд, зображений на (рис. 2.12).

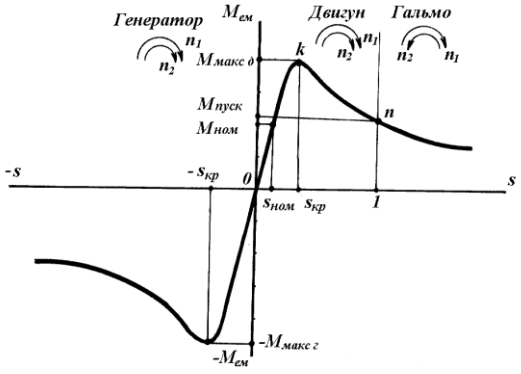


Рисунок 2.12 – Залежність $M_{ем} = f(s)$ для асинхронної машини

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

$$s_{кр} = \pm R_2' \Big/ \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \qquad (2.18)$$

Підставивши (2.18) в (2.17), отримують значення максимального моменту:

$$M_{макс} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}, \qquad (2.19)$$

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

Для асинхронних двигунів загального призначення активний опір обмотки статора набагато менший, ніж сума індуктивних опорів $R_1 << X_1 + X_2'$, тому, нехтуючи опором R_1, критичне ковзання визначають приблизно:

$$s_{кр} \approx \pm R_2' / (X_1 + X_2') \qquad (2.20)$$

аналогічно і максимальний момент

$$M_{макс} \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')}. \qquad (2.21)$$

Варто зазначити, що згідно з (2.19) максимальний момент генераторного режиму, дещо більший, ніж режиму двигуна ($M_{макс\,г} > M_{макс\,д}$).

Із виразу (2.17), підставивши значення $s = 1$, отримують формулу пускового моменту двигуна:

$$M_{пуск} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f [(R_1 + R_2') + (X_1 + X_2')^2]}. \qquad (2.22)$$

Доволі часто замість залежності $M_{ем} = f(s)$ користуються залежністю $n_2(s) = f(M_{ем})$ (рис. 2.13).

На (рис. 2.12 та рис. 2.13) механічна характеристика двигуна має дві ділянки. Перша ***ок*** – *ділянка стійкої роботи* машини, тому що зростання

навантаження (збільшення s та зниження n_2) приводить до збільшення моменту, який розвиває двигун, що дає йому змогу обертати збільшене навантаження.

На другій ділянці характеристики – *кп* зростання навантаження приводить до зниження моменту двигуна, тому ця ділянка називається *ділянкою нестійкої роботи.* Відношення максимального моменту, який розвиває двигун, до номінального ($\lambda = M_{макс}/M_{ном}$) називається *перевантажувальною здатністю* двигуна. Для двигунів загального призначення $\lambda = 1{,}7 \div 2{,}5$.

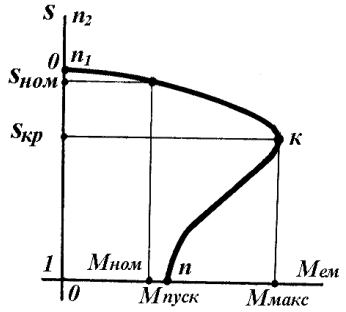


Рисунок 2.13 – Залежність частоти обертання (ковзання) від електромагнітного моменту асинхронного двигуна

Номінальний момент машини зазвичай менший від пускового, що дозволяє здійснити пуск двигуна з номінальним навантаженням, цю властивість двигуна називають *пусковою здатністю* $\mu = M_{пуск}/M_{ном}$ (звичайно, $\mu = 1{,}1 \div 2$).

Застосування формули (2.17) для розрахунків механічної характеристики асинхронних двигунів не завжди можливе, тому що параметри схеми заміщення двигунів, звичайно, не задаються у каталогах і довідниках, тому користуються спрощеною формулою моменту. В основу цієї формули покладено припущення, що активний опір обмотки статора $R_1 \approx 0$; при цьому

$$M_{ем} \approx M_{макс} \frac{2}{s/s_{кр} + s_{кр}/s}, \qquad (2.23)$$

а критичне ковзання

$$s_{кр} = s_{ном}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}). \qquad (2.24)$$

Формула (2.23) є наближеною і, звісно, дає похибку, оскільки не враховує падіння напруги в обмотках статора. Особливо велика похибка під час переходу з рухового режиму в генераторний, де різниця в моментах може бути суттєвою. Однак для дослідження одного режиму виведена формула дає прийнятну точність. Це пояснюється тим, що в ділянці малих ковзань від s = 0 до SKP магнітний потік змінюється незначно, а отже, у цій ділянці формула не може дати великої похибки, тим паче, що точки за s = 0 та $s_{кр}$ є фіксованими.

При ковзаннях, близьких до одиниці, формула (2.23), здавалося б, повинна давати завищені значення моменту, тому що за великих струмів сильніше проявляється падіння напруги в статорі. Однак у реальних машинах при ковзаннях, близьких до одиниці, зменшується опір X2 через явище витіснення струму в провідниках ротора, що веде до збільшення моменту. У результаті виявляється, що похибка, зумовлена нехтуванням падіння напруги в

статорі, і похибка, спричинена зміною параметрів ротора, взаємно протилежні, унаслідок чого точність наближеної формули (2.23) достатня для практичних цілей.

Аналізуючи (2.17), (2.19) та (2.22) роблять висновок, що електромагнітний момент асинхронного двигуна, а також, його максимальне та пускове значення пропорційні квадрату напруги, яка підводиться до обмотки статора: $M_{ем} \equiv U_1^2$. Одночасно, згідно з (2.18), випливає, що критичне ковзання не залежить від напруги U_1 (значення U_1 відсутнє в формулі критичного ковзання). Це дає можливість побудувати механічні характеристики $M_{ем} = f(s)$ для різних значень напруги (рис. 2.12) із яких випливає, що коливання напруги мережі U_1 відносно номінального значення $U_{1ном}$ супроводжується не лише зміною максимального та пускового моменту, а і зміною ковзання, а отже, і частоти обертання ротора. Зі зниженням напруги частота обертання знижується (ковзання зростає) і навпаки. Зміна напруги впливає на максимальний та пусковий момент, а отже, і на перевантажувальну та пускову здатність асинхронного двигуна, оскільки номінальний момент, що є механічним моментом на валу, не залежить від величини напруги. Така залежність моменту від напруги є суттєвим недоліком асинхронного двигуна, тому що доволі часто, після зростання навантаження, напруга в мережі знижується, що негативно впливає на роботу двигуна. Якщо напруга мережі U_1 знизилась на 30 %, тобто стала $U_1 = 0{,}7\, U_{1ном}$, то максимальний и пусковий момент знизиться більш ніж у два рази: $M'_{макс} = 0{,}7^2 M_{макс} = 0{,}49 M_{макс}$. На таку ж величину зменшується і пускова та перевантажувальна здатність, тому, якщо за номінальної напруги $\lambda = M_{малс} / M_{ном} = 2$, то після зниження напруги двигун за такого зниження напруги не може нести навіть номінального навантаження, що призведе до його зупинки і, зрештою, до виходу з ладу.

Пуск асинхронних двигунів із фазним ротором. Наявність контактних кілець у двигуна з фазним ротором дозволяє увімкнути до обмотки ротора пускові опори. При цьому активний опір кола ротора збільшується до значення $R_{2пуск} = R_2' + R_д'$, де $R_д'$ – значення додаткового пускового опору зведене до обмотки статора.

Як уже відзначалось, можна підібрати такий додатковий пусковий опір, за якого пусковий момент буде дорівнювати моменту максимальному. Величину цього опору можна визначити, підставивши в (2.20) $s_{кр} = 1$.

$$s_{кр} = (R_2' + R_{д.макс}^{\epsilon}) / (X_1 + X_2') = 1,$$

де $R'_{д.макс}$ – зведений до обмотки статора додатковий пусковий опір, за якого $M_{пуск} = M_{макс}$. Таким чином,

$$R'_{2п.м} = R'_2 + R'_{д.макс} = X_1 + X'_2, \qquad (2.25)$$

де $R'_{2п.м}$ – опір кола ротора, за якого $M_{пуск} = M_{макс}$. При $R'_{2п.м} > X_1 + X'_2$ пусковий момент зменшується.

При виборі додаткового пускового опору $R'_д$ виходять з умов пуску двигуна: якщо двигун умикають при значному моменті навантаження на валу, додатковий пусковий опір вибирають таким, щоб забезпечити найбільший пусковий момент, тобто $R'_д = R'_{д\ макс}$. Якщо двигун вмикають при незначному моменті навантаження на валу, коли пусковий момент двигуна не має вирішального значення для пуску, виявляється доцільним додатковий пусковий опір вибрати більшим, ніж той, за якого $M_{пуск} = M_{макс.}$, тобто $R'_{2.пуск.} > X_1 + X'_2$.

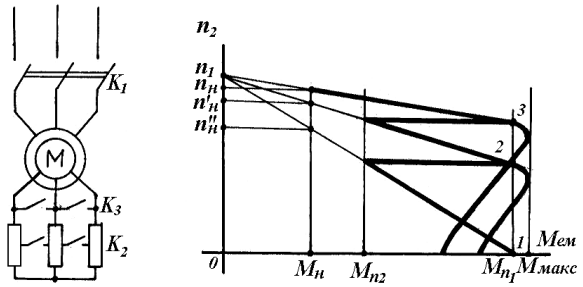


Рисунок 2.14 – Схема увімкнення додаткових опорів і побудова пускових характеристик асинхронного двигуна з фазним ротором.

У цьому випадку пусковий момент буде дещо меншим від $M_{макс.}$, але пусковий струм знизиться значно.

На (рис. 2.14) поданий графік зміни пускового моменту асинхронного двигуна з фазним ротором при двох ступенях додаткових опорів. Наприклад, у початковий момент пуску (перша ступінь опору – увімкнено контакти K_1) пусковий момент рівний $M_{п.1}$. По мірі розгону двигуна його момент знижується по характеристиці *1* до моменту $M_{п2}$, коли вмикаються контакти K_2, опір у колі ротора знижується, двигун переходить на криву *2* і пусковий момент знову досягає $M_{п1}$. Після нового зниження моменту до $M_{п2}$, вмикаються контакти K_3 і двигун виходить на природну характеристику *3*, що знову підвищує пусковий момент до $M_{п1}$. По природній характеристиці *3* двигун досягає частоти обертання, при якій момент, що розвиває двигун, урівноважується моментом навантаження $M_н$. Якщо при розгоні двигуна не увімкнуться контакти K_2 чи K_3, двигун по відповідній характеристиці досягне частоти $n''_н$ чи $n'_н$ і буде працювати саме з цією частотою обертання, тому що в цих точках $M_{ем}$ двигуна рівний моменту навантаження $M_н$.

Таким чином, в асинхронних двигунах з фазним ротором забезпечується найбільш сприятливі співвідношення між пусковим моментом і пусковим струмом: значний пусковий момент при невеликому струмі (не більше ніж 2–3 від номінального). Недоліком такого пуску є деяка складність і неекономічність пускової операції. Останнє викликається необхідністю застосування додаткових опорів з невиробничими втратами електроенергії при їхньому нагріванні.

2.4 Енергетична діаграма, ККД і робочі характеристики асинхронного двигуна, колова діаграма

Процес перетворення електричної енергії в механічну, як і будь-який процес перетворення одного виду енергії в інший, супроводжується *втратами,* які перетворюючись в тепло, нагрівають активні частини машини. Енергетична діаграма (рис. 2.15) показує, як протікає процес перетворення електричної потужності в асинхронному двигуні, та які втрати спостерігаються при цьому.

Після включення обмотки статора до мережі, з останньої до статора машини надходить активна *електрична потужність*

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos\varphi_1 . \tag{2.26}$$

Струм $\boldsymbol{I_1}$, що протікає по обмотці статора, створює своєю реактивною складовою обертовий магнітний потік і нагріває саму обмотку *електричними втратами* на її опорі:

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1 . \tag{2.27}$$

Обертаючись, магнітний потік перемагнічує залізо статора, що призводить до *магнітних втрат.*

Потужність, що залишається після цих втрат, – є *електромагнітною,* яка через повітряний зазор передається від статора до ротора двигуна, тому може бути визначена електричними величинами для статора (індекс 1) для ротора (індекс 2). Крім цього, електромагнітна потужність на роторі перетворюється в *механічну,* тому може бути визначена і через механічні величини

$$P_{ем} = m_1 E_1 I_1 \cos\psi_1 = m_2 E_2 I_2 \cos\psi_2 = M_{ет}\omega_1 . \tag{2.28}$$

ЕРС $\boldsymbol{E_2}$, що магнітним потоком створюється у обмотці ротора, викликає струм $\boldsymbol{I_2}$, протікання якого по обмотці веде до появи електричних втрат у цій обмотці, однакових як у реальному, так і у зведеному двигуні.

$$P_{e2} = m_1 I_2^2 R_2' = m_1 I_2'^2 R_2' . \tag{2.29}$$

Якщо ці втрати відняти від електромагнітної потужності, то отримують повну механічну потужність двигуна (2.11) $\boldsymbol{P_2'}$:

$$P_{ем} - P_{e2} = P_2' ,$$

або

$$P_{ем} = P_2' + P_{e2} = m_1 I_2'^2 R_2' (1-s)/s + m_1 I_2'^2 R_2' = m_1 I_2'^2 R_2' [(1-s)/s + 1] = P_{e2}/s . \tag{2.30}$$

Перетворивши (2.30), отримують ще одну формулу електричних втрат в обмотці ротора

$$P_{e2} = P_{ем} s , \tag{2.31}$$

яка показує, що *електричні втрати в обмотці ротора пропорційні ковзанню,* тому, щоб мати кращі показники, машина, при заданому навантаженні, повинна мати найменше ковзання.

Повна механічна потужність P_2' приводить ротор до обертання, що викликає *механічні втрати,* пропорційні квадрату частоти обертання ротора ($P_{мех} \equiv n_2^2$). Ці втрати, як і в машині постійного струму, складаються із втрат на тертя ($P_{тертя}$) та вентиляційних втрат ($P_{вент}$):

$$P_{мех} = P_{тертя} + P_{вент}. \tag{2.32}$$

Додаткові втрати також входять до складу втрат асинхронного двигуна. Це втрати, які важко розрахувати, викликані дією вищих гармонік МРС, пульсацією магнітної індукції в зубцях та іншими причинами. Їх приймають рівними 0.5 % від приведеної потужності

$$P_{дод} = 0{,}005 P_1. \tag{2.33}$$

Як і електричні втрати, ці витрати уважать змінними, тому при розрахунках приймають пропорційними квадрату коефіцієнта навантаження β:

$$P'_{дод} = \beta^2 P_{дод}. \tag{2.34}$$

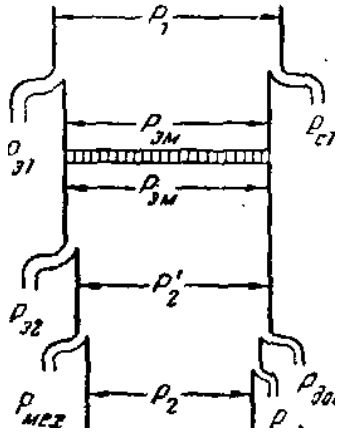


Рисунок 2.15 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Сума усіх витрат асинхронного двигуна

$$\sum P = P_{e1} + P_{маг} + P_{e2} + P_{мех} + P_{дод} \tag{2.35}$$

Корисна потужність P_2 на валу машини – є механічна потужність і може бути визначена

$$P_{2д} = P_1 - \sum P = M_2 \omega_2 \tag{2.36}$$

де ω_2 – кутова частота обертання ротора.

Відношення корисної потужності до підведеної (ККД) у асинхронних двигунів потужністю 1÷10 кВт складає 75–88 %, а для двигунів більше 10 кВт – 90–94 %.

Розглянемо послідовність побудови колової векторної діаграми.

Геометричне місце кінців векторів струму в статорі асинхронного двигуна описується рівнянням дуги кола.

Побудуємо колову векторну діаграму для струму статора, приймаючи, що двигун має постійні параметри (рис. 2.16). До таких двигунів наближаються двигуни нормального виконання.

Задаємося масштабом напруги m_u і відкладаємо по вісі дійсних (+1) фазну напругу статора U_1.

Задаємося масштабом струмів m_i, і відкладаємо струм холостого ходу I_0 (відрізок *OH* під кутом – φ_0 до вісі дійсних чисел) і струм короткого замикання (відрізок (*OK* під кутом – φ_K)).

