

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

**ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни**

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

ЧАСТИНА 2. МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

*(для студентів усіх форм навчання напряму підготовки
6.050701 – Електротехніка та електротехнології,
6.050702 – Електромеханіка)*

Харків – ХНУМГ ім. О. М. Бекетова – 2016

Текст лекцій з дисципліни «Електричні машини» Частина 2 Машини змінного струму (для студентів усіх форм навчання напряму підготовки 6.050701 – Електротехніка та електротехнології, 6.050702 – Електромеханіка) / М. Л. Глебова, О. В. Дорохов, В. Б. Фінкельштейн, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2016 – 86 с.

Автори: канд. техн. наук, доц. М. Л. Глебова,
 канд. техн. наук, доц. О. В. Дорохов,
 д-р техн. наук, проф. В. Б. Фінкельштейн,
 канд. техн. наук, доц. Я. Б. Форкун

Рецензент: д-р техн. наук, проф. А. Г. Сосков

Рекомендовано кафедрою теоретичної та загальної електротехніки,
протокол № 11 від 26. 04. 2016 р.

ЗМІСТ

Вступ.....	4
ГЛАВА 1 Загальні відомості об електричних машинах. Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	5
1.1 Класифікація електричних машин.....	5
1.2 Номінальні дані електричних машин.....	8
1.3 Вимоги, що пред'являються до електричних машин.....	9
1.4 Особливості конструкції електричних машин, зумовлені умовами їх експлуатації.....	12
1.5 Електротехнічні матеріали, застосовані в електричних машинах... 22	
1.6 Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	28
ГЛАВА 2 АСИНХРОННІ МАШИНИ.....	31
2.1 Принцип дії та конструкція асинхронних машин.....	31
2.2 Зведений асинхронний двигун, його рівняння та схеми заміщення, векторна діаграма.....	36
2.3 Механічна характеристика, її залежність від напруги і активного опору в полі ротора.....	40
2.4 Енергетична діаграма, ККД. і робочі характеристики асинхронного двигуна, колова діаграма.....	45
2.5 Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів з фазними та короткозамкненими роторами.....	49
2.6 Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів.....	51
ГЛАВА 3 СИНХРОННІ МАШИНИ.....	52
3.1 Принцип дії та конструкція синхронних машин.....	52
3.2 Реакція якоря при різному характері навантаження синхронних генераторів.....	56
3.3 Рівняння синхронних машин.....	58
3.4 Векторні діаграми та характеристики синхронних генераторів.....	60
3.5 Втрати і ККД синхронних машин.....	64
3.6 Кутові характеристики та електромагнітна потужність синхронних машин.....	66
3.7 Паралельна робота синхронних генераторів.....	70
3.8 Реактивна потужність, U-подібні характеристики.....	74
3.9 Коливання синхронних генераторів.....	76
3.10 Пускові та робочі характеристики синхронних двигунів.....	78
3.11 Синхронні компенсатори.....	83
Список джерел.....	85

ВСТУП

Сучасна енергетика являє собою 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 їх нормальне функціонування і розвиток. Політична та економічна незалежність і безпека держави багато в чому визначаються виробництвом енергетичних ресурсів, їх кількістю та якістю.

Різноманіття форм існування енергії, властивість їх взаємоперетворення дозволяє використовувати для виробництва і споживання енергії різні енерготехнології, енергоресурси та енергоносії, визначає їх взаємозамінність. Енергетична цінність ресурсів, ефективність способів їх 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:

- генеруючі – перетворюють потенційну або хімічну енергію природних енергетичних ресурсів на електричну, теплову, механічну або інший вид енергетичного ресурсу (наприклад, турбоустановки, газогенеруючі 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.);

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

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

Питання, пов'язані з розрахунками, проектуванням, та особливостями експлуатації енергетичних установок, розглянуто в у загальному курсі «Енергетичні установки». Даний лекційний курс присвячений сучасним технологіям виробництва електроенергії на даному етапі розвитку енергетики, обов'язковою складовою реалізації яких є названі вище енергоустановки і, відповідно, теоретичні та практичні питання, пов'язані з їх створенням та експлуатацією.

ГЛАВА 1 Загальні відомості об електричних машинах.

Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин

1.1 Класифікація електричних машин

Класифікація за призначенням. Електричні машини за призначенням підрозділяють на наступні 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 ряді випадків генератори використовують в якості джерел 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 в якості виконавчих, регулюючих і програмуючих органів;

- 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 щодо великої потужності за допомогою електричних сигналів малої потужності, що подаються на їх обмотки збудження (управління). Роль електромашинних підсилювачів останнім часом також зменшилася з-за широкого застосування підсилювачів, виконаних на напівпровідникових елементах (транзисторах, тиристорах);

- електромеханічні перетворювачі сигналів, генеруючи, перетворюючи і підсилюють різні сигнали. Їх виконують зазвичай у вигляді електричних мікромашин і широко використовують в системах автоматичного регулювання,

вимірювальних і лічильно-обчислювальних пристроях у якості різних датчиків, диференційних і інтегруючих елементів, порівнюють і регулюючих органів тощо.

Класифікація за родом струму та принципом дії. Електричні машини за родом струму ділять 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: в 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 головним чином в якості електричних двигунів трифазного струму. Простота пристрою і висока надійність дозволяють застосовувати їх в різних галузях техніки для привода верстатів, вантажопідйомних і землерийних машин, компресорів, вентиляторів та інші. В системах автоматичного регулювання широко використовують одно- та двофазні керовані асинхронні двигуни асинхронні тахогенератори, а також сельсини.

Синхронні машини застосовують в якості генераторів змінного струму промислової частоти на електричних станціях і генераторів 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 головним чином в якості електродвигунів. Вони мають складну конструкцію і вимагають ретельного догляду. В 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 в якості генераторів і електродвигунів в пристроях електроприводу, що вимагають регулювання частоти обертання в широких межах: залізничний та морський транспорт, прокатні стани, електротрансмисії великовантажних автомобілів, вантажопідйомні та землерийні машини, складні металообробні верстати та ін., а також у тих випадках, коли джерелом електричної енергії для живлення електродвигунів служать акумуляторні батареї (стартери двигуни, двигуни підводних човнів, космічних кораблів тощо).

Генератори постійного струму часто застосовують для живлення пристроїв зв'язку, зарядки акумуляторних батарей, в якості основних джерел 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 в якості електромашинних підсилювачів, виконавчих двигунів і тахогенераторів.

В залежності від призначення електричні мікромашини автоматичних пристроїв підрозділяються на наступні групи:

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

керовані (виконавчі) двигуни, що перетворюють підведений до них електричний сигнал в 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 синхронний 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 їх 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 мікро машини, 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 (400-2000 Гц) частоти.

Машини малої потужності – від 0,5 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 призначена для роботи на постійному або змінному струмі нормальної частоти.

Класифікація по частоті обертання. Електричні машини по частоті обертання умовно поділяють на: тихохідні – з частотами обертання 300 об/хв; середньої швидкохідності – 300-1500 об/хв; швидкохідні – 1500-6000 об/хв; надшвидкохідні – понад 6000 об/хв. Мікромашини виконують для частот обертання від декількох оборотів в хвилину до 60000 об/хв; машини великої і середньої потужності – зазвичай до 3000 об/хв.

1.2 Номінальні дані електричних машин

Кожна електрична машина має паспортну табличку, вибиту на металевій пластині і прикріплена 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, в 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 обертаючий 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 служби. 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 при роботі в цих умовах енергетичні показники машини відрізняються від паспортних даних. Зазвичай при навантаженнях, менших номінальної, ККД і коефіцієнт потужності машини менше номінальних. При навантаженнях, великих номінальної, з'являється небезпека надмірного підвищення температури частин електричної машини, в першу чергу її обмоток, що може привести до передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток і, отже, всієї машини. Максимально допустима температура обмотки залежить від властивостей застосовуваної ізоляції (класу) і терміну служби машини і становить від 105 до 180°C. 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, головним чином визначають допустимі короткочасні перевантаження та методи випробування машини і окремих її частин, а також основні умови експлуатації машини даного типу. Матеріали, що включаються в стандарти, перевірені багаторічною практикою виробництва та експлуатації, тобто мають статистичне обґрунтування.

Експлуатація і виробництво нових видів електричних машин нормуються технічними умовами, які узгоджуються та затверджуються організаціями, які проектують, виготовляють та експлуатують дані машини.

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 протилежне. Однак випускаються електропромисловою машиною, 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, як правило, для роботи з синусоїдальною напругою, симетричним по фазах. Неминучі відхилення від цих умов регламентуються стандартами. Так, 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 Вимоги, що пред'являються до електричних машин

Загальні технічні вимоги. Електричні машини повинні мати високу надійність роботи, хороші енергетичні показники (ККД і коефіцієнт потужності), по можливості мінімальні габаритно-настановні розміри, масу і вартість: вони повинні бути простими за конструкцією, нескладні у

виготовленні і зручними в обслуговуванні і експлуатації. Загальні технічні вимоги для машин загальнопромислового застосування сформульовані в спеціальному ДОСТу, а для машин спеціального виконання — у відповідних стандартах, що враховують специфічні умови роботи цих машин.

Кожна електрична машина розрахована на роботу, при цілком певних умовах експлуатації: режимі навантаження, допускаються перевантаженнях, напрузі, частоті змінного струму, частотою обертання, температурі охолоджуючої середовища, висоти над рівнем моря, вологості та ін. При цьому машина повинна розвивати номінальну потужність і працювати без аварій і ушкоджень протягом встановленого часу (зазвичай протягом часу між періодичними ремонтами).

Надійність роботи машини забезпечується шляхом закладки достатніх запасів при проектуванні, застосування високоякісної технології виготовлення і правильної експлуатації (роботи машини в режимах, для яких вона спроектована і своєчасного виконання профілактичних ремонтів).

При проектуванні повинні бути забезпечені:

- механічна міцність всіх елементів машини (вала, станини, ротора, статора, деталей кріплення обмоток тощо). Зокрема, машини повинні без пошкоджень і деформацій витримувати короточасні перевантаження по струму і короточасні перевищення номінальної частоти обертання;

- електрична міцність ізоляції обмоток, яка не повинна втрачати своїх якостей при тривалій експлуатації машини. Ізоляція обмоток щодо корпусу, ізоляція між обмотками і ізоляція між витками обмоток повинна витримувати підвищений порівняно з номінальним випробувальна напруга. Опір ізоляції всіх обмоток має відповідати значенням, зазначеним у стандарті;

- достатнє охолодження елементів машини, в яких при роботі виділяється теплота (магнітопроводу, ковзних контактів, обмоток, підшипників). Найбільш чутливими до нагрівання є електроізоляційні матеріали обмоток, від якості яких залежить допустимий рівень нагріву електричної машини. Максимальні температури всіх частин машини не повинні перевищувати значень, зазначених у стандартах;

- вибір електромагнітних навантажень (щільності струму в обмотках і індукції в елементах магнітопроводу), при яких виділяється в обмотках і магнітопроводі теплота встигає відводитися з машини системою охолодження і чи не викликає недопустимого нагріву машини;

- застосування в машинах постійного струму ряду конструктивних заходів (введення додаткових полюсів і компенсаційної обмотки, вибір відповідних марок щіток), які запобігають неприпустиме іскріння на колекторі при номінальному навантаженні.

В основному електричні машини працюють в якості перетворювачів енергії (двигуни, генератори, трансформатори, електромашинні перетворювачі). Тому для зменшення експлуатаційних витрат важливе значення мають енергетичні показники машин: ККД і коефіцієнт потужності. При проектуванні електричної машини шляхом оптимального вибору її основних параметрів та електромагнітних навантажень прагнуть отримати найвигідніші значення ККД і коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні. Однак ці значення пов'язані певним чином з номінальною потужністю машини, тому чим менше номінальна потужність електричної машини, тим менше її ККД і коефіцієнт потужності.

Вимоги, що пред'являються до електричних мікромашин автоматичних пристроїв. Електричні мікромашини крім загальних технічних вимог повинні також забезпечувати:

- високу точність перетворення вхідного сигналу у вихідний, наприклад частоту обертання в вихідна напруга в тахогенераторах або керуюче напруга в частоту обертання виконавчих двигунах;
- стабільність вихідних характеристик при зміні умов експлуатації, наприклад температури навколишнього середовища;
- лінійність характеристик при зміні управляючого сигналу і навантаження;
- висока швидкодія;
- широкий діапазон регулювання.

Для виконання цих вимог при створенні електричної мікромашини в ряді випадків відступають від принципів оптимального проектування, прийнятих для машин середньої та великої потужностей. Так, наприклад, для зменшення похибок в інформаційних електричних мікромашинах вибирають відносно невеликі електромагнітні навантаження і збільшують повітряний зазор між статором і ротором. У виконавчих двигунах та інших мікромашинах, що виконують силові функції, для збільшення розвиваючого машиною моменту електромагнітні навантаження вибирають максимально можливими за умов відводу теплоти від машини. Все це призводить до погіршення енергетичних показників – ККД та коефіцієнта потужності, які дуже важливі для електричних машин середньої та великої потужностей, однак у мікромашинах показники, що характеризують точність, швидкодія, діапазон регулювання, можуть мати переважне значення.

Крім перерахованих вимог до окремих видів мікромашин пред'являють специфічні вимоги, обумовлені особливостями їх експлуатації. Так, мікромашини, що застосовуються в звукозаписної і звуковідтворювальної апаратури, повинні мати низький рівень створюваних шумів; мікромашини, використовувані в радіоапаратурі, не повинні створювати значних перешкод;

при встановленні їх, наприклад, у ядерних реакторах і космічних апаратах повинна бути забезпечена радіаційна стійкість. Все це також накладає певні обмеження на конструкції відповідних мікромашин і призводить до збільшення їх маси, габаритних розмірів та погіршення енергетичних показників.

1.4 Особливості конструкції електричних машин, що визначають умовами їх експлуатації

Захист від зовнішніх впливів. Конструктивне виконання електричної машини багато в чому визначають вимоги, що пред'являються до захисту її від зовнішніх впливів. В залежності від цього стандарт встановлює буквено-цифрове позначення виконань 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 струмоведучими і 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.

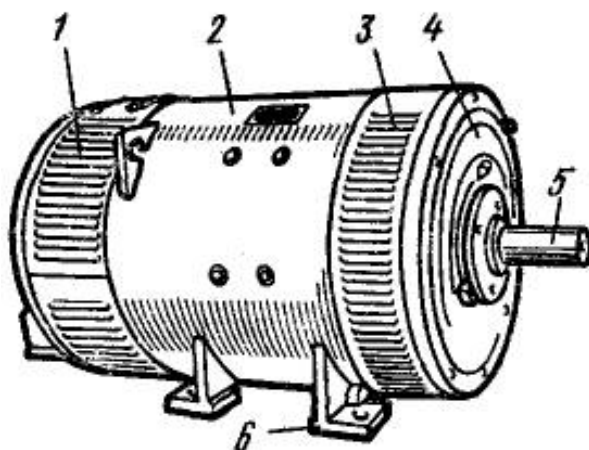


Рисунок 1.1 – Двигун постійного струму захищеного виконання (ступінь захисту IP22):

*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.

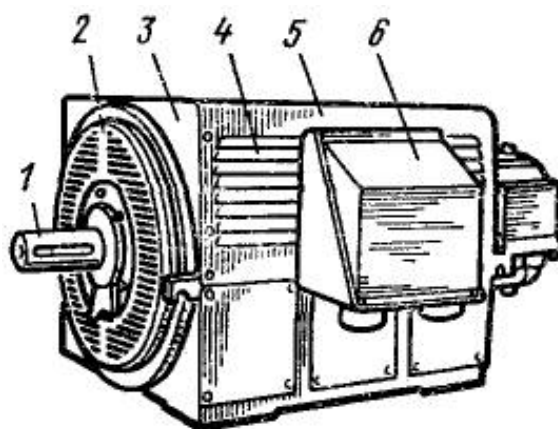


Рисунок 1.2 – Асинхронний двигун у краплезахищеному виконанні (ступінь захисту IP23):

1 – вал; 2,4 – вентиляційні вікна для входу і виходу охолоджуючого повітря; 3 – підшипниковий щит; 5 – станина; 6 – коробка з виводами

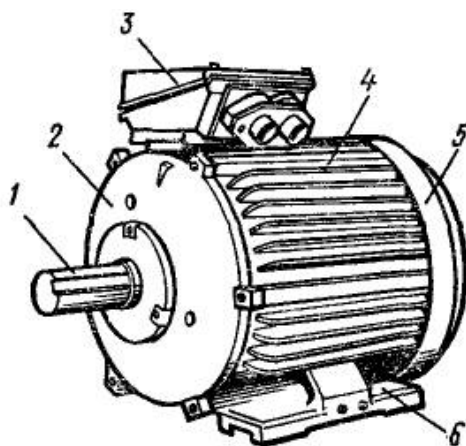


Рисунок 1.3 – Асинхронний двигун закритого виконання (ступінь захисту IP44):

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 і обертовими частинами; машини відкритого виконання зустрічаються рідко 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, так як вони не мають пристосувань, що захищають від дощу.

Бризкозахищене і краплезахищене (IP23 – IP24 та ін.) – машини обладнані пристосуваннями, що захищають їх від проникнення до струмоведучих 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. Випадково потрапила в машину вода витікає з неї або віддаляється охолоджуючим повітрям. Подібні машини застосовують головним чином на суднових установках.

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

Закрите (IP44 – IP54) – внутрішній простір машини ізолювано 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 щільної ізоляцією від навколишнього середовища, що запобігає повідомлення її з внутрішнім простором при певній різниці тисків зовні і всередині машини. Такі машини можуть працювати під водою (водонепроникні машини), в 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- і пожежно небезпечному середовищі, так як ізоляція їх струмоведучих і обертових частин від зовнішнього середовища виключає виникнення вибуху і займання газів в навколишньому просторі при іскрінні та інших ненормальних явищах. При вибуху усередині машини накопичених газів виникає полум'я не може проникнути в навколишнє середовище.

Вологостійке — для роботи в умовах великої вологості.

Морозостійке — для роботи при особливо низьких температурах і при можливому утворенні інею.

Хімічностійке — для роботи в умовах наявності парів агресивних хімічних речовин і при впливі хімічних реагентів.

Тропикостійке — для роботи в тропічних умовах при можливому утворенні цвілевих грибів.

Кліматичні умови і умови розміщення. При експлуатації електричних машин в нормальних кліматичних умовах температура навколишнього середовища становить $(25 \pm 10)^\circ\text{C}$, відносна вологість повітря 35 – 80% і атмосферний тиск 84-106 кПа. Залежно від макрокліматичних умов стандарту передбачає різні їх 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 вентиляваних 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 охолодження 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 за рахунок природної тепловіддачі доквіллю (машини з природним охолодженням).

Обертіві 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 служить повітря, але іноді для цієї мети застосовують водень. Такі машини називають вентиляльованими. Вентилювані машини, у яких охолоджуючий повітря чи іншого газ проходить через внутрішній простір машини, називають непродувними; якщо ж вони обдувають тільки зовнішню поверхню машини – обдуваються.

Позначення способу охолодження складається з букв ІС (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.

Обертіві 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, прибудовують до торцевій частині сердечника ротора.