Будуємо дугу кола для струму так: через середину хорди HK у точці M проводимо перпендикуляр через точку *K* до лінії, проведеної через точку H паралельно осі абсцис, отримуємо центр кола O_2, проводимо коло з центром O_2. Дуга HK цього кола (за годинниковою стрілкою) є геометричним місцем кінців векторів струму в статорі під час роботи асинхронної машини в режимі двигуна. Для визначення cosφ, на осі ординат від початку координат відкладаємо відрізок Of, який дорівнює 100 довільним одиницям і на ньому як на діаметрі будуємо коло. Перетин цього кола *з* вектором струму I_1. (або його продовженням) визначає відрізок Oh, який відносно діаметра кола дорівнює кількості сотих часток у значенні cosφ, тобто cosφ = Oh/Of.

Лінією підведеної потужності P_1 є вісь абсцис. Підведена потужність вимірюється в масштабі $m_p = 3U_1m_i$ довжиною перпендикуляра Da, встановленого з кінця вектора струму на вісь абсцис.

Лінією корисної потужності є пряма, шо збігається з хордою HK, на якій побудоване коло струму. Корисна потужність P_2 вимірюється відрізком Db у масштабі потужності.

Лінія електромагнітної потужності переходить через точки H і K_2, де точка K_2 визначається з умови $\frac{K_3K_2}{KK_3} = \frac{R_1}{R_K}$. Тоді електромагнітна потужність $P_{ем} = Dcm_p$. Відрізок K_2K_3 – відповідає втратам в обмотці статора, а відрізок KK_2 втратам в обмотці ротора під час короткого замикання.

Враховуючи, що $P_{ем} = M\Omega_1$, де Ω_1 – кутова швидкість обертання поля статора, відрізок Dc визначає також і обертовий момент двигуна в масштабі $m_M = m_p/\Omega_1 = 3U_1m_i/\Omega_1$, тобто $M = Dcm_M$. Отже, лінія електромагнітної потужності і лінія моменту двигуна збігаються.

Втрати холостого ходу визначаються відрізком HH_0. У заданому режимі (при струмі I_1) втрати в обмотці статора визначаються відрізком cd, а втрати в обмотці ротора – відрізком bc. Масштабом для усіх цих втрат також є масштаб потужності. Щоб визначити з колової діаграми найбільший момент M_m, опускаємо з центра кола струмів O_2 перпендикуляр на лінію електромагнітної потужності і продовжуємо його до перетину *з* колом струмів у точці s.

Далі з точки s опускаємо вертикальну пряму до перетину з лінією $P_{ем}$ в точці *l*.

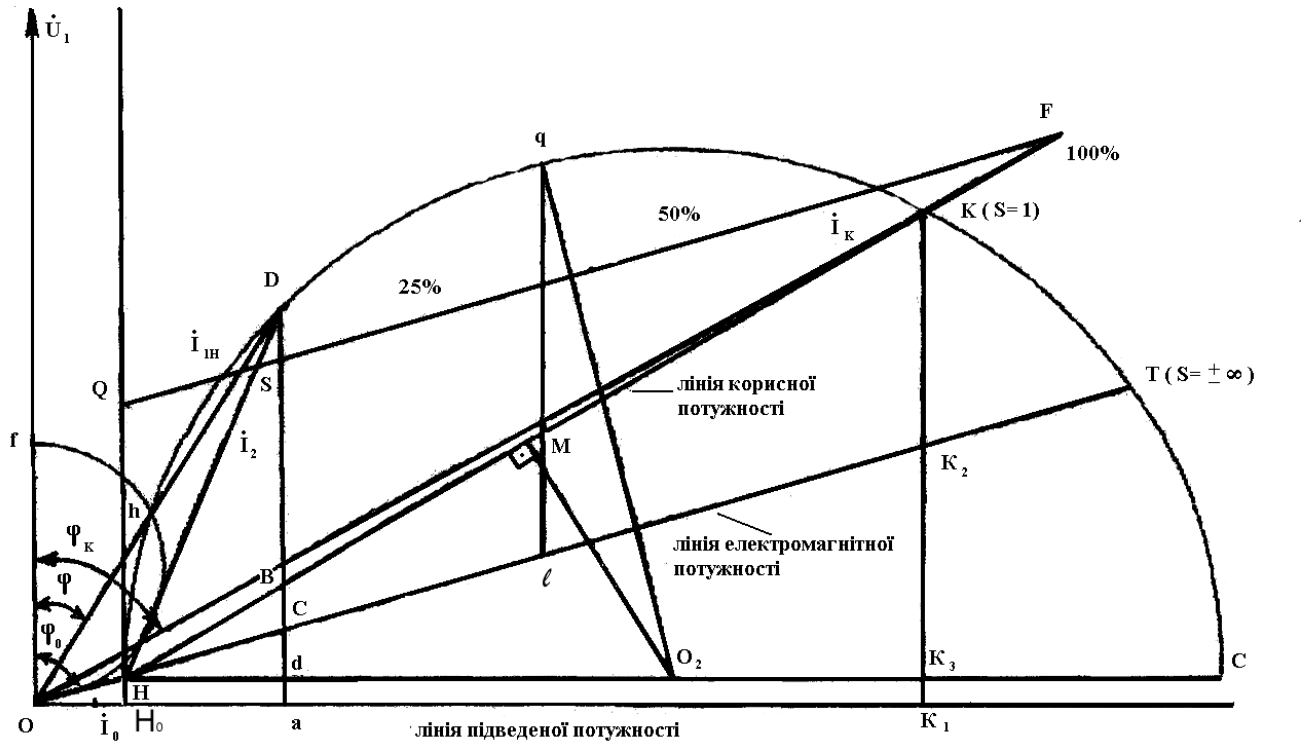


Рисунок 2.16 – Колова діаграма асинхронного двигуна

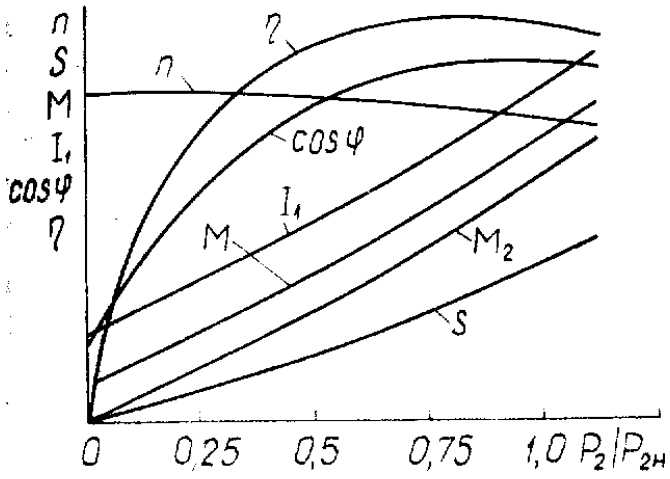


Рисунок 2.17 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

Тоді найбільший момент $M = qlm_M$ і коефіцієнт перевантажувальної здатності $K_{пр} = ql/Dc$. Точка s визначається також дотичною до кола струмів, яка паралельна до лінії $P_{ем}$. Лінія QF – є шкалою ковзання. Точка Q визначає s = 0, а точка F – s = 100 %. Якщо відрізок QF розбити на 100 частин, то перетин лінії проведеної від точки H через відповідну цій потужності точку на коловій діаграмі зі шкалою ковзання покаже значення ковзання. Шкала ковзання проводиться паралельно лінії електромагнітної потужності. Точка Q знаходиться на перетині вертикалі проведеної через точку H і шкали ковзання. Точка F знаходиться на перетині лінії корисної потужності і шкали ковзання. З колової діаграми будують робочі характеристики (рис. 2.17).

2.5 Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів із фазними та короткозамкненими роторами

Частота обертання визначається за формулою:

$$n = \frac{60f}{p}(1-s). \tag{2.37}$$

Звідси випливає, що частота обертання може змінюватись зміною частоти мережі, зміною ковзання та зміною кількості пар полюсів. Промисловістю виготовляються асинхронні двигуни з перемиканням кількості полюсів. Регулювання ковзання здійснюється на двигунах з фазними роторами введенням в їхній ланцюг активного опору. При цьому пусковий момент може дорівнювати максимальному при зменшеному пусковому струмі. Також ковзання можна регулювати зміною напруги мережі.

Пуску та регулюванню частоти обертання асинхронних двигунів надається значна увага в сучасних електроприводах. Пов'язано це, насамперед, з тим, що маючи просту конструкцію, достатньо високу надійність в експлуатації, ці двигуни складають основну частину парку електродвигунів, що використовуються в усіх сферах виробництва. Простота й економічність пуску та регулювання частоти обертання таких двигунів дозволили б, якби спостерігалися, суттєво знизити експлуатаційні втрати і підвищити ефективність виробництва.

Пуск асинхронного двигуна супроводжується перехідним процесом, зумовленим переходом ротора, та механічно зв'язаних з ним частин виконавчого механізму, із нерухомого стану до стану рівномірного обертання, коли обертовий момент двигуна урівноважується сумою гальмівних моментів, що дають на ротор двигуна.

Пускові властивості двигуна визначаються, насамперед, значенням пускового струму або його кратністю $\boldsymbol{i_{пуск} = I_{пуск}/I_{ном}}$ та значенням пускового моменту чи пусковою здатністю. Двигун, що має хороші пускові властивості, розвиває значний пусковий момент при, порівняно, незначному пусковому струмі. На жаль, отримати таке сполучення пускових параметрів у асинхронному двигуні, практично, неможливо. Пов'язано це з тим, що згідно (2.16)

$$M_{пуск} = k_м \Phi I_{2пуск} \cos\psi_2, \tag{2.38}$$

де $\boldsymbol{I_{2пуск}}$ – струм, що виникає під час пуску в обмотці ротора.

Оскільки в момент пуску ротор нерухомий і $f_2 = f_1$, то струм ротора буде мати найбільше значення і перевищуватиме номінальне в 5–7 раз. Разом із тим індуктивний опір обмотки ротора при пуску доволі значний порівняно з активним, а отже, $\cos\psi_2$ малий, тому кратність пускового моменту, як уже відзначалось, лише 1.1–2 рази. Якщо перевищення пускового моменту над номінальним виявляється достатнім для задовільного пуску, то 5–7 кратне перевищення пускового струму може призвести до небажаних наслідків.

Оскільки в початковий момент пуску ковзання $s = 1$, то, нехтуючи струмом холостого ходу, можна визначити пусковий струм обмотки статора із (2.14), підставив $s = 1$:

$$I_{2пуск} = \frac{U_1}{\sqrt{\left(R_1 + R_2'\right)^2 + \left(X_1 + X_2'\right)^2}}. \qquad (2.39)$$

З (2.39) витікає, що для зниження пускового струму варто або знижувати напругу, яка підводиться до обмотки статора, або підвищувати активний опір обмотки ротора R_2'. Останнє найкраще, тому що дозволяє не лише знизити пусковий струм, але й, згідно з (2.22), підвищити пусковий момент. Що стосується зниження напруги U_1, то пусковий струм буде знижуватись пропорційно до зниження напруги, а пусковий момент – пропорційно до квадрата напруги, що дозволить провести пуск двигуна лише за відсутності навантаження на валу. Переваги застосування того чи іншого способу покращення пускових властивостей визначається конкретними умовами експлуатації двигуна і вимогами, що висуваються до його пускових властивостей.

Окрім пускових значень струму $I_{пуск}$ та моменту $M_{пуск}$ пускові властивості оцінюють ще й такими показниками: тривалістю та плавністю пуску, складністю пускових операцій, їхньою економічністю (вартістю і надійністю пускової апаратури і втратами енергії в ній).

2.6 Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів

Щоб надати простим, дешевим та надійним у роботі двигунам з короткозамкненим ротором кращі пускові характеристики, розроблені двоклітні двигуни і двигуни з глибоким пазом. На роторі двоклітного двигуна дві обмотки. Ближче до циліндричної поверхні ротора розмішена пускова обмотка, що має великий активний і малий індуктивний опори. Вона виготовляється із матеріалу з великим питомим опором (манганова латунь,

бронза). Далі від поверхні ротора розмішена робоча обмотка, яка виготовляється із міді і має малий активний та порівняно більший індуктивний опір. У початковий момент пуску, коли ротор ще нерухомий і частота струму в роторі дорівнює частоті мережі, струм у робочій обмотці відстає за фазою від наведеної ЕРС в цій обмотці майже на 90° і тому створює незначний обертовий момент, а струм у пусковій обмотці майже співпадає з наведеною в ній ЕРС, тому створює під час пуску великий обертовий момент. Зі збільшенням частоти обертання ротора частота струму в ньому зменшується, відповідно зменшуються індуктивні опори обох обмоток. При нормальній частоті обертання індуктивні опори обмоток дуже малі, тому струм розподіляється обернено пропорційно до їхніх активних опорів і майже весь струм йде по робочій обмотці. Співвідношення між активним і індуктивним опорами пускової обмотки вибирається таким, щоб забезпечити необхідну кратність пускового моменту при заданій кратності пускового струму.

У двигуні з глибоким пазом для покрашення пускових характеристик використовується явище витіснення струму.

Нижні частини провідника зв’язані з більшою кількістю ліній магнітної індукції потоку розсіяння, ніж верхні. Тому в нижніх частинах провідника наводиться більша ЕРС розсіяння, а у верхніх – менша. Крім того, по всій висоті провідника наводиться однакова ЕРС основним потоком. Тоді струм у будь-якій частині провідника визначається за законом Ома. Цей струм та, відповідно, густина струму будуть тим більші, чим менша ЕРС від потоку розсіяння, тобто будуть зростати по висоті провідника. Таким чином, відбувається витіснення струму у верхні частини провідника, що призводить до збільшення активного та зменшення індуктивних опорів провідника.

РОЗДІЛ 3 СИНХРОННІ МАШИНИ

3.1 Принцип дії та конструкція синхронних машин

Принцип дії однофазного генератора можна пояснити за допомогою макета генератора постійного струму, якщо в ньому півкільця замінити контактними кільцями (рис. 3.1, а).

а б

Рисунок 3.1 – Макети однофазної зворотної конструкції (а) та трифазної прямої конструкції (б) синхронних генераторів

Під час обертання електропровідної рамки А в магнітному полі з кутовою частотою обертання ω, в її провідниках, згідно з законом електромагнітної індукції, створюється змінна ЕРС e_A, миттєве значення якої визначиться, як $e = B\,l\,v\sin\omega t$.

Наявність контактних кілець (замість півкілець, як у генератора постійного струму) дозволяє мати однофазний змінний струм навантаження. Щоб отримати трифазний струм у макеті (рис. 2.1, а) необхідно додати ще дві рамки ***B*** і ***C***, зсунувши їх у просторі на електричний кут в 120°. При цьому в кожній рамці будуть створюватись ЕРС, миттєві значення яких зсунуті в часі на кут 120°.

$$\begin{cases} e_A = E_{макс}\sin\omega t \\ e_B = E_{макс}\sin\left(\omega t - 120^0\right) \\ e_c = E_{макс}\sin(\omega t - 240^0) \end{cases} \qquad (3.1)$$

Враховуючи, що рамки обертаються, для увімкнення трифазного навантаження, у макеті (рис. 3.1, а) варто передбачити чотири контактні кільця (три фази та нейтрал). Така конструкція синхронного генератора називається *зворотною* і може іноді застосовуватись для генераторів невеликої потужності.

У сучасних синхронних генераторах використовується *пряма* конструкція, коли трифазна обмотка якоря (рамки А, В, С на макеті) розташовується на статорі (рис. 3.1, б). В електромагнітному відношенні обидві

конструкції рівнозначні, але з практичних міркувань, перевага надається прямій конструкції, тому що в цьому випадку до ковзного контакту на роторі підводиться потужність збудження, що складає лише 0,3–3 % від номінальної потужності. При зворотній конструкції ковзний контакт довелось би розраховувати на повну потужність машини, але для потужних машин, які мають значні струми і напруги, забезпечити задовільну роботу таких контактів неможливо.

Частота f_1, індукованих в обмотках (рамках) статора, ЕРС, пропорційна числу пар полюсів p та частоті обертання ротора n, тобто $f_1 = np/60$. Таким чином, для отримання ЕРС визначеної частоти число пар полюсів машини і її частота обертання повинні мати чітко визначену залежність між собою. Зокрема, для отримання стандартної частоти $f_1 = 50$ **Гц** за $p = 1$ необхідно обертати ротор з частотою обертання $n = 3000$ **об/хв** ($\omega = 314$ **р/с**), а за $p = 24$ - $n = 125$ **об/хв** ($\omega = 13$ **р/с**).