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

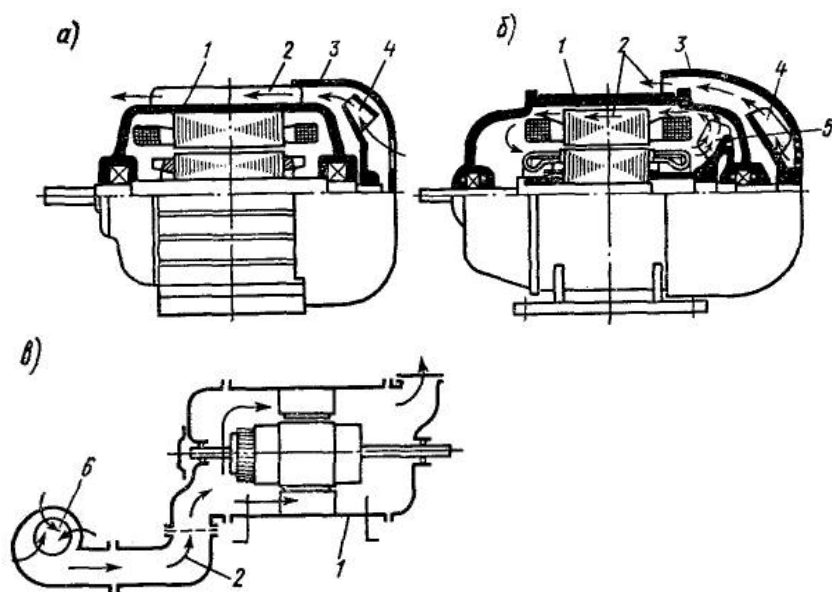


Рисунок 1.4 – Способи вентиляції закритих електричних машин:
1 – корпус машини; 2 – потоки охолоджуючого повітря;
3 – кожух; 4 – зовнішній вентилятор; 5 – внутрішній вентилятор;
6 – допоміжний вентилятор

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, при якій охолоджуючий повітря проходить через машину допоміжним вентилятором (рис. 1.4, в), що приводився в обертання окремим електродвигуном (ІС 17). В електричних машинах, вживаних в авіації, замість вентилятора для продувки охолоджуючого повітря через машину використовується аеродинамічний напір, що виникає при русі літака.

У машинах відкритого, захищеного, а також бризко-, крапле- і водозахищеного виконань охолоджуючий 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) охолоджуючий повітря проходить через машину в напрямку осі вала, у разі радіальної (рис. 1.5, б) – в радіальному напрямку. Залежно від місця установки вентилятора осьова система вентиляції може бути витяжною або нагнітальною. При витяжній системі (рис. 1.6, а) вентилятор встановлюють в місці виходу повітряного потоку з машини; при нагнітальної (рис. 1.6, б) – в місці входу його в машину.

У деяких випадках застосовують комбіновану радіально-осьову систему вентиляції.

В якості охолоджуючого агента в 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, так як водень має меншу щільність і велику 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.

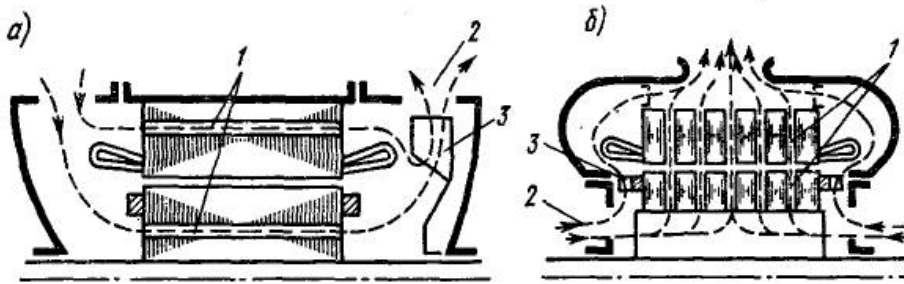


Рисунок 1.5 – Осьова і радіальна системи вентиляції відкритих і захищених електричних машин:

*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 охолоджуючим каналам, виконаним у вигляді вбудованих в обмотку тонкостінних коробок з немагнітного матеріалу. Якщо охолодження здійснюють за рахунок випаровування 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 охолодженням 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, при якому сердечник і обмотки поміщають в бак, заповнений трансформаторним маслом або негорючим рідким діелектриком.

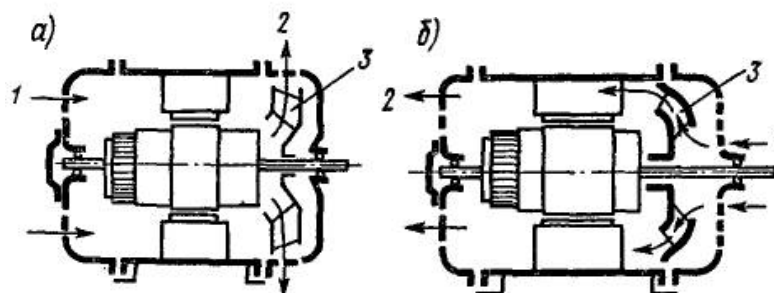


Рисунок 1.6 – Витяжна й нагнітальна системи вентиляції:

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).

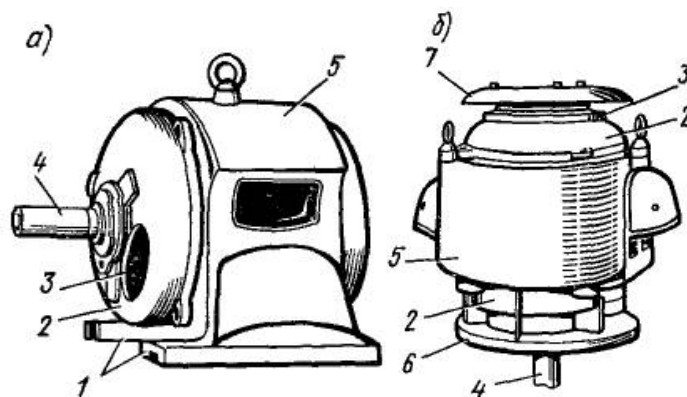


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд електричних машин:

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 валу 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 Mounting) і чотири цифри: перша визначає конструктивну групу, друга і третя – спосіб монтажу, четверта (від 0 до 8) – форму кінця валу.

Є наступні 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 Стояковий підшипниками; ІМ7 – зі Стояковий 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.

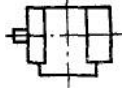
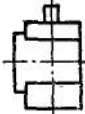
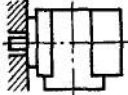
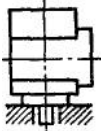
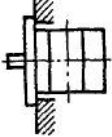
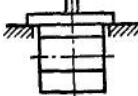
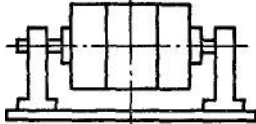
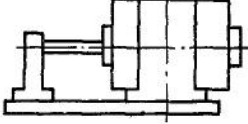
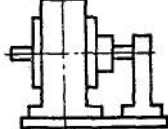
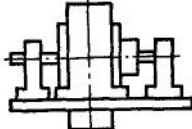
Віброакустичні умови. При проектуванні і виготовленні електричних машин у багатьох випадках застосовують спеціальні конструктивні заходи для зменшення шуму.

В електричних машинах шуми виникають по механічним, вентиляційним і магнітним причин.

Механічні шуми виникають через вібрації окремих частин машини внаслідок неточної балансування ротора, тертя щіток про колектор, тертя в підшипниках і ін. Для зниження механічного шуму здійснюють точну динамічне балансування ротора, збільшують жорсткість валу, 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, охолоджуючого машину, і вихорами на окремих ділянках системи охолодження. Зниження вентиляційного шуму досягається раціональною конструкцією вентилятора і всієї системи охолодження, підвищенням жорсткості вентилятора, ретельної його балансуванням і встановленням досить великого зазору між вентилятором і підшипниковим щитом.

Таблиця 1.1

Вид машини	Форми виконання	
На лапах з підшипниковими щитами (група ІМ1)	<i>ІМ1001</i> 	<i>ІМ1031</i> 
На лапах з двома підшипниковими щитами з фланцем на підшипниковому щиті (група ІМ2)	<i>ІМ2101</i> 	<i>ІМ2111</i> 
Без лап з підшипниковими щитами з фланцем на одному підшипниковому щиті (група ІМ3)	<i>ІМ3101</i> 	<i>М3131</i> 
На лапах з підшипниковими щитами і Стояковий підшипниками (група ІМ6)	<div style="display: flex; justify-content: space-around;"> <div data-bbox="730 1554 1098 1800"> <i>ІМ6010</i>  </div> <div data-bbox="1102 1554 1406 1800"> <i>ІМ6811</i>  </div> </div>	
На лапах зі Стояковий підшипниками (без підшипникових щитів) (група ІМ7)	<i>ІМ7011</i> 	<i>ІМ7311</i> 

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

Зменшення шуму досягається раціональним вибором числа 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 A , виміряний на відстані $d = 1$ м від контуру машини (позначається L_{d1A}), а для деяких машин спеціального виконання – також і середній рівень звуку A , виміряний на опорному радіусі 3 м (позначається L_{A3}). Рівень звуку (дБ) визначається відношенням

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

де p — звуковий тиск в даній точці. Па, $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Па — звуковий тиск, відповідне порогу чутності.

Залежно від вимог, що пред'являються до рівня шуму, електричні машини поділяють на такі класи: 0; 1; 2; 3; 4. Так, 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, працюють у короткочасному і повторно-короткочасному режимах, з примусовою вентиляцією від стороннього вентилятора, полегшеною маси, багатополюсні з числом 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 звукоізолюючим кожухом або іншими спеціальними конструктивними вузлами, що забезпечують зниження шуму.

Зниження радіоперешкод. Колекторні машини постійного і змінного струму є інтенсивними джерелами радіоперешкод. Що виникає в цих машинах іскріння під щітками створює імпульсні коливання струму і напруги, що мають

безперервний частотний спектр. В результаті цього утворюються перешкоди радіоприйому у вигляді різкого тріска або безперервного шуму у всьому діапазоні частот, прийнятих для радіозв'язку.

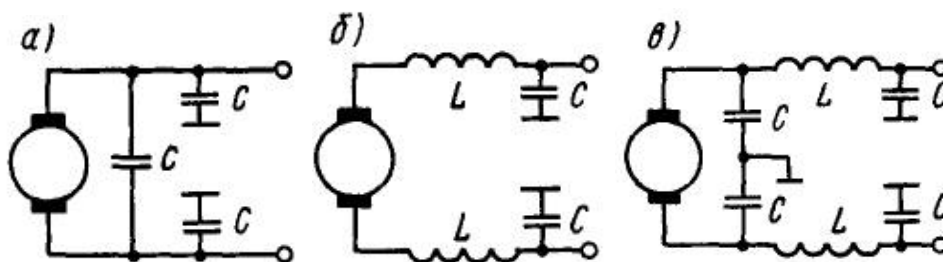


Рисунок 1.8 – Схеми перешкодоподавляючих фільтрів

Рівень перешкод, поширюваних по дротах і кабелях, приєднаним до електричної машині, визначають за виміряним на затискачах машини напрузі (в мікровольтях). Рівень перешкод, випромінюваних машиною в навколишній простір, визначають по максимальному напрузі (в мікровольтях), яке вимірюють на одне-метрової штировий антени, встановленої на певній відстані від машини; цю величину називають рівнем поля. Зменшення радіоперешкод досягають шляхом зниження ступеня іскріння, екранування самої машини, що підводяться до ній проводів і застосування перешкодоподавляючих фільтрів, що перешкоджають поширенню високочастотних коливань по проводах мережі, до якої приєднана машина. Найбільш простими перешкодоподавляючими фільтрами є ємнісні, що представляють собою конденсатори C , включаються між струмопровідними затискачами, а також між цими затискачами і корпусом машини (рис. 1.8, а). Найбільш ефективними є прохідні конденсатори, у яких один вивідний кінець приєднують до корпусу, а інший проходить всередині конденсатора і є струмоведучим провідником, приєднаним до вихідних затискачів машини. У ряді 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 C . Такі фільтри пропускають в зовнішній ланцюг як постійну складову струму і сильно послаблюють гармонійні складові, що створюють радіоперешкоди. Ємність перешкодоподавляючого конденсатору зазвичай підбирають дослідним шляхом; вона становить 0,1-1 мкФ, а індуктивність дроселя фільтра – 50-500 мкГн.

1.5 Електротехнічні матеріали, застосовувані в електричних машинах

Експлуатаційні властивості і надійність електричної машини багато в чому визначаються технологією виготовлення і якістю застосовуваних

матеріалів. У електромашинобудуванні застосовують різні магнітні, провідникові та ізоляційні матеріали.

Магнітні матеріали. Магнітопроводи електричних машин виготовляють з листової електротехнічної сталі, сталевого лиття і листової вуглецевої сталі.

Залежно від структурного стану і способу прокатки електротехнічні сталі ділять на гарячекатані та холоднокатані. Гарячекатана сталь має полікристалічну структуру, в якій кристали, що мають форму куба, розташовані хаотично, що призводить до практичної ізотропності властивостей сталі. Холоднокатана сталь в результаті холодної прокатки і відпалу отримує спеціальну структуру, при якій кристали орієнтовані в певному напрямку.

Розрізняють сталь з ребровою структурою, коли кристали орієнтовані ребром куба кристала уздовж напрямку прокату, і сталь з кубічної структурою – при орієнтації кристалів стороною куба. Сталь з ребровою структурою має яскраво вираженою магнітною анізотропією. При цьому уздовж напрямку прокату забезпечується найменше магнітне опір, а в поперечному напрямку або під кутом до напрямку прокатки – найбільше. Тому при виготовленні магнітопроводів з такої сталі необхідно, щоб напрямок магнітного потоку на всьому його шляху збігался з напрямком прокату. Сталь з кубічної структурою ізотропна, тому що має однаково високі магнітні властивості як уздовж, так і поперек прокату.

Електротехнічну сталь виготовляють різної товщини і випускають в листах і рулонах. При частоті 50 Гц застосовують сталь товщиною 0,28; 0,30; 0,35 і 0,5 мм; при частоті 400 Гц – 0,1 і 0,2 мм. Для трансформаторів, що працюють на частотах понад 2,5 кГц, використовують сталь товщиною до 0,05 мм.

Головною легуючою присадкою електротехнічної сталі є кремній, наявність якого зменшує магнітні втрати в сталі. Зміст кремнію в сталі складає 0,4-4,8% і чим воно вище, тим нижче втрати. Однак добавка кремнію підвищує твердість і крихкість сталі, що ускладнює її обробку. Тому високолеговану сталь (з вмістом кремнію 2,8-3,8% і вище) застосовують при виготовленні трансформаторів і великих обертових машин. Для виготовлення магнітопроводів малих машин, у яких в роторі і на статорі повинні бути виштампувані пази порівняно складної конфігурації, застосовують сталь з вмістом кремнію 0,4-1,9%.

Електротехнічну сталь поставляють на електромашинобудівний завод у вигляді листів, рулонів або різаною стрічки, в основному в термічно обробленому стані з електроізоляційним нагрівостійким або ненагрівостійким покриттям, а також без покриття. В якості ізоляції використовується шар оксидної плівки товщиною 3-5 мікрон(мкм) або лакової плівки товщиною 15-20 мкм.

Різні марки електротехнічної сталі позначають чотиризначними числами (наприклад, 1211; 2013; 2212; +3413; +3416 і т. П.). Перша цифра означає приналежність сталі до того чи іншого класу (1 – гарячекатана ізотропна; 2 – холоднокатана ізотропна; 3 – холоднокатана анізотропна з ребровою структурою). Друга цифра означає вміст кремнію (від 0,4 до 4,8%); третя цифра – група по основній нормованій характеристиці (питомою магнітним втратам при певній індукції і частоті перемагнічування); четверта цифра – порядковий номер типу сталі.

Для виготовлення магнітопроводів сучасних асинхронних двигунів з висотою осі обертання до 180 мм використовують сталь марки 2013, при великих висотах обертання – марок 2212, 2 312 і 2421. Статори синхронних машин виготовляють з сталей тих же марок. Сталь 2013 володіє високою магнітною проникністю і порівняно низькими втратами на перемагнічування. Після штампування листи піддають рекристалізаційного отпалювання (для усунення погіршення магнітних властивостей сталі в результаті утворення наклепу при технологічних операціях) і оксидації для створення ізоляційного шару. Сталі марок 2212, 2 321 і 2411 мають електроізоляційне покриття і не вимагають відпалу. Застосування цих сталей, що мають низькі втрати, підвищує ККД і, крім того, спрощує технологію виготовлення, так як не потрібно отпалювання листів великого розміру.

У машинах постійного струму для сердечників якорів машин з висотою осі обертання до 200 мм застосовують сталь марок 2013. Для зняття наклепу після штампування сталь отпалюють, а потім ізолюють. При великих висотах обертання використовують сталі марок 2112, 2212, 2 312, 2411.

При виготовленні магнітопроводів трансформаторів використовують холоднокатані анізотропні сталі марок 3412 -3413 з ізоляційним покриттям; після штампування сталь отпалюють. Застосування холоднокатаної анізотропної сталі ускладнює конструкцію і технологію виготовлення магнітопроводів, так як при цьому потрібно виключити проходження магнітного потоку поперек прокатки або, принаймні, зменшити довжину ділянок, де це необхідно. З тих же причин в обертових електричних машинах через більш складної конфігурації їх магнітопроводів така сталь знаходить обмежене застосування – тільки в дуже великих машинах для виготовлення сегментів, з яких збирають сердечники статора і ротора (сталі марок 3411 – 3413).

Полюси машин постійного струму і синхронних машин збирають з листів низьковуглецевої конструкційної сталі товщиною 1-2 мм або електротехнічної сталі 3411. Корпуси машин постійного струму виготовляють шляхом зварювання з листової низьколегованої магнітно-м'якої сталі або сталевого

литва, так як вони є частиною муздрамтеатру. Сталеve лиття застосовують також для виготовлення станин і роторів синхронних машин. Вали машин виконують з високоміцних конструкційних сталей з добавкою хрому, нікелю і т. п. Особливо складно виготовити ротори турбогенераторів, в яких сталь одночасно повинна володіти і високою міцністю, і гарною магнітною проникністю.

Провідникові матеріали. У електромашинобудуванні застосовують мідь і алюміній. Мідь значно дорожче алюмінію, проте її використовують для виготовлення обмоток частіше, ніж алюміній, так як вона має більш високу електропровідність (приблизно в 1,6 рази), що дозволяє скоротити габарити машин. Для виготовлення круглих і прямокутних проводів обмоток електричних машин і трансформаторів застосовують провідникову мідь високої чистоти, одержувану в електролітичних ваннах; вона відрізняється досить низьким вмістом сторонніх домішок (вміст міді 99,95%).

Алюмінієві дроти також застосовують для виготовлення обмоток обертових електричних машин, але тільки в тому випадку, коли ці обмотки мають порівняно малу теплове навантаження. Використовують алюміній і для виготовлення обмоток трансформаторів, де збільшення розміру обмоток менше впливає на збільшення габаритів і маси, ніж в обертових електричних машинах.

В якості струмопровідного матеріалу контактних кілець і колектора крім міді застосовують бронзу і навіть сталь (для контактних кілець), так як для цих деталей важлива не тільки електропровідність, але і висока механічна міцність.

Ізоляційні матеріали. Основні вимоги, пропоновані до ізоляції, – нагрівостійкість, висока електрична міцність, вологостійкість, хороша теплопровідність, висока механічна міцність і еластичність.

Нагрівостійкість ізоляції є основною вимогою, що визначає надійність роботи і термін служби електричної машини. Термін служби електричної машини становить 15-20 років. При нагріванні ізоляції виникають електрохімічні та термічні процеси, що призводять до її старіння, т. щ. До втрати ізолюючих властивостей і механічної міцності.

Електроізоляційні матеріали, застосовувані в електромашинобудуванні, залежно від нагрівостійкості підрозділяють на сім класів: У, А, Е, В, Ф, Н, С, характеристики яких наведені в таблиці 1.2.

До класу У відносять текстильні і паперові матеріали, виготовлені з бавовни, натурального шовку, целюлози і поліамідів (стрічки, папір, картон, фібра), деревину та пластмаси з органічними наповнювачами.

В клас А входять матеріали класу У, просочені ізоляційним складом або занурені в рідкі діелектрики (натуральні смоли, масляні, асфальтові, ефіроцеллюлозних лаки, трансформаторне масло, термопластичні компаунди);

лакотканин, ізоляційні стрічки, лакопаперу, електрокартон, гетинакс, текстоліт, просочене дерево, деревні шаруваті пластики, деякі синтетичні плівки, ізоляція проводів типу ПБД, ПЕВЛО, ПЕЛШО та інші з бавовняної тканини, шовку і лавсану, емалева ізоляція проводів типу ПЕЛ, ПЕМ, ПЕЛР і ПЕВТ і ін.