Якщо до трифазної обмотки увімкнути навантаження, то струми, які при цьому виникнуть, створять обертове магнітне поле якоря. Це поле буде обертатися відносно статора з частотою обертання $n_1 = 60f_1 / p$. Якщо в цю формулу підставити значення частоти f_1, то отримують рівність частот обертання магнітного поля і ротора $n_1 = n$, що і є характерною особливістю синхронної машини, яка зумовила її назву.

При прямій конструкції синхронного генератора основне магнітне поле створюється постійним струмом обмотки ротора і обертається разом з ротором з його ж частотою обертання, тому результуюче магнітне поле, створене загальною дією обмоток статора і ротора, має ту ж частоту обертання.

У зворотному варіанті конструкції синхронного генератора якір розташований на роторі, а індуктор на статорі, тому основне магнітне поле нерухоме. Магнітне поле, що створюється струмами якоря, обертається відносно ротора з частотою обертання n_1 в напрямку, зворотному напрямку обертання ротора, враховуючи, що $n_1 = n$, поле якоря буде нерухомим відносно статора. Таким чином, за обох варіантів конструкції магнітні поля статора і ротора, створюючи результуюче поле, будуть нерухомі відносно одне одного.

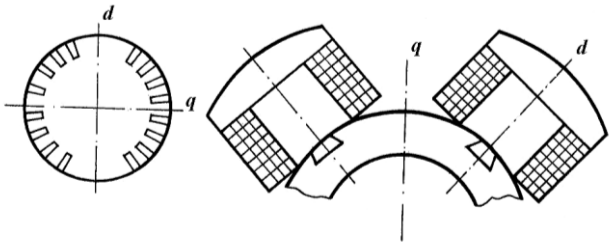
Синхронний генератор, як і будь-яка електрична машина, складається з нерухомої частини – статора, та ротора, який обертається привідним двигуном. Статор синхронної машини, в принципі, не відрізняється від статора асинхронної машини, тобто, складається з корпусу, осердя та обмотки.

Конструктивне виконання статора синхронної машини може бути різним, залежно від призначення та габаритів машини. Наприклад, у багатополюсних машинах великої потужності при зовнішньому діаметрі осердя статора більше ніж 900 мм, пластини осердя виконують із окремих сегментів, які при складанні (шихтовці) утворюють циліндр. Корпуси статора великогабаритних генераторів виконують роз'ємними, що необхідно для зручності транспортування і монтажу цих машин.

Ротори синхронних генераторів можуть мати дві конструкції, що принципово відрізняються одна від другої: явнополюсну та неявнополюсну.

Залежно від первинного (привідного) двигуна (переважно застосовують три види привідних двигунів: парові турбіни, гідротурбіни та двигуни внутрішнього згорання – дизелі) генератори поділяють на *турбогенератори*, *гідрогенератори* та *дизель-генератори*.

Турбогенератор. Турбогенератори приводяться до обертання паровою турбіною і працюють на теплових та атомних електростанціях. Частота обертання таких генераторів доволі висока: на теплових станціях 3 000 об/хв, а на атомних – 1 500 об/хв, тому вони використовуються, відповідно, з однією та двома парами полюсів на роторі неявнополюсної конструкції (рис. 3.2, а).



а б

Рисунок 3.2 – Конструкція ротора неявнополюсного (а) та явнополюсного (б) синхронного генератора

Ротор турбогенератора виконують масивним із цілої поковки високоякісної хромонікелевої чи хромомолібденової сталі, при цьому, за умовами механічної міцності, його діаметр не повинен перевищувати 1,2–1,25 м при довжині до 11 м. На зовнішній поверхні ротора фрезерують пази прямокутної форми, в які укладають обмотку збудження, її лобові частини закріплюють роторними бандажами. Близько третини полюсної поділки обмоткою не займається, і ця частина ротора утворює так званий великий зуб, через який замикається більша частина магнітного потоку генератора. Виводи від обмотки збудження приєднують до контактних кілець на роторі.

Уздовж осі ротора по всій довжині висвердлюють центральний отвір, який слугує для дослідження матеріалу центральної частини ротора і для розвантаження поковки від небезпечних внутрішніх напруг.

Гідрогенератор. Частота обертання гідротурбіни, яка приводить до обертання гідрогенератор, залежно від потужності турбіни та напору води, складає від 50 об/хв до 600 об/хв. Для того щоб при таких частотах обертання отримати змінну напругу частотою в 50 Гц, гідрогенератори повинні мати кілька десятків полюсів. Значна кількість полюсів вимагає і відповідного діаметра явнополюсного ротора, який у потужних гідрогенераторів складає близько 12 м при довжині осердя статора до 3 м.

Таке співвідношення діаметра та довжини вимагає вертикального розташування гідрогенераторів у просторі і має пов’язані з цим конструктивні особливості. Важливим вузлом у них є упорний підшипник ковзання чи підп’ятник, що утримує вагу частин ротора і турбіни, які обертаються, а також, сприймає тиск води на лопатки турбіни.

Для сприйняття радіальних зусиль, що діють на ротор, на валу гідрогенератора установлюють один або два напрямних підшипники, один з них біля жорсткого фланцевого з’єднання валів генератора і турбіни.

Механічна міцність різних деталей гідрогенераторів розраховується за так званою руйнівною частотою обертання, яка в 2–3 рази більша від номінальної і може спостерігатися в результаті розгону ротора при аварійному відмиканні генератора від мережі.

Дизель-генератор. Дизель-генератор приводиться до обертання двигуном внутрішнього згорання. Як і гідрогенератори, дизель-генератори мають явнополюсну конструкцію ротора і розраховуються на частоту обертання 600–1 500 об/хв.

Дизель-генератори, порівняно з турбо- та гідрогенераторами, мають незначну потужність до 100 кВА і використовуються на пересувних електростанціях, для живлення привідних електродвигунів тепловозів, кораблів та ін.

Більшість синхронних машин мають електромагнітне збудження. Джерелами постійного струму для обмоток збудження є спеціальні системи, до яких висувають низку вимог:

– надійне і стійке регулювання струму збудження в будь-яких режимах роботи машини;

– достатню швидкодію, для чого застосовують форсування збудження, тобто швидке збільшення напруги збудження до найбільшого значення, що складає (1,8–2) номінальної напруги збудження, форсування застосовується для підтримки стійкої роботи у разі аварії та в процесі її ліквідації;

– швидке гасіння магнітного поля, тобто зниження струму збудження до нуля без значного підвищення напруги на обмотці збудження.

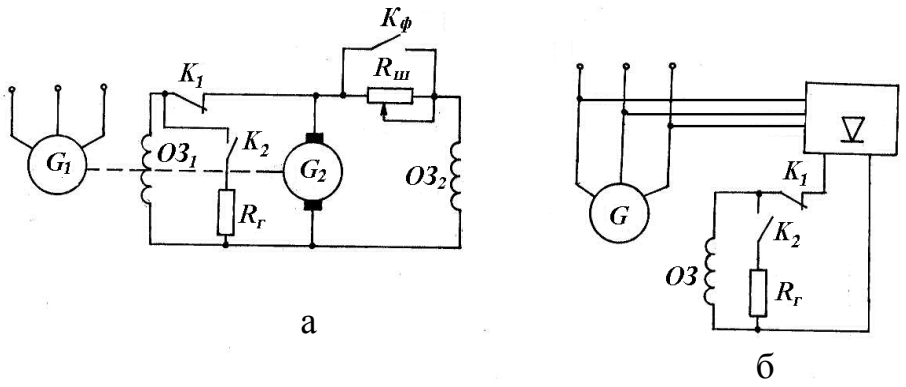


Рисунок 3.3 – Електромашинна система збудження (а)
та система з самозбудженням (б) синхронних генераторів

Для збудження синхронних машин застосовується кілька систем. Найпростішою з них є електромашинна система збудження з генератором постійного струму, який називають «*збуджувач»* (рис. 3.3, а).

Збуджувач зазвичай розташовується на валу синхронного генератора і має обмотку паралельного або незалежного збудження, джерелом живлення якої є також генератор постійного струму (*підзбуджувач*). На (рис. 3.3, а) зображена схема збудження, де збуджувач має паралельне збудження, яке дозволяє форсування збудження синхронного генератора контактором $\boldsymbol{K_ф}$, що

шунтує опір в колі збудження збуджувача. Гасіння магнітного поля (рис. 3.3) здійснюється в такій послідовності: вмикається контактор K_2 (шунтують опором $R_г$, величина якого приблизно в п'ять раз більша, ніж опор обмотки збудження, саму обмотку), потім розмикається контактор K_1 і енергія, що накопичується в обмотці збудження, гаситься на резисторі $R_г$, що дозволяє запобігти виникненню перенапруги.

Останнім часом замість електромашинного збудження застосовують вентильні системи з діодами чи тиристорами. Ці системи можуть бути побудовані на великі потужності і є більш надійними, ніж електромашинні. У вентильній системі з самозбудженням (рис. 3.3, б) для збудження використовується енергія, що виробляється обмоткою статора генератора. Принцип самозбудження тут не відрізняється від принципу самозбудження генераторів постійного струму.

Вентильна система може мати і незалежне збудження від збуджувача – синхронного генератора, ротор якого укріплений на валу основного генератора і виконує роль індуктора, тоді струм збудження основного генератора від збуджувача через випрямляч подається з обмотки статора на контактні кільця. Різновидом вентильного збудження є безщіткова система збудження. У цьому випадку на валу основної синхронної машини розміщують якір збуджувача змінного струму з трифазною обмоткою. Змінна напруга цієї обмотки за допомогою випрямляча, закріпленого на валу машини, перетворюється в постійну напругу і безпосередню, без контактних кілець, подається на обмотку збудження головного генератора. Обмотка збудження збуджувача розташована на статорі і отримує постійний струм від незалежного джерела.

3.2 Реакція якоря за різного характеру навантаження синхронних генераторів

Як відомо, основний магнітний потік синхронного генератора створюється постійним струмом, що протікає по обмотці збудження. У режимі холостого ходу в машині наявний лише один основний потік Φ_0. При навантаженні струм, протікає по обмотці якоря (статора), створює магнітне поле – поле якоря і магнітний потік якоря Φ_a. Дія цього поля, поля якоря, на основне поле машини називається *реакцією якоря.* Аналогічний процес спостерігається також у машині постійного струму і розглядався раніше. На відміну від реакції якоря, що діє в генераторі постійного струму і залежить лише від величини навантаження, в синхронних генераторах реакція якоря залежить не лише від величини навантаження, а від його характеру. Розглядаючи реакцію якоря трифазного синхронного генератора, виходять з того, що всі три фази генератора навантажені симетрично, тобто в усіх трьох фазах створюються однакові ЕРС і протікають однакові струми, зсунуті один відносно одного на 120°. За цих умов реакцію якоря можна розглядати тільки для якої-небудь однієї фазної обмотки в задану мить часу, найпростіше взяти ту мить, коли струм у фазі досягає максимуму ($i_1 = I_{макс}$) – в цьому випадку вісь фази співпадає з віссю результуючої МРС статора.

У загальному випадку навантаження синхронного генератора змішане (активно-індуктивне чи активно-ємкісне). Але, розглядаючи реакцію якоря, простіше розглянути крайні випадки: $\psi = 0$ – активне навантаження, ЕРС і струм співпадають; $\psi = 90°$ – індуктивне навантаження, ЕРС випереджає струм на $90°$; $\psi = -90°$ – ємкісне навантаження, струм випереджає ЕРС на кут $90°$. Найбільш наглядно пояснюється реакція якоря за допомогою векторних діаграм (рис. 3.4). Під час побудови таких діаграм варто мати на увазі, що вектор ЕРС $\dot{E}_0$ відстає від основного магнітного потоку $\dot{\Phi}_0$, що створює, на кут в $90°$.

Активне навантаження ($\psi = 0$). При активному навантаженні струм навантаження $\dot{I}_1$ співпадає з ЕРС $\dot{E}_0$, під дією якої він виникає, і тому направлений по поперечній осі генератора. Цей же напрям має і потік реакції якоря Φ_{aq}, оскільки співпадає по напряму з МРС $\dot{F}_1$, а також, зі струмом $\dot{I}_1$. Враховуючи це, можна зробити висновок, що при активному навантаженні реакція якоря синхронного генератора направлена по поперечній осі і практично не відрізняється від реакції якоря, що спостерігається в генераторі постійного струму, тобто розмагнічує набігаючий і підмагнічує збігаючий край полюса, викривляючи основне поле. Оскільки магнітне поле машини насичене, то результуюче магнітне поле дещо знижується. Пояснюється це тим, що розмагнічування набігаючих країв полюса і ділянок зубцевого шару над ним відбувається безперешкодно, а підмагнічування збігаючого краю обмежується насиченням цих елементів магнітного кола. Ослаблення магнітного поля, в результаті поперечної реакції якоря, призводить до зниження ЕРС машини $\dot{E}_0$.

Індуктивне навантаження ($\psi = 90°$). При суто індуктивному навантаженні струм статора $\dot{I}_1$, при ємкісному навантаженні, випереджує ЕРС $\dot{E}_0$ на кут $\psi = 90°$(рис. 3.4, б). Це приводить до появи магнітного потоку реакції якоря $\dot{\Phi}_{ad}$, направленого на зустріч основному потоку машини по осі d. Отже, реакція якоря синхронного генератора при суто індуктивному навантаженні має *поздовжньо-розмагнічувальну дію.* На відміну від реакції якоря при активному навантаженні, у цьому випадку, магнітне поле не викривляється.

Ємнісне навантаження ($\psi = -90°$). Оскільки струм $\dot{I}_1$, при ємнісному навантаженні, випереджує ЕРС $\dot{E}_0$ на 90° (рис. 3.4, в), то потік реакції якоря $\dot{\Phi}_{ad}$, що цим струмом створюється, співпадає з основним потоком генератора. Таким чином, при ємнісному навантаженні реакція якоря має *поздовжньо-намагнічувальну дію*. Як і в попередньому випадку, магнітне поле при цьому не викривляється.

Змішане навантаження. При змішаному навантаженні (частіше це, звичайно, активно-індуктивне навантаження) струм статора $\dot{I}_1$ зсунутий відносно ЕРС $\dot{E}_0$ на кут ψ_1 (рис. 3.4, г) на цей же кут виявиться зсунутим, і потік реакції якоря Φ_a, який, звичайно, розкладають на складові по поздовжній $\Phi_{ad} = \Phi_a \sin\psi_1$, та поперечній $\Phi_{ad} = \Phi_a \cos\psi_1$ осях. І при активно-індуктивному і при активно-ємнісному навантаженнях складова потоку Φ_{ad} відстає від

основного потоку Φ_0, а складова Φ_{ad} при активно-індуктивному навантаженні направлена на зустріч, а при активно-ємнісному – співпадає з основним потоком Φ_0,розмагнічуючи та підмагнічуючи його, відповідно.

3.3 Рівняння синхронних машин

Напруга на затискачах генератора, що працює під навантаженням, відрізняється від напруги цього генератора в режимі х.х. Це пояснюється впливом низки причин: реакцією якоря, магнітним потоком розсіювання, падінням напруги на активному опорі обмотки статора.

Зазвичай при навантаженні у магнітному колі машини обертається результуючий магнітний потік, але щоб простіше зрозуміти вплив усіх факторів, що діють під час роботи навантаженої машини, розглядають дію складових результуючого потоку окремо.

У навантаженому *явнополюсному* синхронному генераторі результуючий магнітний потік створюється такими МРС: основна МРС, що створюється обмоткою збудження $\dot{F}_0$, МРС реакції якоря по поздовжній осі $\dot{F}_{ad}$ та поперечній осі $\dot{F}_{aq}$, і магнітним потоком розсіювання $\dot{\Phi}_0$. Магнітні потоки, кожної з цих МРС, і потік розсіювання створюють в обмотці статора кожен свою ЕРС.

1. Основний магнітний потік $\dot{\Phi}_0$, зчіплюючись з обмоткою статора, індукує в ній основну ЕРС генератора $\dot{E}_0$.

2. Магнітний потік реакції якоря по повздовжній осі Φ_{ad} створює в обмотці статора ЕРС.

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}, \tag{3.2}$$

де $I_d = I_1 \sin\psi_1$ – реактивна складова струму навантаження (проєкція струму статора на повздовжню ось машини); X_{ad} – індуктивний опір реакції якоря по повздовжній осі генератора, що характеризує рівень впливу реакції якоря по поздовжній осі машини на роботу синхронного генератора: отже, при насиченій магнітній системі потік реакції якоря менший, ніж при ненасиченій, тому що Φ_{ad} майже повністю замикається стальними ділянками магнітопроводу через мінімальний повітряний зазор, а тому опір цьому потоку значно збільшується, а індуктивний опір X_{ad}, відповідно, зменшується.

3. Магнітний потік реакції якоря по поперечній осі машині Φ_{aq} створює в обмотці статора ЕРС

$$\dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq}, \tag{3.3}$$

де $I_q = I_1 \sin\psi_1$ – реактивна складова струму навантаження (проєкція струму статора на поздовжню вісь машини); X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поперечній осі машини, який, на відміну від X_{ad}, не залежить від насичення магнітної системи, тому що потік Φ_{aq} замикається через максимальний повітряний зазор явнополюсного ротора, тобто в міжполюсному просторі ротора.

4. Магнітний потік розсіювання $\boldsymbol{\Phi_\sigma}$ створює в обмотці статора ЕРС розсіювання

$$\dot{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{\sigma}} = -j\dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{X}_{\boldsymbol{\sigma}}, \tag{3.4}$$

де $\boldsymbol{X_\sigma}$ – індуктивний опір розсіювання, аналогічний індуктивному опору $\boldsymbol{X_1}$ обмоток трансформатора та асинхронного двигуна.

5. Струм обмотки статора $\dot{\boldsymbol{I}}_1$ створює активне падіння напруги, на опорі обмотки $\boldsymbol{R_1}$

$$\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{a1}} = \dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{R}_1 \tag{3.5}$$

Згідно з другим законом Кірхгофа, враховуючи названі вище ЕРС та падіння напруги, складають рівняння.

$$\dot{\boldsymbol{U}}_1 = \sum \dot{\boldsymbol{E}} - \dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{R}_1 = \dot{\boldsymbol{E}}_0 + \dot{\boldsymbol{E}}_{ad} + \dot{\boldsymbol{E}}_{aq} + \dot{\boldsymbol{E}}_\sigma - \dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{R}_1 \quad . \tag{3.6}$$

Тут $\sum \dot{\boldsymbol{E}}$ – геометрична сума усіх ЕРС, наведених в обмотці статора результуючим магнітним полем машини.

Активний опір фазних обмоток статора $\boldsymbol{R_1}$ у синхронних машин середньої та великої потужності незначний і тому, при номінальному навантаженні, активним падінням напруги $\dot{\boldsymbol{U}}_{\boldsymbol{a1}}$ зазвичай нехтують, і рівняння (3.6) записують, як

$$\dot{U}_1 \approx \sum \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma \, . \tag{3.7}$$

Рівняння (3.6) та (3.7) становлять *рівняння ЕРС явнополюсного синхронного генератора.*

Розглядаючи рівняння ЕРС неявнополюсної машини, варто мати на увазі, що індуктивні опори реакції якоря по поздовжній та поперечній осях практично однакові:

$$\boldsymbol{X_{ad}} \approx \boldsymbol{X_{aq}} \approx \boldsymbol{X_a}, \tag{3.8}$$

де $\boldsymbol{X_a}$ – індуктивний опір реакції якоря статорної обмотки. З урахуванням цього немає потреби розділяти реакцію якоря такої машини на складові по осях, а отже ЕРС викликана магнітним полем реакції якоря, буде виражена як

$$\dot{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{a}} = j\dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{X}_{\boldsymbol{a}} \, . \tag{3.9}$$

Потік реакції якоря і магнітний потік розсіяння створюється одним струмом $\dot{\boldsymbol{I}}_1$, тому можна об'єднати індуктивні опори $\boldsymbol{X_a}$ і $\boldsymbol{X_\sigma}$, розглядаючи їх як єдиний опір

$$\boldsymbol{X_c} = \boldsymbol{X_a} + \boldsymbol{X_\sigma}, \tag{3.10}$$

де $\boldsymbol{X_c}$ – синхронний опір неявнополюсної машини.

Відповідно і суму ЕРС $\dot{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{a}}$ та $\dot{\boldsymbol{E}}_{\boldsymbol{\sigma}}$ варто розглядати як одну *синхронну ЕРС*

$$\dot{\boldsymbol{E}}_c = \dot{\boldsymbol{E}}_a + \dot{\boldsymbol{E}}_\sigma = -j\dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{X}_a - j\boldsymbol{I}_1 \boldsymbol{X}_\sigma = -j\dot{\boldsymbol{I}}_1 \boldsymbol{X}_c \, . \tag{3.11}$$

З урахуванням викладеного, *рівняння ЕРС неявнополюсного синхронного генератора* буде мати вигляд

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - \dot{I}_1 R_1 = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_c - \dot{I}_1 R_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_c - \dot{I}_1 R_1 , \qquad (3.12)$$

або, нехтуючи $\dot{I}_1 R_1$

$$\dot{U}_1 \approx \sum \dot{E} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_1 X_c = \dot{E}_0 + \dot{E}_c . \qquad (3.13)$$

3.4 Векторні діаграми та характеристики синхронних генераторів

Як і для інших електричних машин змінного струму, для синхронних генераторів будують векторно-потенційні діаграми, основою для яких є рівняння (3.6) та (3.12). При побудові цих діаграм вважають відомими такі величини: ЕРС генератора в режимі НХ. E_0, струм навантаження I_1, кут між ЕРС та струмом $\cos \psi_1$, поздовжній X_{ad} і поперечний X_{aq} реактивні опори реакції якоря, активний опір фазної обмотки статора R_1.

Векторно-потенційні діаграми зазвичай будують на одну фазу і без урахування насичення магнітного поля, тому такі діаграми відображають лише якісний бік явищ.

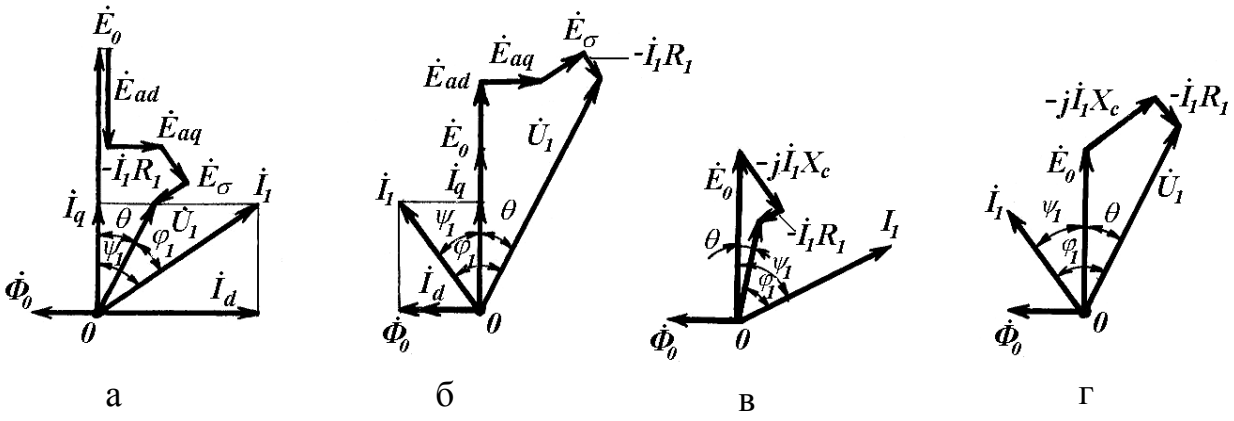


Рисунок 3.4 – Векторні діаграми явнополюсного (а), (б) та неявнополюсного (в), (г) синхронних генераторів при активно-індуктивному (а), (в) і активно-ємнісному (б), (г) навантаженнях

Побудову векторно-потенційних діаграм (рис. 3.4) розпочинають з того, що довільно вказують напрям основного магнітного потоку Φ_0. На прямий кут відстає від потоку ЕРС E_0, яку він створює. Під кутом ψ_1 вправо (рис. 3.4, а, в), або вліво (рис. 3.4 б, г), залежно від характеру навантаження, відкладається струм навантаження I_1 який потім розкладається на повздовжню, $I_d = I_1 \sin\psi_1$, та поперечну, $I_q = I_1 \cos\psi_1$, складові (рис. 3.4, а, б). Далі, з кінця вектора ЕРС E_0, відкладаються вектори ЕРС $E_{ad} = -jI_d X_{ad}$, $E_{aq} = -jI_q X_{aq}$, $E_\sigma = -jI_1 X_\sigma$ для явнополюсного синхронного генератора (рис. 3.4, а, б) і $E_c = -jI_1 X_c$ для неявнополюсного (рис. 3.4, в, г), а також, активне падіння напруги $U_{a1} = -I_1 R_1$. З'єднуючи точку 0 – початок координат з кінцем вектора U_{a1}, отримують вектор напруги U_1, що наявне на затискачах генератора.

Побудовані векторні діаграми дають можливість зробити такі висновки: причиною зміни напруги навантаженого генератора є поздовжня складова магнітного потоку реакції якоря, яка створює ЕРС E_{ad}; під час роботи генератора на активно-індуктивне навантаження, тобто зі струмом I_1, що відстає по фазі від ЕРС E_0, напруга U_1 на затисках обмотки статора генератора при збільшенні навантаження знижується, що поясняється розмагнічувальною дією реакції якоря; під час роботи на активно-ємнісне навантаження (зі струмом, що випереджує по фазі ЕРС E_0) напруга U_1, зі збільшенням навантаження, збільшується, що пояснюється підмагнічувальною дією реакції якоря (рис. 3.4, б, г).

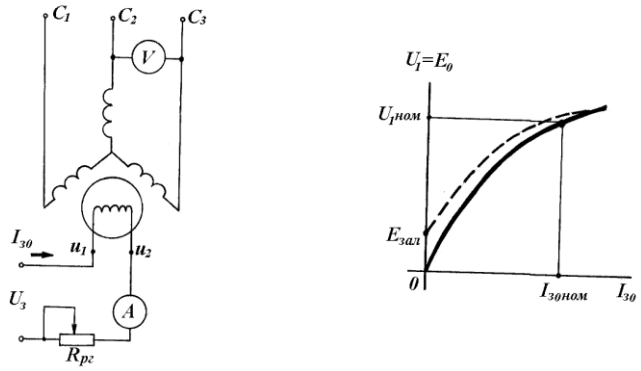


Рисунок 3.5 – Схема проведення досліду та характеристики холостого ходу синхронного генератора

Властивості синхронного генератора визначаються характеристиками холостого ходу, короткого замикання, зовнішніми та регулювальними.

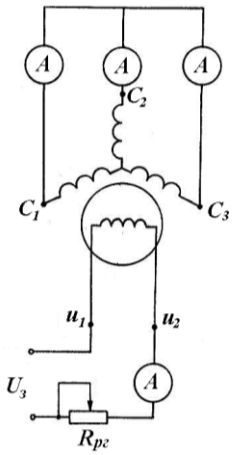
Характеристики холостого ходу. Ці характеристики становлять залежність на виході генератора в режимі НХ. $U_1 = E_0$ від струму збудження $I_{з0}$ при $n = const$. Такі характеристики знімаються за схемою (рис. 3.5) і становлять: теоретичну криву намагнічування для матеріалів, з яких складається магнітне коло генератора – суцільна крива на (рис. 3.5) та показану пунктирною лінією дослідну характеристику холостого ходу, що зміщена вліво, від теоретичної кривої: при струмі $I_{з0} = 0$ ЕРС не дорівнює 0, тому що наявне ЕРС $E_{зал} = (2 \div 3)\ \% U_{1\text{ном}}$, створена залишковим магнетизмом попереднього намагнічування.

Струм збудження $I_{з0ном}$ (рис. 3.5) – це такий струм збудження, який при неробочому ході створює номінальну напругу $U_{1ном}$.

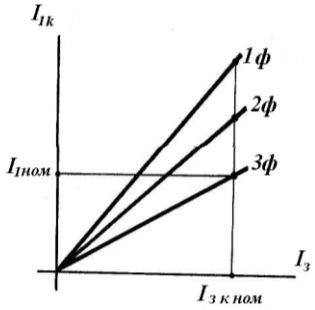
Враховуючи, що магнітні системи усіх синхронних генераторів виконують з одних і тих же матеріалів, їхні характеристики холостого ходу (побудовані у відносних одиницях $E_{0*} = f(I_{з*})$, де $E_{0*} = = E_0/U_{1ном}$, а $I_{з*} = I_з/I_{зном}$) будуть виражатись кривою, що називається *нормальною характеристикою НХ*:

$I_{з*}$	0	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5
$E_{*гг}$	0	0,53	1	1,23	1,30	–	–	–
$E_{*тг}$	0	0,58	1	1,21	1,33	1,4	1,45	1,51

Тут $E_{*гг}$ – ЕРС гідрогенератора, $E_{*тг}$ – ЕРС турбогенератора.



а



б

Рисунок 3.6 – Схема проведення досліду (а) та характеристики (б) короткого замикання синхронного генератора

Характеристики короткого замикання. Для трифазного генератора практичне значення має характеристика трифазного КЗ. Одно- та двофазне КЗ проводять, щоб порівняти струми різних КЗ. Досліди КЗ проводять, закоротивши одну, дві чи три фази (рис. 3.6, а) і, обертаючи ротор з частотою обертання $n = n_{ном}$, поступово збільшують струм збудження так, щоб струм у статорі не перевищував номінальний струм більше, ніж на 25 % ($I_{1к} < 1.25\, I_{1ном}$.). При цьому ЕРС статора $E_к$ буде в кілька разів менша, ніж у робочому режимі генератора, і, відповідно, основний магнітний потік також буде доволі малим, а магнітна система генератора ненасиченою. З цієї причини характеристики КЗ будуть становити прямі лінії, що проходять через початок координат (рис. 3.6, б).

Як уже відзначалось, активний опір обмотки статора R_1 порівняно з її індуктивним опором незначний, тому, знехтувавши ним ($R_1 \approx 0$), можна вважати струм КЗ чисто індуктивним, а отже, реакція якоря при КЗ поздовжньо-розмагнічувальна. Саме цим і пояснюється незначний струм трифазного КЗ, порівняно з одно- та двофазними (рис. 3.6, б). При трифазному КЗ розмагнічується уся магнітна система, тоді як при інших – лише її частина (1/3 при однофазному і 2/3 при двофазному), а це також зменшує ЕРС $E_к$ і відповідно струм КЗ.

У режимі дослідного КЗ, якщо знехтувати активним опором обмотки статора, відсутній і активний струм ($I_q = 0$), тому рівняння (3.7) для цього режиму буде мати вигляд:

$$0 \approx E_к + E_{ad} + E_\sigma. \qquad (3.14)$$

Із (3.14) випливає, що ЕРС $E_к$, яка створюється в обмотці статора при КЗ, урівноважується падінням напруги на індуктивному опорі розсіювання $jI_{1к}X_1$ та розмагнічувальною дією реакції якоря $jI_{1к}X_{ad}$ (при $I_q = 0$; $I_d = I_{1к}$).

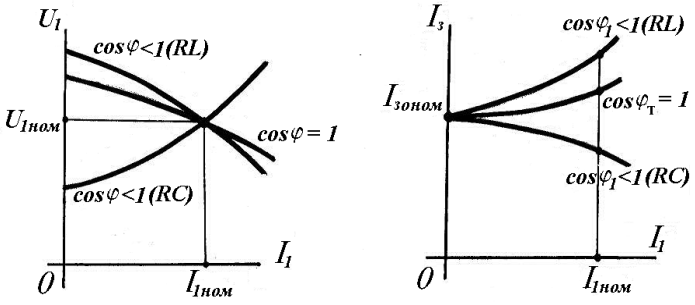
Струм збудження, що в режимі трифазного КЗ створює номінальний струм в обмотці статора $I_{1ном}$, на осі абсцис (рис. 3.6, б) позначений, як $I_{зк\ ном}$. Відношення струмів збудження, того, що при НХ створює номінальну напругу, $I_{зо\ ном}$, та того, що при КЗ створює номінальний струм, $I_{зк\ ном}$, називають відношенням короткого замикання генератора (далі – ***в.к.з.***), що є одним з важливих параметрів синхронної машини

$$в.к.з. = I_{зо\ ном} / I_{зк\ ном}. \qquad (3.15)$$

Для турбогенераторів ***в.к.з. = 0.4 ÷ 0.7;*** для гідрогенераторів ***в.к.з. = 1.0 ÷ 1.4***. Величина ***в.к.з.*** має практичне значення при оцінці властивостей синхронної машини: машини з малим ***в.к.з.*** менш стійкі при паралельній роботі з мережею, мають значні коливання напруги при зміні навантаження, але такі машини мають менші габарити і, відповідно, дешевші, ніж машини зі значним ***в.к.з.***

Зовнішні характеристики. Ці характеристики становлять залежність напруги на затискачах обмотки статора від струму навантаження: $U_1 = f(I_1)$ при $I_з = const$, $\cos\varphi_1 = const$, $n = const$.