Клас Е складають синтетичні плівки і волокна, деякі лакотканини на основі синтетичних лаків, термореактивні синтетичні смоли і компаунди (епоксидні, поліефірні, поліуретанові), ізоляція проводів типу ПЛД, ПЕПЛО – з лавсану, емалева ізоляція проводів типу ПЕВТЛ, ПЕВТЛК та інші на основі поліуретанових і поліамідних смол.

Таблиця 1.2

Клас ізоляції							С
Гранична допустима температура при тривалій роботі, °С	0	05	20	30	55	80	біль ш 180

У клас В включають матеріали на основі слюди (міканіти, мікаленти, слюдиніту, слюдопласт), скловолокна (склотканини, склолакотканини) азбестові волокна (пряжа, папір, тканини) з паперовою, тканинною або органічної підкладкою; пленкостеклопласт «Изофлекс»; пластмаси з неорганічним наповнювачем; шаруваті пластики на основі скловолокнистих і азбестових матеріалів; термореактивні синтетичні компаунди; емалева ізоляція проводів типу ПЕТВ, ПЕТВД та інші на основі поліефірних лаків і термопластичних смол. Просочуючих складами служать бітумно-мастило смоляні лаки на основі природних і синтетичних смол.

Клас F містить матеріали, зазначені в класі В, – зі слюди, скловолокна, азбесту, але без підкладки або з неорганічної підкладкою; пленкостеклопласт «Імідсфлекс», скловолокнисту і азбестову ізоляцію проводів типу ПСД, ПСДТ, а також емалеву ізоляцію проводів типу ПЕТ-155, ПЕТП-155, ПЕД на основі капрону. Просочуючих складами служать термостійкі синтетичні лаки і смоли.

Клас Н – це зазначені в класі В матеріали зі слюди, скловолокна і азбесту без підкладки або з неорганічної підкладкою, кремнійорганічні еластомери, скловолокниста й азбестова ізоляція проводів типу ПСДК, ПСДКТ, емалева ізоляція проводів типу ПЕТ-200, ПЕТП-200 та інші на основі кремнійорганічних лаків; просочуючих складами служать кремнійорганічні лаки і смоли.

Клас С – слюда, скло, скловолокнисті матеріали, електротехнічна кераміка, кварц, шифер, азбестоцемент, матеріали зі слюди без підкладки або зі скловолокнистої підкладкою, поліамідні і поліфторетиленові плівки. Сполучною складом служать кремнійорганічні і елементоорганічні лаки і смоли.

В даний час електричні машини з ізоляцією класу А практично не виготовляють, а з ізоляцією класу Е знаходять обмежене застосування - головним чином в машинах невеликої потужності. Застосовують в основному ізоляцію класів В і F, а в спеціальних машинах, що працюють у важких умовах (металургія, гірниче обладнання, транспорт), – класу Н. В., результаті використання більш нагрівостійких матеріалів, поліпшення властивостей електротехнічних сталей і поліпшення конструкцій за останні 60-70 років вдалося зменшити масу електричних машин в 2,5-3 рази.

Найбільшою нагрівостійкістю володіють скловолкнисті і слюдяні матеріали, що містять кремнійорганічні зв'язуючі і просочуючі склади, що емалева ізоляція проводів на основі кремнійорганічних лаків і синтетичні плівки типу «Изофлекс», «Імідофлекс» та ін. Вони відрізняються також високою електричною і механічною міцністю і вологостійкістю.

В електричних машинах широко використовують обмотувальні дроти з емалевою, волокнистою та комбінованою ізоляцією. Клас нагрівостійкості такої ізоляції залежить від хімічного складу емалевого лаку, роду волокнистого матеріалу і підклеювалася складу. У машинах постійного струму середньої та великої потужності використовують литу ізоляцію типу "моноліт". Ізоляція являє собою поєднання склотканини і слюденіту з термореактивним компаундом, який вводять в обмотку і ізоляцію під вакуумом з подальшою обпресуванням. Подібного ж роду ізоляцію з термореактивним компаундом застосовують і в машинах змінного струму. В даний час вартість ізоляції становить 30-70% від вартості всіх матеріалів, що йдуть на виготовлення електричної машини.

У трансформаторах з масляним охолодженням широко використовують дроти з ізоляцією класу А; застосування в них ізоляційних матеріалів з великою нагрівостійкістю недоцільно, оскільки допустима температура обмоток визначається температурою трансформаторного масла (105°C), що відноситься до класу А. У трансформаторах з повітряним охолодженням широко використовують обмотувальні дроти більш високих класів нагрівостійкості В, F.

В електричних машинах розрізняють міжобмоткову та корпусну ізоляції. Міжобмоткова ізоляція (між витками обмотки) забезпечується ізоляцією самого провідника, що наноситься на нього в процесі виготовлення на кабельних заводах або при виготовленні електричної машини. Корпусна ізоляція відокремлює провідники обмотки від корпусу електричної машини. Для неї використовують різні прокладки, гільзи або ряд шарів ізоляції, що наноситься на відповідну котушку до установки її в машину.

Електричні щітки. Електричний контакт зі ковзними поверхнями (контактними кільцями і колектором) здійснюється за допомогою щіток, що представляють собою прямокутні бруски складного складу, виконані на графітової основі. Численні типи щіток розрізняють по твердості, коефіцієнту тертя і падінню напруги під щітками. Зазвичай щітки підбирають експериментально. Основні правила, якими керуються при виборі щіток, наступні:

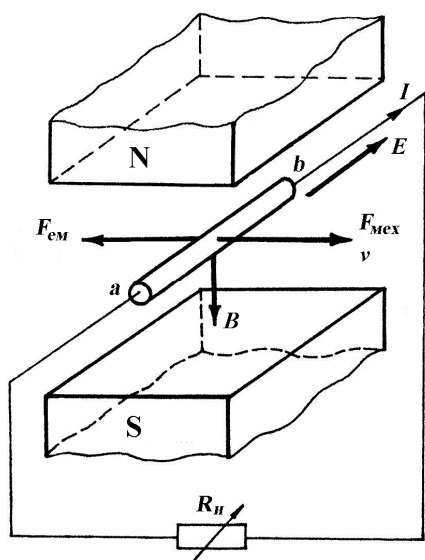
1) для швидкохідних машин постійного струму застосовують м'які щітки з середнім значенням падіння напруги під ними (1,5-2,0 В);

2) для машин постійного струму з утрудненою комутацією – тверді щітки з підвищеним падінням напруги під ними (2,4-3,5 В);

3) для контактних кілець – металографітні щітки з малим падінням напруги (0,1-0,5 В).

1.6 Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин

Використання електричних машин в якості двигунів та генераторів є їх основним призначенням, так як пов'язане виключно з взаємним перетворенням електричної та механічної енергії, а трансформатор, призначений для перетворення струмів і напруги однієї величини, в струми і напруги іншої, при незмінній частоті.



Розглянемо на макеті, що складається з двох полюсів і провідника, процес взаємного перетворення механічної і електричної енергії (рис. 1.9). Якщо до провідника *ав* довжиною *l* прикласти механічну силу *Fмех.*, то він буде переміщатися з лінійною швидкістю *v* у напрямі дії сили. Згідно закону електромагнітної індукції в провіднику *ав* буде виникати електрорушійна сила (е.р.с.):

$$E = B \cdot l \cdot v \quad (1.1)$$

де *B* – магнітна індукція, Тл .

Рисунок 1.9 – Елементарний генератор

Слід пам'ятати, що напрям е.р.с. в провіднику визначається *правилом правої руки*. Долоню правої руки розташовують в магнітному полі так, щоб лінії індукції входили в неї, відігнутий на 90° великий палець показував напрям руху провідника відносно поля, тоді чотири пальці будуть показувати напрям е.р.с. (на рис. 1.9 від *a* до *b*).

Якщо замкнути провідник на навантаження R_n , то в колі, під дією е.р.с., в напрямі, що співпадає з її напрямом, виникне *струм I*. Таким чином, провідник, що рухається в магнітному полі, можна розглядати як *елементарний генератор*.

В свою чергу, на провідник зі струмом в магнітному полі, згідно з явищем електромагнітної індукції, діє *електромагнітна сила* (сила Ампера):

$$F_{em} = B \cdot l \cdot I \quad (1.2)$$

Напрямок цієї сили визначається *правилом лівої руки*. Долоню лівої руки розміщують назустріч лініям поля, чотири витягнутих пальці – за напрямом струму, тоді великий палець, відігнутий на 90° , покаже напрям сили, на рисунку 1.9, вона направлена справа наліво, тобто, назустріч руху провідника, отже є гальмівною.

Уявимо, що рух провідника рівномірний ($v = const$), тоді сили механічна і електромагнітна урівноважують одна одну $F_{mex} = F_{em}$. Так як $v \neq 0$, то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість, отримаємо:

$$F_{mex} \cdot v = F_{em} \cdot v \quad (1.3)$$

Скориставшись (1.2), підставимо в праву частину значення F_{em} :

$$F_{mex} \cdot v = B \cdot l \cdot I \cdot v = E \cdot I \quad (1.4)$$

В лівій частині цього рівняння маємо значення підведеної до провідника механічної потужності, а в правій – значення електричної потужності, що розвивається в замкнутому колі струмом I під дією е.р.с. E . Отже, можна стверджувати, що даний макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється в електричну.

Якщо в цьому макеті замість опору навантаження увімкнути, рисунок 1.10, джерело живлення з напругою U , то в провіднику, під дією останньої, виникне електричний струм I від *плюса* джерела до *мінуса*.