Варто мати на увазі, що $I_з$ та $\cos\varphi_1$ постійні лише в межах заданого характеру навантаження.



а б

Рисунок 3.7 – Зовнішні (а) та регулювальні (б) характеристики синхронного генератора

На (рис. 3.7, а) зображені зовнішні характеристики, що відповідають різним, за характером, навантаженням синхронного генератора.

При *активному навантаженні* ($\cos\varphi_1 = 1$) зменшення струму, від номінального до нуля, супроводжується незначним зростанням напруги U_1, що пояснюється зменшенням падіння напруги на активному опорі обмотки статора і послабленням розмагнічувальної дії реакції якоря по поперечній осі.

При *активно-індуктивному* навантаженні ($\cos\varphi_1 < 1$, ***RL***) зростання напруги U_1 при скиданні навантаження більш значне, ніж у попередньому випадку, тому що при такому навантаженні ще знижується і розмагнічувальна дія реакції якоря по поздовжній осі.

При *активно-ємнісному* навантаженні ($\cos\varphi_1 < 1$, ***RC***) скидання навантаження викликає зменшення напруги завдяки зниженню підмагнічувальної дії реакції якоря по поздовжній осі.

Зміна напруги синхронного генератора, при скиданні номінального навантаження при $I_з = const$ і $n = const$, називається *номінальною зміною (підвищенням напруги (%))*:

$$\Delta U_{ном} = (E_o - U_{1ном}) / U_{1ном}\ 100. \qquad (3.16)$$

При активно-ємнісному навантаженні скидання навантаження викликає зниження напруги і тому $\Delta U_{ном}$ від'ємне.

У процесі експлуатації синхронного генератора напруга U_1 при коливанні навантаження підтримується незмінною завдяки швидкодіючим автоматичним регуляторам. Щоб запобігти пошкодженню ізоляції обмотки статора, $\Delta U_{ном}$ не повинна перевищувати 50 %.

Регулювальні характеристики. Регулювальні характеристики показують, як потрібно змінювати струм збудження генератора після зміни навантаження, щоб напруга на затискачах залишалась незмінно рівною номінальній: $I_з = f(I_1)$ при $U_1 = U_{1ном} = const$, $n = const$ і $\cos\varphi_1 = const$. На (рис. 3.7, б) зображені ці характеристики для різних видів навантаження. При *активному навантаженні* ($\cos\varphi_1 = 1$) збільшення струму навантаження I_1 супроводжується зменшенням напруги U_1, для підтримання якої незмінною, варто збільшувати струм збудження. *Активно-індуктивний* характер навантаження ($\cos\varphi_1 < 1$, RL) викликає більш різке падіння напруги U_1 (рис. 3.7, а), тому більше, ніж у попередньому випадку, необхідно підвищувати струм збудження, щоб підтримати $U_1 = U_{1ном}$ незмінною. При *активно-ємнісному* навантаженні ($\cos\varphi_1 < 1$, RC) збільшення навантаження викликає підвищення напруги на затискачах генератора, тому, щоб підтримати її незмінною, необхідно знижувати струм збудження.

3.5 Втрати і ККД синхронних машин

Перетворення енергії в синхронній машині, як у будь-якій машині, пов'язано з втратами енергії. Усі види втрат у синхронній машині поділяють на основні і додаткові.

Основні втрати в синхронній машині складаються з електричних втрат – втрат в обмотці статора, втрат на збудження, магнітних і механічних втрат. Електричні втрати в обмотці статора можуть бути визначені згідно, як $P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1$, де R_1-активний опір однієї фази обмотки статора при розрахунковій робочій температурі. Варто зазначити, що враховуючи незначну величину активного опору, цими втратами доволі часто нехтують, особливо під час визначення розрахункових величин, що не потребують значної точності.

Втрати на збудження:

– при збудженні від окремого збуджувального пристрою

$$P_з = I_з^2 R_з + \Delta U_щ I_з, \tag{3.17}$$

де $R_з$ – опір обмотки збудження, зведений до робочої температури;

$\Delta U_щ = 2$ В – падіння напруги в контакті «щітка-кільце»;

– при збудженні від генератора постійного струму, з'єднаного з валом синхронної машини

$$P_з = (I_з^2 R_з + \Delta U_щ I_з)/\eta_з, \tag{3.18}$$

де $\eta_з$ – ККД збуджувача; в цьому випадку втрати на збудження дорівнюють підведеній до збуджувача потужності, тобто, P_1 збуджувача.

Магнітні втрати синхронної машини відбуваються в осерді статора, яке увесь час перемагнічується обертовим магнітним полем.

Ці втрати складаються із втрат на гістерезис $P_{гіст}$ на вихреві струми $P_{в.с.}$ і можуть бути розраховані аналогічно до магнітних втрат трансформатора.

Механічні втрати дорівнюють сумі втрат на тертя та вентиляцію, як і у

асинхронному двигуні і при самовентиляції можуть бути розраховані (приблизно).

$$P_{мех} = 3.68p(\frac{v_2}{40})^3\sqrt{10^{-3}l_1} \quad (3.19)$$

де

$$v_2 = \pi(D_1 - 2\delta)n / 60 - \quad (3.20)$$

– лінійна швидкість на поверхні полюсного наконечника ротора, м/с; l_1 – конструктивна довжина осердя статора, мм; D_1 – діаметр розточки осердя статора, м, δ – повітряний зазор, м.

Додаткові втрати в синхронних машинах поділяють на два види: пульсаційні втрати в полюсних наконечниках ротора та втрати при навантаженні.

Додаткові пульсаційні втрати $P_п$ в полюсних наконечниках ротора зумовлені пульсацією магнітної індукції в зазорі через зубчасту внутрішню поверхню статора.

Додаткові трати при навантаженні $P_{дод}$ в синхронних машинах визначаються, як і в інших електричних машинах, у відсотках від підведеної потужності двигуна або від корисної потужності генератора. Для синхронних машин потужністю до 1 000 кВт додаткові втрати при навантаженні приймають рівними 0,5 %, а для машин потужністю більше 1 000 кВт – 0,25÷0,4 %.

Загальні втрати синхронної машини

$$\Sigma P = P_{e1} + P_з + P_{мех} + P_{маг} + P_п + P_{дод}\,. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт корисної дії:

Для синхронного генератора

$$\eta_г = 1 - \Sigma P / (P_{1ном} + \Sigma P), \quad (3.22)$$

де

$$P_{1ном} = m_1 U_{1ном} I_{1ном} \cos\varphi \quad (3.23)$$

– активна потужність, що відбирається від генератора при номінальних фазних струмі $I_{1ном}$ та напрузі $U_{1ном}$ (при номінальному навантаженні).

ККД синхронної машини залежить від величини навантаження ($\beta = P_2 / P_{ном}$) і від його характеру ($\cos\varphi_1$ для генераторів). Графік цієї залежності аналогічний графіку ККД трансформатора.

3.6 Кутові характеристики та електромагнітна потужність синхронних машин

Якщо знехтувати електричними втратами P_{e1} (що цілком допустимо для машин великої та середньої потужності), то виявляється, що потужність, яку віддає генератор до мережі дорівнює електромагнітній

$$P_2 \approx P_{ем} = m_1 \cdot E_0 \cdot I_1 \cdot \cos \psi_1. \qquad (3.24)$$

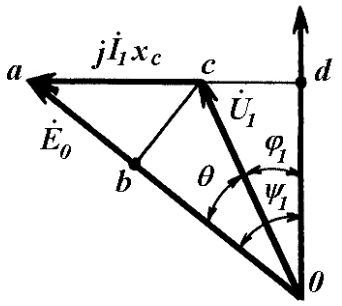


Рисунок 3.8 – До визначення електромагнітної потужності неявнополюсного синхронного генератора

Для дослідження паралельної роботи ця формула не достатньо зручна, тому що, як відзначалось раніше, потужність, що віддається до мережі, цілком залежить від часового зсуву між ЕРС E_0 та напругою мережі U_1 (або просторового між осями полюсів поля ротора та статора), тобто від кута вильоту ротора θ. Щоб вивести залежність електромагнітної потужності від кута θ, користуються спрощеною векторно-потенційною діаграмою явнополюсного генератора. На (рис. 3.8) подана ця діаграма для активно-індуктивного навантаження. Із подібності трикутників ado та abc випливає, що кут acb дорівнює ψ_1, тому: $bc = I_1 \cdot x_c \cdot \cos\psi_1 = U_1 \cdot \sin\theta$. З цього рівняння визначається $I_1 \cdot \cos \psi_1 = U_1 \cdot \sin\theta / x_c$ і, після підстановки його в (3.24), отримують залежність електромагнітної потужності від кута θ:

$$P_{ем} = (m U_1 E_0 / x_c) \sin\theta. \qquad (3.25)$$

З цієї формули випливає, що електромагнітна потужність синхронної машини пропорційна напрузі мережі U_1, ЕРС генератора E_0, зумовленій МРС обмотки збудження, та синусу кута θ. Враховуючи незмінність напруги мережі U_1, та ЕРС E_0, при незмінному струмі збудження, електромагнітна потужність змінюється, при зміні кута θ., за синусоїдальним законом. Розділивши $P_{ем}$ (3.25) на кутову частоту обертання, отримують значення електромагнітного момента, що діє на ротор генератора:

$$M_{ем} = (m_1 U_1 E_0 / \omega x_c) \sin \theta. \qquad (3.26)$$

Отримана формула електромагнітного моменту вказує на суттєву перевагу синхронної машини над асинхронною – пряма залежність електромагнітного моменту від напруги мережі ($M_{ем} \equiv U_1$), тоді як у асинхронної машини ця залежність квадратична ($M_{ем} \equiv U_1^2$).

На відміну від асинхронних машин та машин постійного струму, де частота обертання залежить від навантаження на валу, і тому будуються

механічні характеристики – $\omega = f(M_{ем})$, для синхронних машин будують *кутові характеристики* $M_{ем} = f(\theta)$ (рис. 3.9) та (рис. 3.11, б).

Враховуючи синусоїдальність кутової характеристики, найбільшого значення електромагнітні момент та потужність $M_{макс}(P_{макс})$ досягають при $\theta = 90°$, коли $\sin\theta = 1$, отже $M_{макс} = m_1 U_1 E_0 / \omega x_c$;

$$P_{макс} = m_1 U_1 E_0 / x_c. \qquad (3.27)$$

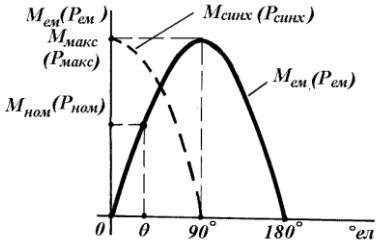
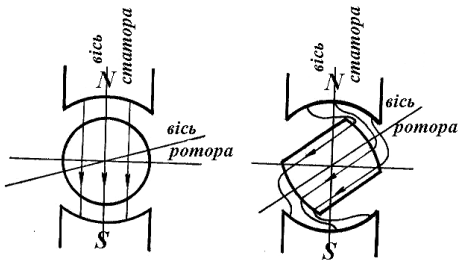


Рисунок 3.9 – Електромагнітний та синхронізуючий момент(потужність) неявнополюсного синхронного генератора

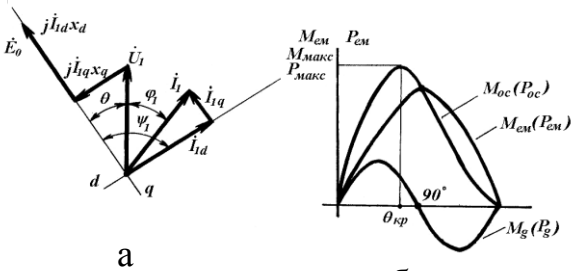
При номінальному навантаженні кут $\theta_{ном} = 20 \div 35°$. Статична перевантажувальність неявнополюсного генератора, тобто відношення максимального моменту до номінального $\lambda = M_{макс} / M_{ном}$ складає відповідно 1,75÷2,90.

Як видно з (3.27), максимальні потужність та момент синхронного генератора зворотно пропорційні індуктивному опорові x_c, для зниження x_c і, відповідно, підвищення $M_{макс}$ $(P_{макс})$, повітряний зазор у машині виконують значно більшим, ніж це необхідно з конструктивних міркувань (щоб ротор не зачіплявся за статор).



а б

Рисунок 3.10 – Для магнітних ліній поля в неявнополюсній (а) та явнополюсній (б) машинах



а б

Рисунок 3.11 – Векторно-потенційна діаграма (а) та кутові характеристики (б) явнополюсного синхронного генератора

Електромагнітні процеси, які відбуваються в синхронній явнополюсній машині, до деякої міри, відрізняються від процесів, що наявні в неявнополюсній машині, це можна пояснити, скориставшись (рис. 3.10, а). Лінії магнітного поля статора замикаються найкоротшим шляхом через неявнополюсний ротор незалежно від положення його осі відносно осі поля статора. У той же час магнітні силові лінії поля статора витягуються і намагаються повернути явнополюсний ротор (рис. 3.10, б) так, щоб його вісь співпадала з віссю поля статора. Така дія поля статора на явнополюсний ротор спричиняє появу в явнополюсному генераторі додаткового електромагнітного моменту (потужності), не пов'язаного з основним магнітним полем машини. Отже, у явнополюсній машині, крім

основного електромагнітного моменту M_{oc} (аналогічного з електромагнітним моментом неявнополюсного генератора), буде створюватись ще один, додатковий момент, M_0.

Щоб визначити розрахункову формулу моментів, що створюються в роторі явнополюсної машини, користуються перетвореною векторно-потенційною діаграмою явнополюсного генератора (рис. 3.9). Як і у випадку з неявнополюсним генератором, цю діаграму будують для активно-індуктивного характеру навантаження генератора (рис. 3.11, а).

Нехтуючи значенням електричних втрат в обмотці статора $P_{e1} \approx 0$, можна, як і у випадку з неявнополюсним генератором, електромагнітну потужність вважати рівною корисній, що віддається до мережі

$$P_{ем} \approx P_2 = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1. \qquad (3.28)$$

Із векторно-потенційної діаграми (рис. 3.11, а) випливає, що $\varphi_1 = \psi_1 - \theta$, тоді:

$$P_{ем} = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\psi_1 - \theta) = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot (\cos\psi_1 \cdot \cos\theta + \sin\psi \sin\theta) =$$
$$= m_1 \cdot U_1 \cdot (I_{1q} \cdot \cos\theta + I_{1d} \cdot \sin\theta), \qquad (3.29)$$

частина струму статора;

$I_{1d} = I_1 \sin\psi$ – реактивний струм статора.

Враховуючи, що (рис. 3.11, а)

де $I_{1q} = I_1 \cos\psi$ – активна складова

$$E_0 = U_1 \cos\theta + I_{1d} x_d;$$

$$x_q I_{1q} = U_1 \cdot \sin\theta,$$

визначають складових струму статора:

$$I_{1d} = (E_0 - U_1)\cos\theta / x_d;\ I_{1q} = U_1 \cdot \sin\theta / x_q \qquad (3.30)$$

Отримані значення струмів підставляють в (3.29):

$$P_{ем} = m \cdot U_1 [(E_0 - U_1) \cos\theta / x_d + U_1 \sin\theta / x_q)] =$$

$$= m_1 \cdot E_0 \cdot U_1 \sin\theta / x_d + m_1 \cdot U_1^2 \sin\theta \cdot \cos\theta / x_q - m_1 \cdot U_1^2 \sin\theta \cdot \cos\theta / x_d.$$

З урахуванням того, що $\sin\theta \cdot \cos\theta = 1/2 \sin 2\theta$, отримують кінцеве значення електромагнітної потужності явнополюсного синхронного генератора:

$$P_{ем} = \frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d} \cdot \sin\theta + \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) \cdot \sin 2\theta \qquad (3.31)$$

де $\frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d} \sin\theta = P_{ос}$ – основна частина електромагнітної потужності, викликана взаємодією струму статора з основним магнітним потоком машини, (оскільки у формулу цієї складової входить величина ЕРС E_0, яка створюється основним потоком, та напруга мережі, що викликає струм статора);

$\frac{m_1 \cdot U_1^2}{2}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) \cdot \sin 2\theta = P_д$ – додаткова електромагнітна потужність, зумовлена дією магнітного поля статора на явнополюсну конструкцію статора. При номінальному збудженні машини максимальне значення потужності $P_д$ складає 20÷35 % від амплітуди основної частини $P_{ос}$.