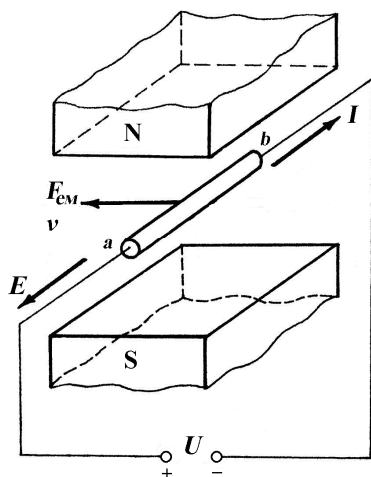


Рисунок 1.10 – Елементарний двигун

Як і в попередньому випадку на провідник буде діяти сила F_{em} , напрям якої визначиться правилом лівої руки і буде справа наліво. Під дією цієї сили провідник буде переміщатися в тому ж напрямі в якому діє F_{em} , що приведе до появи е.р.с. E . Скориставшись правилом правої руки, побачимо, що напрям е.р.с. протилежний напрямам струму та напруги.

Отже, згідно з *другим законом Кірхгофа* частина прикладеної напруги урівноважується тут е.р.с. E , а частина падінням напруги на якорі електричного кола R :

$$U = E + I + R \quad (1.5)$$

Помноживши обидві частини рівняння на струм I (який, звичайно, не дорівнює нулю), отримаємо:

$$U \cdot I = E \cdot I + I^2 \cdot R \quad (1.6)$$

Якщо в цьому рівнянні E замінити згідно з (1.1), то будемо мати:

$$U \cdot I = B \cdot l \cdot v \cdot I + I^2 \cdot R \quad (1.7)$$

або згідно з (1.2):

$$U \cdot I = F_{em} \cdot v + I^2 \cdot R \quad (1.8)$$

В лівій частині отриманого рівняння значення електричної потужності, що надходить в провідник із джерела живлення, а в правій те, в що вона перетворюється. Частково це, згідно з (1.3), механічна потужність ($F_{em} v$), а частково *електричні втрати* ($I^2 R$), що виникають в провіднику при протіканні струму. Отже, можна вважати, що в цьому випадку макет демонструє роботу *елементарного електродвигуна*.

Аналізуючи роботу макету в обох випадках, можна зробити висновки:

- щоб отримати електричну машину, необхідно мати магнітне поле, електропровідне середовище (провідник) та можливість їх взаємного переміщення;

- при роботі електричної машини як в режимі генератора, так і в режимі двигуна в її провідниках, що перетинають магнітне поле, створюється е.р.с. і виникають електромагнітні сили, що діють на провідник зі струмом в магнітному полі;

- взаємне перетворення механічної енергії в електричну і навпаки відбувається в електричній машині в будь-якому напрямі, тобто, одна і та ж машина може працювати і як двигун, і як генератор; ця властивість називається *оборотністю електричної машини*.

Розглянуті «елементарні» генератор та двигун відображують лише принцип використання в них основних законів та явищ електричного струму. Що стосується конструктивного виконання, то більшість електричних машин побудовані на обертовому русі однієї із двох складових частин, яка називається *ротором*. Нерухома частина називається *статором*. Ротор розміщений в розточці статора і відокремлений від нього *повітряним зазором*. В залежності від функціонального призначення, ці дві складові частини поділяють на *індуктор*, та частина машини, яка створює магнітне поле та *якір*, частина, в якій індуктується е.р.с. Розміщення індуктора і якоря на статорі чи роторі залежить від виду та призначення машини, але будь-яке їх розміщення не впливає на принцип роботи.

ГЛАВА 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).

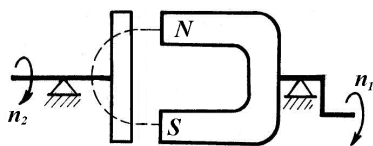


Рисунок 2.1 – Макет асинхронного двигуна

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 е.р.с. 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 е.р.с. і струми (отже, зникають електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1 .

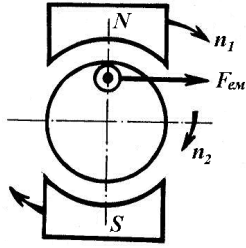


Рисунок 2.2 – До визначення напрямку обертання асинхронного двигуна

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначають напрям е.р.с. і, відповідно, струму) та лівої (напрямок електромагнітної сили F_{em}) руки. При цьому слід 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).

В реальному асинхронному двигуні кругове обертове поле, яке створює трифазна обмотка статора при живленні від мережі змінного струму, наводить е.р.с.

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:

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (2.1)$$

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

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

Статор машини має досить просту конструкцію. Він складається з корпусу, осердя та статорної обмотки. Розглянемо конструкцію статора асинхронного двигуна потужністю до 100 кВт. Корпус такого двигуна виконують, як правило, литим із чавуна або сплавів алюмінію з ребристою поверхнею для збільшення площі охолодження. Необхідність в цьому виникає через магнітні втрати, що мають місце в осерді статора (в 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 з підшипникових щитків – *фланцеве кріплення*). Зовні на корпусі розташовують клемну коробку, в яку виводять кінці обмоток. У трифазних двигунів таких кінців, як правило, шість, що дає змогу з'єднати обмотки за зіркою, чи трикутником (рис. 2.3).

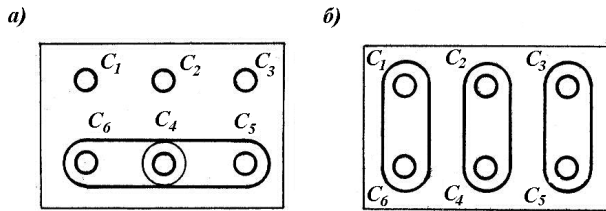


Рисунок 2.3 – Розташування кінців статорних обмоток та сполучення їх в зірку (а) та трикутник (б) в клемній коробці

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, в 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, в 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.

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

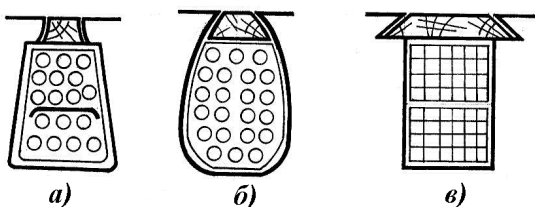


Рисунок 2.4 – Пази статора машини змінного струму трапецоїдний (а), грушуватий (б) та прямокутний (в)

Провідники по черзі опускають (всипають) в паз через щілину, яку створюють сусідні зубці. Після укладки обмотки в пази осердя, її просочують в спеціальних лаках, що надає їй монолітної конструкції, покращує теплопровідність, вологостійкість, електричну та механічну міцність. В машинах

потужністю більше 100 Вт і напругою вище 660 В, для підвищення електричної та механічної міцності ізоляції, обмотки виконують із жорстких

секцій (катушок), 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 в просторі осердя статора займає $1/3$ площі, а отже третину пазів $Z_1/3$.

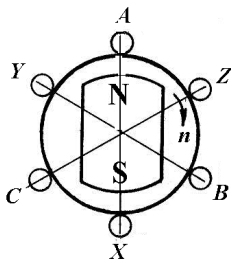


Рисунок 2.5 – До пояснення принципу утворення трифазної обмотки

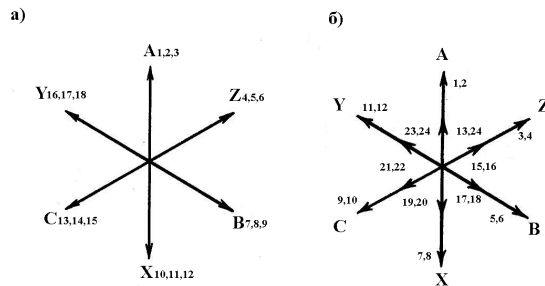


Рисунок 2.6 – Зірки пазових е.р.с. трифазних обмоток $2p=2; q=3$; (а) та $2p=4; q=2$ (б)

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 е.р.с. індукується в фазі А. Максимальна е.р.с. такого ж напрямку створиться в фазі В через проміжок часу, що відповідає повороту ротора на кут 120° . При повороті ротора ще на 120° максимальна е.р.с. буде створюватись в фазі С. Отже, при такому розміщенні обмоток в просторі статора, можна отримати необхідний зсув між е.р.с. 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) в такій послідовності (за напрямом обертання ротора): початок першої фази (А), кінець третьої (Z), початок другої (В), кінець першої (X), початок третьої (С), кінець другої (У). На (рис. 2.6, а) зображена просторова зірка пазових е.р.с. трифазної обмотки при $2p = 2$ і $q = 3$ з розбивкою пазів по зонах.

Якщо число пар полюсів машини більше одиниці, то зірку пазових е.р.с. при розподілі пазів «обходять» p раз (рис. 2.6, б), і отримують 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° ($360:4$), в шестиполюсній машині цей кут складає лише 60° і т.д. Отже геометричний кут в машині менший від електричного в p раз.

Ротор двигуна з короткозамкненою обмоткою складається з вала, на який насаджено пакет заліза з пазами, в яких розміщена короткозамкнена обмотка. Така обмотка, її ще називають «біляча клітка», уявляє собою ряд металевих (алюмінієвих чи мідних) стрижнів, розташованих в пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків короткозамкненими кільцями (рис. 2.4). 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.

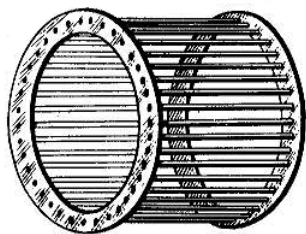


Рисунок 2.7 – «біляча клітка» – обмотка ротора

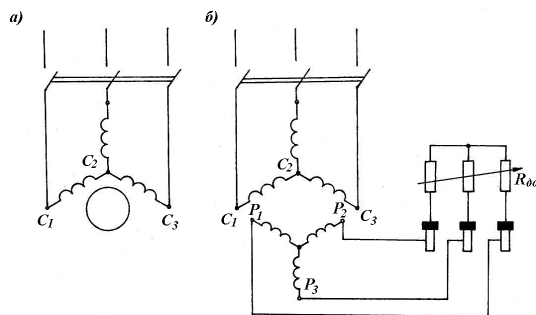


Рисунок 2.8 – Принципові схеми увімкнення трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим (а) і фазним (б) ротором

Короткозамкнена обмотка ротора у більшості двигунів виконується шляхом заливки зібраного осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом. При цьому, у деяких двигунів, одночасно на короткозамкнених кільцях відливаються і вентиляційні лопатки. Принципова схема увімкнення такого двигуна до мережі зображена на (рис. 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 закріплюються. Для здійснення електричного контакту з обмоткою ротора, який обертається, на кожне контактне кільце накладають, як правило, дві щітки, що розташовані у щіткотримачах. Кожен щіткотримач має

пружину, яка забезпечує необхідний тиск щітки на контактне кільце. Самі щіткотримачі закріплюються на передньому підшипниковому щиті двигуна і закриваються спеціальним кожухом.

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 регульовальні та пускові властивості завдяки можливості увімкнення в коло ротора додаткових опорів $R_{доод}$.

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

Проводити розрахунки для реального двигуна досить складно: магнітний зв'язок між ротором і статором, різні по величині е.р.с. та струми в обмотках ротора і статора, різні частоти струмів та е.р.с. і різна кількість фаз на статорі та роторі – все це практично унеможливорює 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 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 е.р.с. 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:

$$E_2' = E_2 k_\varepsilon \quad (2.3)$$

$$I_2' = I_2 / k_i \quad (2.4)$$

$$R_2' = R_2 k_r \quad (2.5)$$

$$X_2' = X_2 k_r \quad (2.6)$$

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

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

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

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

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \frac{1-s}{s} \quad (2.9)$$

Враховуючи (2.9), рівняння е.р.с. зведеної обмотки ротора виглядає як

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

В такому вигляді рівняння е.р.с. зведеної обмотки ротора уже не відрізняється від рівняння вторинної обмотки трансформатора, яка навантажена зведеним опором навантаження Z_n' ($U_2' = I_2' Z_n'$). Іншими словами, зведений асинхронний двигун можна розглядати, в такому випадку, як зведений трансформатор, що працює на змінне активне навантаження $R_2'(1-s)/s$.

$$P_2' = m_1 I_2'^2 R_2' (1-s)/s \quad (2.11)$$

Активна потужність, що виділяється вторинною обмоткою цього трансформатора уявляє собою *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 R_1 ; X_1 та зведеного ротора R_2' і X_2' . Діаграму будують для заданого навантаження, тобто, при відомому ковзанні двигуна s (рис. 2.9).

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

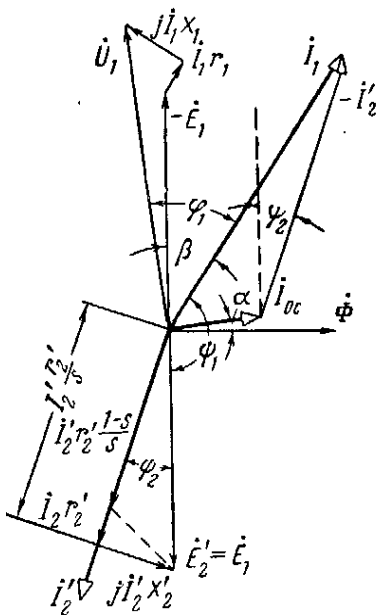


Рисунок 2.9 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

Вектор е.р.с. $\dot{E}_2' = \dot{E}_1'$ є результируючим вектором, що з'єднує початок координат з кінцем вектора $jI_2'X_2'$. Магнітний потік Φ_0 , що відстає від намагнічуючого струму I_0 на кут магнітного запізнення α , в свою чергу, на прямиий кут випереджає е.р.с., яку він створює. Побудувавши, з вже відомих векторів, рівняння струмів $I_1 = I_0 + (-I_2')$, отримаємо струм обмотки статора, за напрямом якого визначають напрями падіння напруги в колі обмотки статора і саму напругу \dot{U}_1 , прикладену до машини. Кути між величинами обмоток статора φ_1 та ротора ψ_2 отримують побудовою, проте кут зсуву струму I_2' відносно е.р.с., що його створює, \dot{E}_2' може бути отриманий і аналітичним шляхом.

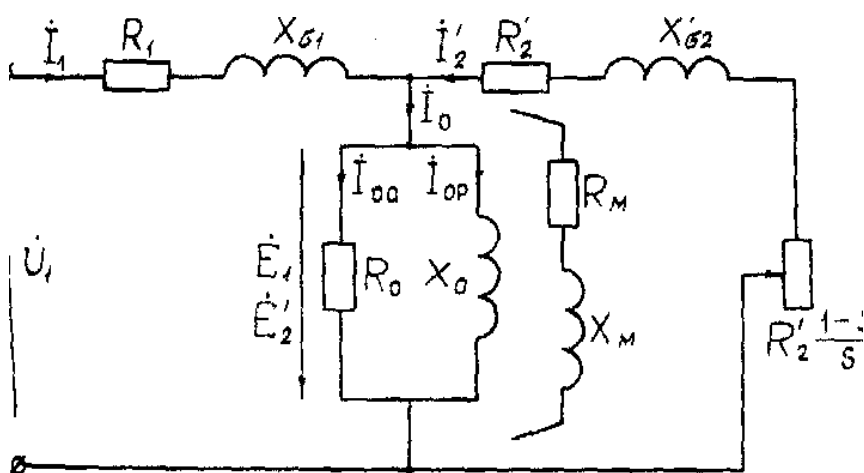


Рисунок 2.10 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

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

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 Z_n' замінити опором $R_2'(1-s)/s$ (рис. 2.10).

Таким чином, складання рівнянь е.р.с. обмоток і струмів двигуна та зведення параметрів обмотки статора дало можливість, в кінцевому результаті, побудувати електричну схему заміщення асинхронного двигуна. В ній реальний магнітний зв'язок між обмотками статора і ротора замінено електричним зв'язком обмоток. Активний опір $R_2'(1-s)/s$ – єдиний змінний параметр у схемі, значення якого визначається ковзанням, а отже, механічним навантаженням на валу. Так, якщо момент навантаження відсутній $M_2=0$ і ковзання вважати рівним нулю ($s \approx 0$), то $R_2'(1-s)/s = \infty$, що відповідає розімкненій обмотці ротора, тобто, режиму холостого ходу. Якщо момент навантаження перевищує момент, який може розвивати двигун, то останній зупиняється ($n_2=0$, $s=1$). При цьому $R_2'(1-s)/s=0$, 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 не затискачі напруги намагнічуючої вітки ($Z_m=R_m + jX_m$).

При спрощенні схеми заміщення трансформатора намагнічуючу вітку відмикали, нехтуючи незначним, у порівнянні з номінальним, намагнічуючим струмом. Поступати аналогічним чином 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 винесенні 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 I_0 та робочу зі струмом $-I_2'$.

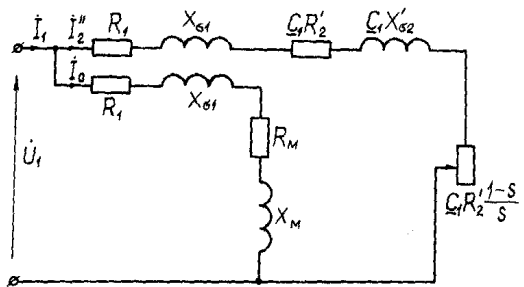


Рисунок 2.11 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

ротора асинхронного двигуна:

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

або з урахуванням (3.9) отримують

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

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

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

Електромагнітний момент асинхронного двигуна може бути виражений через електромагнітні величини машини. Так $M_{em} = P_{em} / \omega_1$, де $\omega_1 = 2\pi f_1 / p$ – кутова частота обертання магнітного поля, скориставшись, що $P_{em} = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2$, а $E_2 = 4.44 f_1 \Phi_{max} W_2 k_{об2}$ і, врахувавши що $4.44 = 2\pi / \sqrt{2}$, отримують:

$$M_{em} = p m_2 W_2 k_{об} \Phi_{max} I \cos \psi_2 / \sqrt{2} \quad (2.15)$$

або, замінивши $p m_2 W_2 k_{об} = k_m i \Phi_{max} / \sqrt{2}$, кінцеву формулу

$$M_{em} = k_m \Phi I_2 \cos \psi_2 \quad (2.16)$$

Порівнюючи (2.16) та рівняння електромагнітного моменту для машин постійного струму легко переконатись, що природа електромагнітного моменту асинхронного двигуна та машин постійного струму однакова, так як 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

$$P_{em} = P_{e2} / s = m_1 I_2'^2 R_2' / s.$$

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):

$$M_{em} = \frac{m_1 p U_1 R_2' / s}{2\pi f_1 \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (2.17)$$

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

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

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

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

$$M_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 (X_1 + X_2')^2 s}$$

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

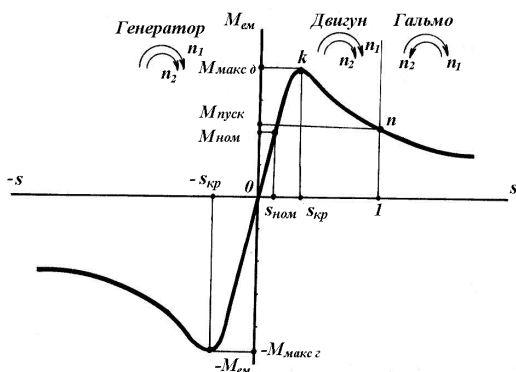


Рисунок 2.12 – Залежність $M_{em} = f(s)$ для асинхронної машини

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

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

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

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

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

аналогічно і максимальний момент

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

Слід зазначити, що згідно з (2.19) максимальний момент генераторного режиму, дещо більший, ніж режиму двигуна ($M_{\max z} > M_{\max d}$).

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

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

Досить часто, замість залежності $M_{em} = f(s)$ користуються залежністю $n_2(s) = f(M_{em})$ (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*

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

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

нестійкої роботи. Відношення максимального моменту, який розвиває двигун, до номінального ($\lambda = M_{\text{макс}}/M_{\text{ном}}$) називається *перевантажувальною здатністю* двигуна. Для двигунів загального призначення $\lambda = 1,7 \div 2,5$.