Поділивши (3.31) на кутову частоту обертання, визначають і електромагнітний момент, що протидіє моменту привідного двигуна явнополюсної синхронної машини:

$$M_{ем} = \frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d \cdot \omega} \cdot \sin\theta + \frac{m_1 \cdot U_1^2}{2 \cdot \omega}\left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d}\right) \cdot \sin 2\theta \qquad (3.32)$$

На (рис. 3.11, б) зображені дві складові (основна $M_{ос}$ $(P_{ос})$ та додаткова $M_д$ $(P_д))$ електромагнітного моменту та його результуюче значення, що досягає максимального значення $M_{макс}$ $(P_{макс})$ при $\theta_{кр} < 90°$ (наприклад у генераторів, що працюють на Дніпровській ГЕС-1 $\theta_{кр} \approx 75°$ і $M_{макс}$ $(P_{макс})$ на 6 % вище ніж $M_{макс}$ основної складової моменту). Додатковий електромагнітний момент $M_д$ називають також *реактивним.*

Під час роботи синхронної машини паралельно нескінченно-потужній мережі (U_1; $f_1 = const$), її магнітне поле, що створюється обмоткою статора, обертається з незмінною синхронною частотою обертання n_1, як і поля інших машин змінного струму (синхронних і асинхронних), що увімкнені в мережу. Електричний зв'язок між обмотками статора усіх цих машин можна розглядати як жорсткий механічний зв'язок між осями магнітних полів, що створюються струмами цих обмоток.

Результуючий магнітний потік кожного синхронного генератора, який виникає під час взаємодії основного поля і поля статора, обертається з такою ж частотою обертання, як і поля статора, тому і ротори усіх синхронних машин можна вважати такими, що з'єднані між собою. На відміну від полів статора, які «з'єднані жорсткою муфтою», ротори варто розглядати як такі, що «з'єднані еластичною муфтою», яка дозволяє осям роторів відхилятись на електричний кут в 180° (від -90° в режимі двигуна до +90° у режимі генератора). Таку еластичну муфту можна розглядати як дію мережі на кожну окрему машину,

направлену на утримання цієї машини в синхронізмі. Ця властивість називається синхронізуючою здатністю синхронної машини. У загальному вигляді режим роботи синхронної машини, що відповідає будь-якій точці кривої $M_{ем}$ $(P_{ем})$ на (рис. 3.9) та (рис. 3.11, б), буде стійким, якщо, при випадкових відхиленнях від стану рівноваги, приріст електромагнітного моменту (потужності) буде співпадати з приростом кута вильоту ротора, тобто $\Delta M_{ем}/\Delta\theta > 0$ або $\Delta P_{ем}/\Delta\theta > 0$.

Продиференціювавши (3.25) та (3.26) по куту θ (при U_1; E_0; $\omega = const$), отримують значення так званих питомої синхронізуючої потужності

$$P_{синх} = dP_{ем}/d\theta = m_1 \cdot E_0 \cdot U_1 \cos\theta / x_d , \qquad (3.33)$$

та питомого синхронізуючого моменту

$$M_{синх} = dM_{ем}/d\theta = m \cdot E_0 \cdot U_1 \cos\theta / \omega x_d , \qquad (3.34)$$

які зображені пунктирною лінією на (рис. 4.9) і становлять для неявнополюсної машини косинусоїду.

Як і електромагнітні потужність та момент, питомі синхронізуючі потужність і момент явнополюсної машини будуть мати основну та додаткову питомі синхронізуючі величини. Щоб отримати $P_{синх}$ та $M_{синх}$ для явнополюсної машини, необхідно продиференціювати, відповідно, (3.31) та (3.32) по вильоту ротора:

$$P_{синх} = m_1 E_0 U_1 \cos\theta / x_d + m_1 U_1^2 (1/x_q - 1/x_d) \cos 2\theta, \qquad (3.35)$$

$$M_{синх} = m_1 E_0 U_1 \cos\theta / \omega x_d + m_1 U_1^2 (1/x_q - 1/x_d) \cos 2\theta / \omega. \qquad (3.36)$$

3.7 Паралельна робота синхронних генераторів

Для того щоб запобігти появи в момент увімкнення генератора до мережі значних струмів (так званих *кидків струмів*), необхідно виконати *умови ввімкнення генератора на паралельну роботу*:

– ЕРС генератора E_0 і напруга мережі $U_м$ повинні бути рівними і протилежно направленими ($E_0 = -U_м$);

– частота генератора f_r повинна бути рівна частоті мережі ($f_r = f_м = 50$ Гц);

– чергування фаз ЕРС генератора і напруги мережі повинне бути однаковим.

Приведення генератора до стану, коли всі три умови виконані, і сам процес умикання на паралельну роботу називається *синхронізацією генератора з мережею.* Існує два способи синхронізації: точна, або ручна синхронізація, та груба, або самосинхронізація.

Спосіб точної синхронізації. Суть цього способу полягає в тому, що перед тим, як увімкнути генератор до мережі, його приводять до стану, що

задовольняє умови увімкнення. Момент виконання цих умов, тобто момент синхронізації, визначають приладом, який називається *синхроноскопом*.

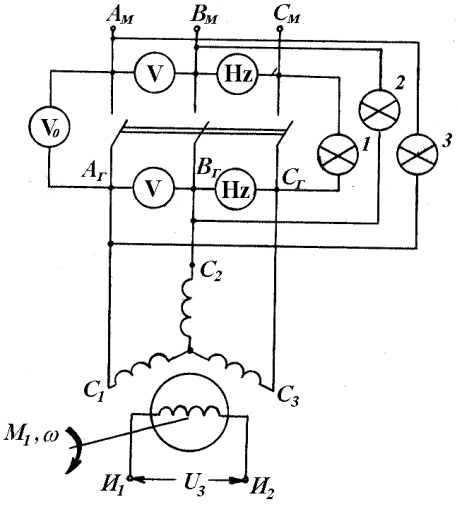


Рисунок 3.12 – Схема увімкнення синхронного генератора на паралельну роботу за методом точної синхронізації

Конструктивно синхроноскопи бувають лампові та у вигляді приладу зі стрілкою, що вільно обертається.

На (рис. 3.12) надана схема лампового синхроноскопа, що складається з трьох ламп, розташованих у вершинах рівностороннього трикутника. У цій схемі лампи синхроноскопа увімкнені «на погасання», тобто кожна лампа у однойменну фазу мережі і генератора. Існує також схема, у якій лампи умикають «на обертання вогню», в цьому випадку в лампах 2 і 3 варто поміняти кінці увімкнення до генератора.

При увімкненні ламп «на погасання», момент синхронізації відповідає одночасному погасанню усіх ламп. Якщо зірка ЕРС генератора $\boldsymbol{E_A}$; $\boldsymbol{E_B}$; $\boldsymbol{E_C}$ обертається з кутовою частотою $\boldsymbol{\omega_г}$, що не перевищує кутову частоту обертання $\boldsymbol{\omega_м}$, зірки напруг мережі $\boldsymbol{U_A}$; $\boldsymbol{U_B}$; $\boldsymbol{U_C}$, то напруга на лампах визначається геометричною сумою $\boldsymbol{E_A + U_A}$; $\boldsymbol{E_B + U_B}$; $\boldsymbol{E_C + U_C}$. У момент збігання векторів зірки ЕРС генератора і зірки напруг мережі ця сума досягає найбільшого значення і лампи світять з найбільшим розжаренням (напруга ламп дорівнює подвоєній напрузі мережі).

У наступні моменти часу зірка ЕРС обганяє зірку напруг і розжарення на лампах зменшується. У момент синхронізації вектори ЕРС і напруг займають положення, при якому $\boldsymbol{E_A + U_A = 0}$; $\boldsymbol{E_B + U_B = 0}$; $\boldsymbol{E_C + U_C = 0}$, тобто $\boldsymbol{U_0 = 0}$ і всі три лампи гаснуть одночасно. При значній різниці кутових частот $\boldsymbol{\omega_г}$ і $\boldsymbol{\omega_м}$ лампи блимають часто. Змінюючи частоту обертання привідного двигуна $\boldsymbol{\omega}$, можна досягти рівності $\boldsymbol{\omega_г = \omega_м}$, про що свідчить погасання ламп на значний час. У цей момент і варто замкнути рубильник, увімкнувши генератор на паралельну роботу.

ЕРС, що створюється в обмотках генератора, і її частота контролюються відповідно вольтметром та частотоміром. Зміну, за необхідності, величини ЕРС оператор, що проводить синхронізацію, здійснює регулюванням струму збудження генератора.

Якщо лампи блимають неодночасно – не співпадає порядок чергування фаз, то варто поміняти дві фази генератора або мережі між собою.

Оскільки лампи гаснуть при напрузі, що складає 30÷60 % від їхньої номінальної напруги, то для точного вибору моменту вмикання рубильника у схемі передбачено так званий нульовий вольтметр. Стрілка такого вольтметра буде повільно коливатись відповідно до погасання ламп і покаже нуль, коли напруга між точками $\boldsymbol{A_м}$ і $\boldsymbol{A_г}$ рівна нулю.

Перевагою ручної синхронізації є те, що вмикання генератора до мережі відбувається без струму між мережею та генератором, а недоліком – значна протяжність процесу синхронізації (до 10 хв).

Спосіб самосинхронізації. Для прискорення синхронізації застосовують спосіб самосинхронізації. Ротор незбудженого генератора приводять до обертання привідним двигуном до *підсинхронної частоти обертання* (відрізняється від синхронної не більше, ніж на 2–5 %), а потім обмотку статора умикають до мережі. Щоб запобігти перенапрузі в обмотці збудження, на момент розгону і вмикання генератора до мережі, її або закорочують, або, що частіше, шунтують незначним активним опором. Оскільки в момент вмикання обмотки статора до мережі її ЕРС дорівнює нулю (генератор не збуджений), то під дією напруги мережі, в цій обмотці спостерігається кидок струму, який значно перевищує номінальний струм генератора. Після увімкнення обмотки статора до мережі обмотку збудження вмикають до джерела постійного струму, і генератор електромагнітним моментом, що діє на його ротор, втягується в синхронізм, тобто частота його обертання стає синхронною. При цьому струм статора швидко знижується до нуля.

При самосинхронізації в генераторі відбуваються складні електромеханічні перехідні процеси, що викликають значні механічні дії на обмотки, підшипники і муфту, що з'єднує генератор з турбіною. Вплив цих дій на роботу генератора враховується під час проєктування генераторів. Способом самосинхронізації вмикають на паралельну роботу синхронні генератори потужністю до 500 мВА.

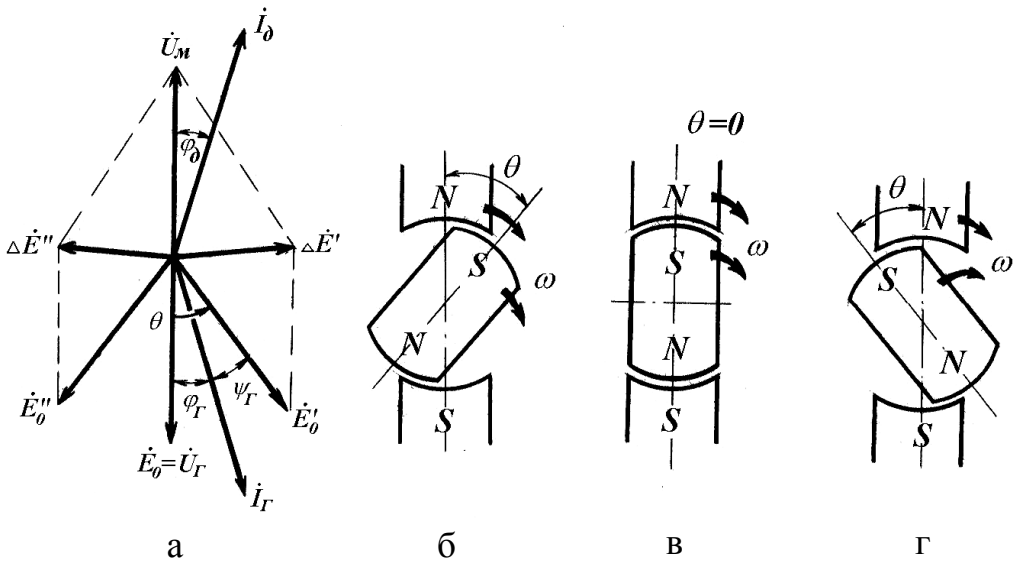


Рисунок 3.13 – Векторна діаграма (а) та положення магнітних полів статора і ротора в режимі генератора (б), при ХХ (в) і в режимі двигуна (г) синхронної машини при паралельній роботі з мережею

Після увімкнення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею, при виконанні усіх умов синхронізації, його ЕРС $\boldsymbol{E_0}$ урівноважує

напругу мережі (рис. 3.13, а), тому струм по обмотках статора протікати не буде – генератор працює в режимі холостого ходу.

Механічна потужність привідного двигуна затрачується на покриття втрат холостого ходу ($P_0 = P_{мех} + P_{магн} + P_з + P_п$). Момент привідного двигуна урівноважується моментом холостого ходу ($M_1 = M_0$), і осі магнітних полів ротора і статора співпадають (рис. 3.13, в).

Враховуючи, що генератор перетворює механічну потужність в електричну, на валу привідного двигуна необхідно збільшити механічну потужність, шляхом збільшення моменту M_1. При цьому ротор машини, отримавши деяке прискорення, зміститься відносно свого початкового положення на кут θ за напрямом обертання (магнітне поле ротора випереджує магнітне поле статора на кут «вильоту ротора» θ) (рис. 3.13, б). ЕРС генератора повернеться разом із полем ротора в бік випередження, відносно напруги U_r, на такий же кут θ і займає положення E_0', в якому не буде урівноважувати напругу мережі. Як результат, в колі обмотки статора з'явиться результуюча ЕРС $\Delta E' = E_0 + U_м$, яка викличе струм I_r. Якщо знехтувати активним опором обмотки статора і вважати її опір суто індуктивним, то струм I_r буде відставати від $\Delta E'$ на кут в 90°.

Як видно з векторної діаграми (рис. 3.13, а), цей струм направлений протилежно вектору напруги мережі $U_м$ (кут між ними складає $180 - \varphi_г$), а отже, він протікає із машини в мережу, і, враховуючи незначну величину $\varphi_г$, є, переважно активним, тобто в мережу генератором віддається активна електрична потужність.

Змінюючи момент привідного двигуна і, відповідно, кут вильоту ротора θ, можна регулювати величину потужності, що віддається до мережі. Якщо привідний двигун відімкнути і на вал машини дати гальмівний момент, не вимикаючи обмотку статора з мережі, то ротор відхилиться в положення (рис. 3.13, г) і кут θ стане відстаючим. Відповідно, відстане від U_r і ЕРС E_0, зайнявши положення E_0'' (рис. 3.13, а). Як і у попередньому випадку з E_0', е.р.с E_0'' не урівноважує напругу мережі $U_м$, що приводить до появи $\Delta E''$ і струму, який відстає від неї на кут в 90°. На відміну від попереднього випадку, в цьому разі вектор струму $I_д$, практично, співпадає з вектором напруги мережі $U_м$, а тому він протікає під дією цієї напруги в машину, що перейшла в режим двигуна і споживає з мережі активну потужність.

Зміна кута вильоту ротора від нуля в будь-який бік, як випливає з попереднього, приводить до появи струму в обмотці статора. Цей струм, при взаємодії з основним магнітним потоком, що збуджує обмотка ротора, буде створювати електромагнітні сили і, відповідно, електромагнітний момент $M_{ем}$, що діє на ротор синхронної машини. Під час роботи в режимі генератора електромагнітний момент є гальмівним, оскільки направлений проти обертання ротора і разом з моментом M_0 урівноважує момент привідного двигуна

$$M_1 = M_0 + M_{ем}.$$

Це рівняння є рівнянням рівноваги моментів синхронного генератора, і якщо помножити його на кутову частоту обертання ротора, отримаємо рівняння потужностей

$$P_1 = P_0 + P_{ем},$$

де $P_1 = M_1 \omega$ – потужність привідного двигуна; $P_0 = M_0 \omega$ – втрати холостого ходу; $P_{ем} = M_{ем} \omega$ – електромагнітна потужність генератора, яку можна визначити, як

$$P_{ем} = P_1 - P_0. \qquad (3.37)$$

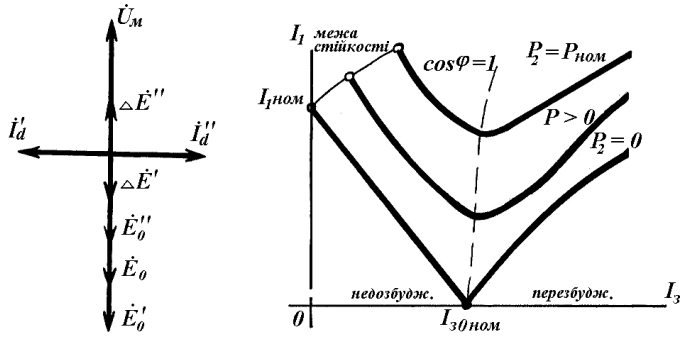
Отже, електромагнітна потужність синхронного генератора становить електричну активну потужність, що утворилась із частини механічної потужності привідного двигуна.

Корисна потужність генератора, що віддається до мережі, може бути виражена як частина електромагнітної (без електричних втрат в обмотці статора)

$$P_2 = P_{ем} - P_{e1}. \qquad (3.38)$$

3.8 Реактивна потужність, U-подібні характеристики

Розглядаючи попередні аспекти роботи синхронного генератора паралельно з мережею, враховувалось, що струм збудження машини залишався незмінним. Після увімкнення генератора на паралельну роботу з мережею, він продовжує роботу без навантаження і його ЕРС E_0 урівноважує напругу мережі U_c ($E_0 = -U_c$). Якщо при цьому збільшити струм збудження, тобто, *перезбудити* машину, то зросте її ЕРС E_0 і в колі обмотки статора генератора виникне надмірна ЕРС $\Delta E' = E_0' + U_м$, вектор якої співпадає з напрямом ЕРС E_0'.



а б

Рисунок 3.14 – Векторні діаграми ЕРС (а) та U – подібні характеристики синхронного генератора при паралельній роботі з мережею

Струм I_d', викликаний ЕРС $\Delta E'$, буде відставати від неї по фазі на кут в 90° (враховуючи, що активним опором обмотки статора нехтуємо $R_1 \approx 0$). По відношенню до ЕРС E_0' (а отже, до генератора) цей струм запізний (індуктивний), тому викликає поздовжньо-розмагнічувальну реакцію якоря і машина розмагнічується. Що ж стосується мережі, то по відношенню до неї, цей струм випереджальний (ємнісний), а отже, мережу він «підмагнічує», тобто реактивна електрична потужність віддається до мережі.

Якщо збільшувати перезбудження, то відповідно буде зростати і реактивна потужність, направлена до мережі. Якщо ж після увімкнення генератора до мережі знизити струм обмотки збудження, тобто *недозбудити* машину, то ЕРС E_0, відповідно, знизиться до значення E_0'' і в колі обмотки статора знову виникне надмірна ЕРС $\Delta E'' = E_0'' + U_м$. Тепер її вектор буде співпадати з вектором напруги (тому що за абсолютним значенням $U_м > E_0''$), і запізний струм, який викличе цю ЕРС, випереджуватиме E_0'' на 90°, тобто буде ємнісним відносно до генератора та індуктивним – до мережі. Цього разу реакція якоря буде повздовжньо-намагнічувальною завдяки тій реактивній потужності, яку споживає генератор з мережі.

Фізично ці процеси можна пояснити так: при перезбудженні генератора надмірна МРС збудження $F_0 = I_з \cdot W_з$ створює в обмотці статора розмагнічувальний струм I_d', а викликана ним реакція якоря компенсує надмірну МРС генератора, урівноважуючи ЕРС і напругу мережі. Такий же процес відбувається і при недозбудженні генератора з тією лише різницею, що в обмотці статора з'являється підмагнічувальний струм, який і збільшує м.р.с збудження, щоб знову урівняти ЕРС та напругу.

Якщо при усіх змінах струму збудження обертовий момент привідного двигуна залишається незмінним, то також незмінною є і активна потужність генератора:

$$P_2 = m_1 \cdot U_м \cdot I_1 \cdot \cos\varphi_1 = const.$$

З цього виразу витікає, що при $U_м = const$ активна складова струму статора також постійна:

$$I_q = I_1 \cdot \cos\varphi_1 = const.$$

Таким чином, ступінь збудження синхронного генератора впливає лише на реактивну складову струму статора, а його активна частина лишається незмінною.

Залежність струму статора I_1 від струму збудження $I_з$ при незмінному навантаженні на паралельній роботі з мережею графічно виражається U-подібною кривою. На (рис. 3.14, б) ці криві подані для випадків $P_2 = 0$ (неробочій хід); $P_{ном} > P_2 > 0$ (навантаження менше ніж номінальне) та $P_2 = P_{ном}$ (при номінальному навантаженні).

U-подібні криві синхронного генератора показують, що будь-якому навантаженню генератора відповідає таке значення струму збудження $I_з$, за якого струм статора I_1 стає мінімальним і рівним лише активній складовій: $I_{1мін} = I_1 \cos\varphi_1 = I_d$. У цьому випадку генератор працює з коефіцієнтом потужності $\cos\varphi_1 = 1$. Значення струму збудження, що відповідає $\cos\varphi_1 = 1$ при різному навантаженні генератора, зображене на (рис. 3.14, б) пунктирною кривою. Деяке відхилення цієї кривої вправо (у бік збільшення струму збудження) пояснюється тим, що при зростанні навантаження зростає і падіння напруги в обмотці статора $I_1 X_c$ і, щоб його компенсувати, потрібно збільшувати ЕРС E_0, а отже, і струм $I_з$, тому що згідно з (3.13):

$$E_0 = U_1 + jI_1 \cdot X_c.$$

Необхідно також врахувати і те, що при поступовому зниженні струму збудження настає таке його мінімальне значення, за якого магнітний потік обмотки збудження настільки ослаблений, що синхронний генератор випадає з синхронізму – порушується магнітний зв'язок між слабозбудженими полюсами ротора та обертовим полем статора. При з'єднанні усіх точок мінімально допустимих значень струму на U-подібних кривих (тонка лінія від точки струму $I_{1ном}$ на (рис. 3.14, б) отримують лінію *межі стійкості* роботи синхронного генератора при недозбудженні.

З погляду зниження втрат генератора найбільш вигідним є збудження, що відповідає мінімальному струму статора, тобто, коли $\cos\varphi_1 = 1$. Але у більшості випадків навантаження генератора має активно-індуктивний характер і для компенсації індуктивних струмів (що відстають за фазою від напруги мережі) доводиться дещо перезбуджувати генератор, створюючи умови, за яких струм статора I_1 випереджає за фазою напругу мережі U_1. Варто зазначити, що для збереження $\cos\varphi_1$ незмінним, при зміні активного навантаження генератора, необхідно одночасно змінювати і струм збудження генератора.

3.9 Коливання синхронних генераторів

Після увімкнення на паралельну роботу з мережею синхронний генератор залишається працювати ненавантаженим, і вісь його ротора співпадає з віссю поля статора. Щоб навантажити генератор, необхідно збільшити момент привідного двигуна M_1, наприклад, до значення $M_н$, яке відповідає повороту ротора за напрямом обертання на кут вильоту $\theta_н$, (рис. 3.15 крива 1). Збільшення моменту M_1 веде до зростання кута між осями полів ротора та статора, однак, враховуючи інерційність обертових мас ротора і привідного двигуна, вісь ротора повернеться на кут $\theta_н' > \theta_н$. Гальмівній електромагнітний момент, що розвиває генератор за такого кута, буде більшим, ніж M_1 ($M_н' > M_1$).

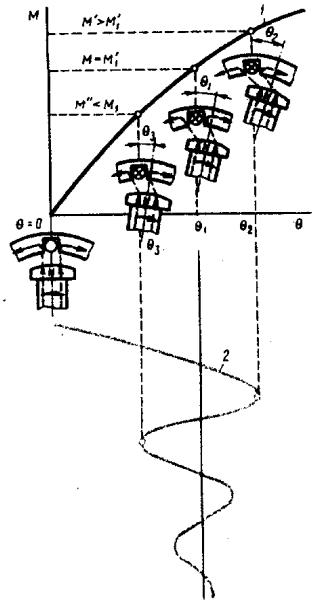


Рисунок 3.15 – Коливання синхронної машини

Як наслідок порушеної рівноваги моментів, ротор генератора почне відставати по напряму зниження кута вильоту, щоб зайняти положення $\theta_н$, але сили інерції і в цьому випадку не дозволять ротору зупинитись в положенні, що відповідає куту $\theta_н$, і переведуть його в положення $\theta_н''$, у якому електромагнітний момент генератора $M_н''$ виявиться меншим, ніж обертовий момент привідного двигуна M_1. Ротор знову не залишиться в положенні $\theta_н''$, а почне повертатись у бік збільшення кута θ.

Таким чином, ротор синхронного генератора буде здійснювати коливальні рухи (коливання) біля значення кута вильоту $\theta_н$ (рис. 3.15, крива 2), що відповідає рівновазі обертового та електромагнітного (гальмівного) моментів. Якби коливання ротора не супроводжувались втратами енергії, то вони продовжувались би нескінченно довго, тобто були б *незгасними*.

Проте в реальних умовах коливання ротора викликають втрати потужності, із яких найбільшими є магнітні втрати, зумовлені виникненням вихрових струмів в осерді ротора. Пояснюється це тим, що за відсутності коливань частота обертання постійна і дорівнює частоті обертання результуючого магнітного поля. Після виникнення коливань ротора його частота обертання стає нерівномірною, тобто відбувається його рух відносно магнітного поля статора, що і призводить до виникнення в масивному осерді ротора вихрових струмів. Взаємодія цих струмів із результуючим магнітним полем «впливає на ротор заспокійливо», зменшуючи амплітуду його коливання. Отже, коливання мають згаслий характер, і тому, через деякий час, ротор займає положення, що відповідає значенню $\theta_н$, і за якого наступає рівновага моментів. Причинами, що викликають коливання ротора, можуть бути або зміна обертового моменту привідного двигуна M_1, або зміна навантаження генератора, тобто електромагнітного моменту $M_{ем}$. Коливання ротора, що викликані наведеними причинами, називаються *власними*.

Більш детальні дослідження власних коливань синхронної машини показують, що частота цих коливань може бути визначена, як

$$1 / 2\pi f_0 = p \cdot M_{синх} / J \qquad (3.39)$$

де p – число пар полюсів; $M_{синх}$ – питомий синхронізуючий момент; J – момент інерції частин, що обертаються звичайно, $f_0 = 0{,}5 \div 2$ **Гц**.

Крім власних коливань, синхронна машина може мати *вимушені* коливання, пов’язані з нерівномірним обертанням ротора, наприклад, у генераторів з приводом від поршневих двигунів (двигунів внутрішнього згорання, газові чи парові двигуни і та ін.). Зовнішній момент на валу, що періодично змінюється, порушує нормальні умови роботи, і в деяких випадках, що особливо небезпечно, може привести до збігання частот власних та вимушених коливань (до резонансу коливань). При цьому амплітуда коливання різко підсилюється, так що паралельна робота стає неможливою. Для виключення можливого резонансу застосовують різні способи, наприклад, змінюють частоту власних коливань шляхом розміщення на валу агрегату маховика (змінюється момент інерції обертових мас J).

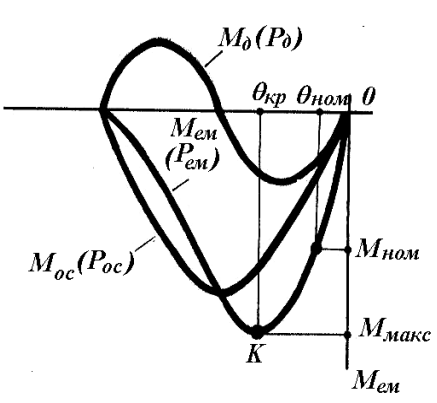
Втрати енергії в металевих частинах ротора проявляють гальмівну дію на рухомі частини машини і знижують їхні коливання. Однак найбільш ефективним засобом проти коливань є застосування в синхронній машині *заспокійливої* (*демпферної*) обмотки. В явнополюсних машинах ця обмотка виконується у вигляді стрижнів, закладених у пази полюсних наконечників і з'єднаних із боків короткозамикальними кільцями (як «біляче колесо» ротора асинхронного двигуна).

3.10 Пускові та робочі характеристики синхронних двигунів

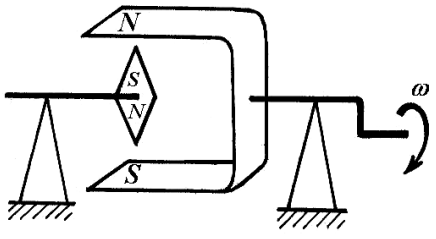
Відповідно до принципу оборотності електричних машин, синхронна машина може працювати не лише в режимі генератора, але і в режимі двигуна, тобто споживати з мережі активну електричну потужність і перетворювати її в механічну.

Як уже відзначалось, перехід синхронної машини, що працює паралельно з мережею, у режим двигуна відбувається після появи на валу машини гальмівного моменту, та відставанню осі ротора від осі магнітного поля статора на кут ($-\theta$). Електромагнітний момент, що при цьому виникає (3.26) в неявнополюсній машині та (3.42) в явнополюсній, направлений в бік обертання ротора і є обертовим, а отже, як і кут вильоту ротора, від'ємним по відношенню до моменту і кута вильоту ротора генератора (рис. 3.13, а). Відповідно до моменту, від'ємною буде і потужність синхронного двигуна, яка поступає з мережі в машину, а не з машини в мережу, як це спостерігається в генераторному режимі. Враховуючи незручність в оперуванні з від'ємними величинами, розглядаючи роботу синхронного двигуна, умовно вважають момент і потужність додатними. Електромагнітна потужність синхронного двигуна, як і його електромагнітний момент, визначається за тими ж формулами, що і потужність та момент синхронного генератора (3.25) та (3.31).

Кутові характеристики синхронного двигуна становлять продовження кутових характеристик синхронного генератора в третьому квадранті осей координат. На (3.16, а) подані криві електромагнітного моменту $M_{ем} = f(\theta)$ та його складових: основна $M_{ос} = f(\theta)$ та додаткова $M_д = f(\theta)$ явнополюсного синхронного двигуна.



а



б

Рисунок 3.16 – Кутові характеристики (а) та макет (б) синхронного двигуна

Таким чином, кутові характеристики синхронної машини становлять дві напівхвилі результуючого електромагнітного моменту: додатну, що відповідає режиму генератора, та від'ємну – режиму двигуна. Перехід машини з режиму в режим відбувається при $\theta = 0$.

Найпростіше принцип дії синхронного двигуна можна пояснити на макеті, що складається з зовнішнього підковоподібного магніту та магнітної стрілки, що мають можливість обертатись (див. рис. 3.16, б). Після внесення магнітної стрілки в поле зовнішнього магніту, її полюси зорієнтуються відповідно (рис. 3.16, б) полярності цього поля.

Якщо обертати зовнішній магніт з кутовою частотою обертання ω, то стрілка, синхронного двигуна, зчеплена з його полем, буде обертатись з тією ж частотою обертання. Якщо до осі стрілки прикласти гальмівний момент, то вона, відхилившись на кут θ, буде продовжувати обертатися синхронно з зовнішнім полем доти, доки гальмівний момент не перевищує моменту взаємодії між полями стрілки та підковоподібного магніту. В іншому разі зв'язок між ними розірветься і стрілка зупиниться. У реальному двигуні роль зовнішнього поля розглянутого макета відіграє кругове обертове магнітне поле, що створюється трифазною обмоткою статора, а роль стрілки – основне магнітне поле, що створюється обмоткою збудження на роторі.

Стійка робота синхронного двигуна можлива на ділянці *ОК* кутової характеристики (3.16, а) при $\theta = 0 \div \theta_{кр}$. Відношення максимального електромагнітного моменту $M_{макс}$ до номінального $M_{ном}$ називається *перевантажувальною здатністю синхронного двигуна*

$$\lambda = M_{макс}/M_{ном.}$$

Зазвичай перевантажувальна здатність синхронних двигунів $\lambda = 2 \div 3$, що при номінальному навантаженні відповідає електричному куту $\theta_{ном} = 10 \div 20°$.

Обертання ротора синхронних двигунів з незмінною синхронною частотою складає особливість цих двигунів і часто визначає галузь їхнього застосування (наприклад, в електроприводах, що потребують стабільної частоти обертання).

При змінах навантаження на валу синхронного двигуна змінюється кут θ і, в наслідок інерційності обертових мас, ротор буде *коливатись*, як і ротор синхронного генератора.

За конструкцією синхронні двигуни фактично не відрізняються від синхронних генераторів, але все ж мають деякі особливості. Їх виготовляють, здебільшого, явнополюсними з $p = 3 \div 12$ пар полюсів; повітряний зазор виконують меншим, ніж у генераторів такої ж потужності, що сприяє поліпшенню ряду параметрів, зокрема, знижує пусковий струм; демпферну обмотку виконують стрижнями більшого перерізу, тому що під час пуску вона виконує роль пускової; ширину полюсного наконечника виконують до $0{,}9\tau$ замість $0{,}7\tau$, як у генераторів. Тому, незважаючи на принцип оборотності, синхронні машини мають цільове призначення – або це синхронні генератори, або синхронні двигуни.

Пуск синхронних двигунів безпосереднім вмиканням його обмотки статора до мережі (як це спостерігається під час пуску асинхронного двигуна) неможливий, тому що ротор, який має значну інерційність, не може бути відразу захопленим обертовим полем статора, частота обертання n_1 якого (наприклад, 1 000 об/хв) установлюється миттєво. У зв'язку з цим для пуску синхронного двигуна застосовують спеціальні способи, суть яких полягає в попередньому розгоні ротора до обертання з синхронною частотою обертання, або з близькою до неї частотою, що називається підсинхронною, за якої між ротором і статором установлюється стійкий магнітний зв'язок.

З цією метою може використовуватись спеціальний привідний двигун і тоді пуск синхронного двигуна нічим не відрізняється від грубої синхронізації синхронного генератора з мережею. Необхідність у привідному двигуні – це суттєвий недолік цього способу пуску, тому в сучасних електроприводах використовують *асинхронний пуск*. Для здійснення такого пуску в полюсних наконечниках ротора виконується пускова обмотка типу «біляче колесо», аналогічно заспокійливій обмотці синхронного генератора.

На період пуску обмотка збудження шунтується опором, щоб запобігти перенапруги в ній. Обмотка статора вмикається до мережі, і пуск відбувається, як і пуск асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором. Після розгону ротора до підсинхронної частоти обертання ($n_2 \approx 0{,}95n_1$), обмотку збудження вмикають до джерела збудження. Синхронний електромагнітний момент (3.32), що при цьому виникає, втягує ротор у синхронізм, і машина працює синхронно, а пускова обмотка надалі виконує роль демпферної, що обмежує коливання ротора. Враховуючи значні потужності синхронних двигунів, асинхронний пуск проводять зазвичай на зниженій напрузі, як і потужних асинхронних двигунів – автотрансформаторний або реакторний.

Робота синхронного двигуна при живленні від трифазної мережі відрізняється від роботи синхронного генератора на цю мережу лише напрямом активного струму: у режимі генератора активний струм направлений з машини в мережу, а в режимі двигуна з мережі в машину. Що стосується реактивного струму, то він може бути в обох режимах роботи взагалі відсутнім ($\cos\varphi_1 = 1$), запізним або випереджальним – що залежить від величини струму збудження.

Дійсно, в обох режимах роботи (і в режимі двигуна, і в режимі генератора) результуюче магнітне поле машини створюється МРС обох обмоток – збудження та статора. При недозбудженні синхронної машини зростає МРС обмотки статора, машина підмагнічується з мережі, і, навпаки, при перезбудженні, машина розмагнічується в мережу. Таким чином, зміна струму збудження синхронного двигуна буде змінювати струм статора так, як це відбувається і в синхронному генераторі, і може бути виражена **U**-подібними характеристиками (рис. 3.17).

У недозбудженому стані реактивний струм споживається з мережі, а в перезбудженому віддається в неї, отже, синхронний двигун, за певних умов, можна розглядати як генератор реактивного струму. Ця властивість синхронних

двигунів є їхньою цінною властивістю, що використовується для підвищення коефіцієнта потужності електричних установок.

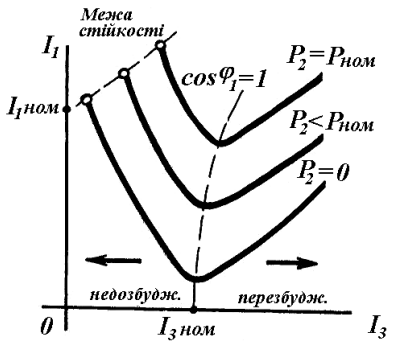


Рисунок 3.17 – U – подібні характеристики синхронного двигуна

Асинхронні двигуни, що є найпоширенішими споживачами електричної енергії, працюють із запізним кутом φ_1, що створює в мережах значні індуктивні струми. Якщо ж паралельно групі асинхронних двигунів увімкнути один чи кілька синхронних, що працюють у перезбудженому стані, то їхній ємнісний струм буде частково, чи повністю, компенсувати індуктивний струм асинхронних двигунів. Водночас електрична система розвантажується від реактивних струмів, буде працювати з $cos\varphi_1 \approx 1$, що сприяє зниженню втрат електроенергії в лініях. Варто також зазначити, що після перезбудження струм статора синхронного двигуна стає доволі значним. Тому синхронні двигуни, що призначені для роботи з перезбудженням, мають дещо більші габарити, а їхній ККД менший, ніж у двигунів, що призначені для роботи з $cos\varphi_1 = 1$, коли струм статора і втрати мають мінімальні значення.

Аналогічно до синхронного генератора, увімкненого на паралельну роботу з мережею, синхронний двигун має межу стійкості за мінімального струму збудження (штрихова лінія в лівій частині (рис. 3.16)); та лінію $cos\varphi_1 = 1$, що зміщується в бік зростання струму збудження, через падіння напруги на синхронних опорах обмотки статора двигуна, та необхідність додаткового струму збудження для компенсації цього падіння напруги.

Про роботу будь-якого двигуна, зокрема і синхронного, судять по його робочих характеристиках, які становлять для синхронного двигуна залежності частоти обертання ротора n, потужності P_1, що споживається з мережі, коефіцієнта потужності $cos\varphi_1$, струму в обмотці статора I_1 та коефіцієнта корисної дії η від корисної потужності на валу двигуна P_2 (3.18).

Частота обертання ротора n завжди дорівнює синхронній частоті $n_1 = 60f/p$, тому графік $n = f(P_2)$ має вигляд прямої, паралельної осі абсцис.

Корисний момент на валу синхронного двигуна

$$M_2 = 9{,}55P_2/n_2, \qquad (3.40)$$

де n_2 – частота обертання ротора, у цьому випадку $n_2 = n_1 = n$. Оскільки робочі характеристики знімають за умови $f = const$, то графік $M_2 = f(P_2)$ – пряма лінія, що виходить з початку координат.

Потужність на вході двигуна $P_1 = P_2 + \sum P$. Після зростання навантаження на валу двигуна зростають також і втрати $\sum P$, тому потужність, що споживається з мережі, P_1 зростає швидше, ніж корисна потужність P_2, і графік $P_1 = f(P_2)$ має дещо криволінійний вигляд.

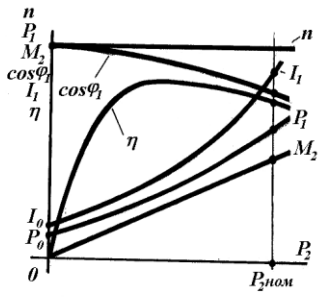


Рисунок 3.18 – Робочі характеристики синхронного двигуна

Вигляд графіка $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ залежить від виду налаштування струму збудження: якщо в режимі НХ струм збудження виставити так, щоб $\cos\varphi_1 = 1$, то після зростання навантаження коефіцієнт потужності знижується, як це видно з формули 3.17. Пояснюється це тим, що при зростанні навантаження і $I_з = const$, завдяки індуктивності обмотки статора, з'являється індуктивна складова струму, яка і знижує коефіцієнт потужності.

Якщо установити $\cos\varphi_1 = 1$ при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун споживає з мережі реактивний випереджальний струм, а при перевантаженні – запізний. Найчастіше установлюють струм збудження таким, щоб $\cos\varphi_1 = 1$ був при середньому навантаженні. У цьому випадку коефіцієнт потужності на всьому діапазоні навантаження лишається достатньо високим. Якщо ж виставити струм збудження синхронного двигуна таким, щоб $\cos\varphi_1 = 1$ був за навантаження, яке перевищує номінальне, то при номінальному навантаженні $\cos\varphi \approx 0.8$ і двигун буде віддавати в мережу реактивну потужність, що веде до підвищення коефіцієнта потужності цієї мережі. У цьому аспекті синхронні двигуни вигідно відрізняються від асинхронних, які споживають з мережі значні реактивні струми (особливо при недовантаженні двигуна) і знижують енергетичні показники мережі живлення.

Струм в обмотці статора може бути визначеним як $I_1 = P_1 / m_1 U_1 \cos\varphi_1$. Із цього виразу видно, що струм I_1 зі зростанням навантаження на валу двигуна зростає швидше, ніж потужність, яка споживається з мережі, через зниження $\cos\varphi_1$.

Коефіцієнт корисної дії синхронного двигуна змінюється так, як і ККД інших двигунів. При ХХ та КЗ двигун ніякої корисної роботи не виконує і $\eta = 0$. Між цими двома точками ККД досягає максимального значення при рівності змінних та постійних втрат.

Ротор синхронного двигуна, як і асинхронного, обертається в той же бік, що і поле статора, тому щоб зреверсувати такий двигун (змінити напрям обертання ротора), необхідно поміняти порядок слідування фаз лінійних проводів, підведених до обмотки статора. Для цього потрібно поміняти місцями два лінійних провідники, що підводяться від мережі до клем обмотки статора.

У підсумку варто зазначити, що синхронні двигуни, порівняно з асинхронними, мають перевагу, яка полягає в тому, що вони можуть працювати з $\cos\varphi_1 = 1$, не створюючи в мережі індуктивних струмів, які викликають додаткові втрати енергії. Крім того, під час роботи з перезбудженням синхронні двигуни віддають в мережу реактивну потужність, чим сприяють підвищенню

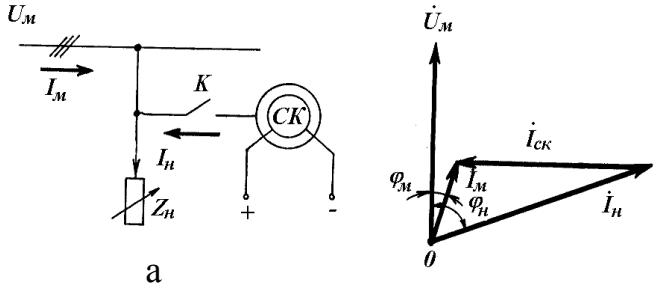
коефіцієнта потужності енергосистеми в цілому. Другою перевагою синхронних двигунів є те, що, як це випливає з (3.42), основна складова електромагнітного моменту пропорційна напрузі U_1, а у асинхронних двигунів електромагнітний момент пропорційний квадрату напруги U_1^2 (3.17). З цієї причини, у разі зниження напруги мережі, синхронні двигуни зберігають більшу перевантажувальну здатність, ніж асинхронні.

До недоліків синхронних двигунів відносяться їхня більш складна конструкція і підвищена вартість порівняно з асинхронними двигунами з короткозамкненим ротором. Крім цього, синхронні двигуни мають більш складний і коштовний пуск, для їхньої роботи необхідний пристрій живлення постійним струмом обмотки збудження. Досвід експлуатації показав, що застосування синхронних двигунів загального призначення найбільш доцільне за потужності 200 кВт і більше в установах, що не потребують частих пусків і регулювання частоти обертання (потужні насоси, вентилятори, компресори і та ін.).

3.11 Синхронні компенсатори

Синхронний компенсатор становить синхронну машину, призначену для генерування реактивної потужності. Його вмикають в електричну систему з метою підвищення її коефіцієнта потужності.

Принцип явищ, які при цьому відбуваються, полягає в тому, що необхідну для роботи деяких споживачів реактивну потужність виробляє не синхронний генератор, що установлений на електростанції, а синхронний компенсатор, що працює в безпосередній близькості зі споживачами, якими, насамперед, є асинхронні двигуни.



а б

Рисунок 3.19 – Схема увімкнення синхронного компенсатора (а) та векторна діаграма струмів (б)

На (рис. 3.19, а) зображена схема увімкнення синхронного компенсатора для поліпшення техніко-економічних показників роботи мережі. Дійсно, до увімкнення синхронного компенсатора струм мережі дорівнює струму навантаження ($I_м = I_н$), що має активно-індуктивний характер ($\cos\varphi_н < 1$). Після увімкнення синхронного компенсатора паралельно навантаженню $Z_н$ і створення в компенсаторі режиму перезбудження, виникає струм синхронного компенсатора $I_{ск}$, що випереджує напругу мережі на кут 90°. Як видно з векторної діаграми струмів (рис. 3.19, б), це призводить до зниження результуючого струму, який протікає в мережі, і підвищення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_м$ (кут $\varphi_м < \varphi_н$).

Варто зазначити, що використанням синхронного компенсатора можна довести, щоб $\cos\varphi_м = 1$, але при цьому потужність компенсатора має бути значно

збільшеною, а отже, зростуть затрати на виготовлення компенсатора, тому коефіцієнт потужності після компенсації залишається менше одиниці в межах 0,92÷0,95.

У деяких випадках синхронні компенсатори можуть працювати в режимі недозбудження. Необхідність в цьому виникає, коли струм у системі має значну ємнісну складову, яка не компенсується індуктивними струмами споживачів. Зазвичай ступінь збудження синхронного компенсатора регулюють за допомогою автоматичних пристроїв.

Умови нагрівання синхронних компенсаторів при перезбудженні більш важкі, ніж при недозбудженні, тому номінальною потужністю є потужність при перезбудженні; у сучасних компенсаторів вона сягає від 10 тис. кВАр до 160 тис. кВАр за номінальної напруги 6,6÷16 кВ. Виконують їх зазвичай з горизонтальним положенням ротора та числом полюсів 2p = 6 і 8, що відповідає 1 000 та 750 об/хв., і з пусковою короткозамкненою обмоткою, яка забезпечує асинхронний пуск.

Вал ротора має менший переріз, ніж вал синхронного двигуна такої ж потужності, тому що не передає обертового моменту (крім моменту холостого ходу) і розраховується лише на силу тяжіння ротора і силу магнітного притягання. Оскільки вал синхронного компенсатора не має вільного виступного кінця, та машина доволі легко герметизується для використання водневого охолодження.

Найбільш важливими характеристиками синхронного компенсатора є **U**-подібні характеристики, що будуються для різних значень напруги мережі. Оскільки синхронний компенсатор можна розглядати як синхронний двигун, що працює в режимі НХ, то характеристики $\boldsymbol{P_2 = 0}$ (рис. 3.16) є характеристикою синхронного компенсатора за номінальної напруги мережі.

Синхронний компенсатор не несе активного навантаження, тому кут $\boldsymbol{\theta = 0}$, що забезпечує йому значну перевантажувальну здатність.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.

2. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.

3. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, О. Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б. Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.

4. Мазуренко Л. І. Асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням для автономних енергоустановок : автореф. дис. … д-ра техн. наук : спец. 05.09.01 – електричні машини і апарати / Мазуренко Леонід Іванович. – Київ, 2001. – 31 с.

5. Плахтіна О. Г. Дослідження систем стабілізації напруги асинхронного генератора з самозбудженням та вибір раціонального варіанта / О. Г. Плахтіна, Б. Л. Копчак // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. – Вип. 84. – 2000. – 164 с.

6. Півняк Г. Г. Електричні машини : навч. посіб. / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 331 с.

7. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр’єва ; за ред. В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.

Електронне навчальне видання

ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

(МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

*(для здобувачів першого (бакалаврського)
рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *О. Б. Єгоров*

Редактор *О. В. Михаленко*

Комп’ютерне верстання *М. Л. Глєбова*

План 2024, поз. 109Л

Підп. до друку 20.09.2024. Формат 60 × 84/16.
Ум. друк. арк. 4,4.

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Чорноглазівська (Маршала Бажанова), 17, Харків, 61002.
Електронна адреса: office@kname.edu.ua
Свідоцтво суб’єкта видавничої справи:
ДК № 5328 від 11.04.2017.