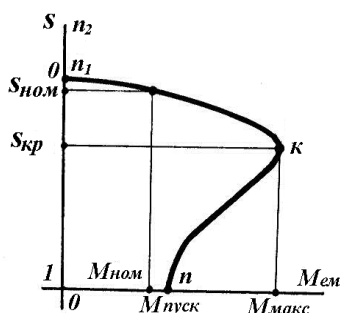


Рисунок 2.11 – Залежність частоти обертання (ковзання) від електромагнітного моменту асинхронного двигуна

Як правило, номінальний момент машини менший від пускового, що дозволяє здійснити пуск двигуна з номінальним навантаженням, цю властивість двигуна називають *пусковою здатністю* $\mu = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ (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

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

а критичне ковзання

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

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: $M_{\text{ем}} \equiv U_1^2$. Одночасно, згідно з (2.18), впливає, що критичне ковзання не залежить від напруги U_1 (значення U_1 відсутнє в формулі критичного ковзання). Це дає можливість побудувати механічні характеристики $M_{\text{ем}} = f(s)$ для різних значень напруги (рис. 2.12) із яких випливає, що коливання напруги мережі U_1 відносно номінального значення $U_{1\text{ном}}$ 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, так як 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 досить часто, при зростанні навантаження, напруга в мережі знижується, що негативно впливає на роботу двигуна. Так, якщо напруга мережі U_1 знизилась на 30%,

тобто, стала $U_I = 0,7 U_{Iном}$ то максимальний і пусковий момент знизяться 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 при номінальній напрузі $\lambda = M_{малс} / M_{ном} = 2$, то при зниженні напруги двигун при такому зниженні напруги не може нести навіть номінального навантаження, що приведе до його зупинки і, в кінцевому результаті, до виходу з ладу.

Пуск асинхронних двигунів с 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 $R_{2п.м} = R_2' + R_{\delta}'$, де R_{δ}' – значення додаткового пускового опору зведене до обмотки статора.

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

$$s_{кр} = (R_2' + R_{\delta.макс}') / (X_1 + X_2') = 1$$

де $R_{\delta.макс}'$ – зведений до обмотки статора додатковий пусковий опір, при якому $M_{п.м} = M_{макс}$. Таким чином,

$$R_{2п.м}' = R_2' + R_{\delta.макс}' = X_1 + X_2' \quad (2.25)$$

де $R_{2п.м}'$ – опір кола ротора при якому $M_{п.м} = M_{макс}$. При $R_{2п.м}' > X_1 + X_2'$ пусковий момент зменшується.

При виборі додаткового пускового опору R_{δ}' виходять з умов пуску

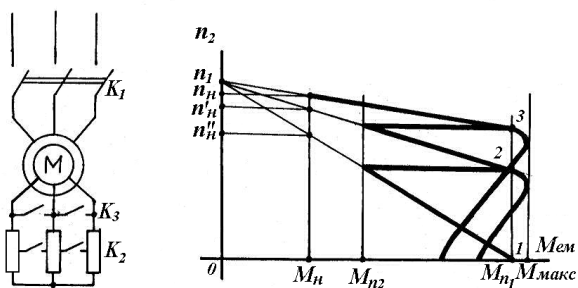


Рисунок 2.14 – Схема увімкнення додаткових опорів (а) і побудова пускових характеристик (б) асинхронного двигуна з фазним ротором

двигуна: якщо двигун умикають при значному моменті навантаження на валу, додатковий пусковий опір вибирають таким, щоб забезпечити найбільший пусковий момент, тобто $R_{\delta}' = R_{\delta.макс}'$. 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, при якому $M_{п.м} = M_{макс}$, тобто $R_{2п.м.}' > X_1 + X_2'$.

В 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. Так, в початковий момент пуску (перша ступінь опору – увімкнено контакти K_1) пусковий момент рівний M_{n1} . По мірі розгону двигуна, його момент знижується по характеристиці 1 до моменту M_{n2} , коли вмикаються контакти K_2 , опір в колі ротора знижується, двигун переходить на криву 2 і пусковий момент знову досягає M_{n1} . Після нового зниження моменту до M_{n2} , вмикаються контакти K_3 і двигун виходить на природну характеристику 3, що знову підвищує пусковий момент до M_{n1} . По природній характеристиці 3 двигун досягає частоти обертання, при якій момент, що розвиває двигун, урівноважується моментом навантаження M_n . Якщо при розгоні двигуна не увімкнуться контакти K_2 чи K_3 , двигун по відповідній характеристиці досягне частоти n''_n чи n'_n і буде працювати саме з цією частотою обертання, тому що в цих точках M_{em} двигуна рівний моменту навантаження M_n .

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 їх 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 мають місце при цьому.

При увімкненні обмотки статора до мережі, з останньої до статора машини поступає активна *електрична потужність*

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1 \quad (2.26)$$

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

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1 \quad (2.27)$$

Обертаючись, магнітний потік перемагнічує залізо статора, що приводить 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

$$P_{em} = m_1 E_1 I_1 \cos \psi_1 = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = M_{em} \omega_1 \quad (2.28)$$

Е.р.с. E_2 , що магнітним потоком створюється у обмотці ротора, викликає струм I_2 , протікання якого по обмотці, веде до появи електричних втрат в цій обмотці, однакових як у реальному, так і у зведеному двигуні.

$$P_{e2} = m_1 I_2^2 R_2' = m_1 I_2'^2 R_2' \quad (2.29)$$

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

$$P_{em} - P_{e2} = P_2',$$

або

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

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

$$P_{e2} = P_{em} s, \quad (2.31)$$

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

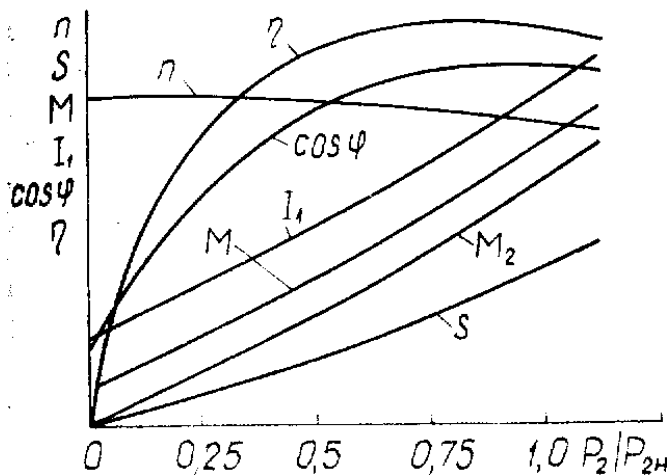
Повна механічна потужність P_2' приводить ротор до обертання, що викликає *механічні втрати*, пропорційні квадрату частоти обертання ротора ($P_{мех} \equiv n_2^2$). Ці втрати, як і в машині постійного струму, складаються із втрат на тертя ($P_{тертя}$) та вентиляційних втрат ($P_{вент}$):

$$P_{мех} = P_{тертя} + P_{вент} \quad (2.32)$$

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

$$P_{одд} = 0,005 P_1 \quad (2.33)$$

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 N через відповідну даній потужності точку на коловій діаграмі зі шкалою ковзання покаже значення ковзання. Шкала ковзання проводиться паралельно лінії електромагнітної потужності. Точка Q знаходиться на

Рисунок 2.17 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

перетині вертикалі проведеної через точку N 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 з фазними та короткозамкненими роторами

Частота обертання визначається за формулою:

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

Звідси слід, 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 їх 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, перш за все, з тим, що маючи просту конструкцію, досить високу надійність в експлуатації, ці двигуни складають основну частину парку електродвигунів, що використовуються у усіх сферах виробництва. Простота і економічність пуску та регулювання частоти обертання таких двигунів дозволили б, якби мали

місце, 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, в першу чергу, значенням пускового струму або його кратністю $i_{\text{пуск}} = I_{\text{пуск}}/I_{\text{ном}}$ 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)

$$M_{\text{пуск}} = k_m \Phi I_{2\text{пуск}} \cos \psi_2 \quad (2.38)$$

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

Так як 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 з тим, індуктивний опір обмотки ротора при пуску досить значний в порівнянні 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 привести до небажаних наслідків.

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

$$I_{2\text{пуск}} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (2.39)$$

З (2.39) витікає, що для зниження пускового струму слід 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 зниженню напруги, а пусковий момент – пропорційно квадрату

напруги, що дозволить провести пуск двигуна лише при відсутності навантаження на валу. Достойність застосування того чи іншого способу покращення пускових властивостей визначається конкретними умовами експлуатації двигуна і вимогами, що ставлять 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, їх 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 в роботі двигунам з короткозамкненим ротором кращі пускові характеристики, розроблені двоклітні двигуни і двигуни з глибоким пазом. На роторі двоклітнього 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 в робочій обмотці відстає за фазою від наведеної ЕРС в цій обмотці майже на 90° і тому створює незначний обертовий момент, а струм в пусковій обмотці майже співпадає з наведеною в ній ЕРС, тому створює при 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 їх 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 покращення 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.

ГЛАВА 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).



Рисунок 3.1 – Макети однофазного зворотної конструкції (а) та трифазного прямої конструкції (б) синхронних генераторів

При обертанні електропровідної рамки A в магнітному полі з кутовою частотою обертання ω , в її провідниках, згідно з законом електромагнітної індукції, створюється змінна е.р.с. 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 в макеті (рис. 2.1, а) необхідно додати ще дві рамки B і C , зсунувши їх в просторі на електричний кут в 120° . При цьому в кожній рамці будуть створюватись е.р.с., миттєві значення яких зсунуті в часі на кут 120° .

$$\begin{cases} e_A = E_{\text{макс}} \sin \omega t \\ e_B = E_{\text{макс}} \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_{\text{макс}} \sin(\omega t - 240^\circ) \end{cases} \quad (3.1)$$

Враховуючи, що рамки обертаються, для увімкнення трифазного навантаження, в макеті (рис. 3.1, а) слід передбачити чотири контактні кільця

(три фази та нейтрал). Така конструкція синхронного генератора називається *зворотною* і може іноді застосовуватись для генераторів невеликої потужності.

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

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 напрямі, зворотному напрямку обертання ротора, враховуючи, що $n_1 = n$, поле якоря буде нерухомим відносно статора. Таким чином, при обох варіантах 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, в залежності від призначення та габаритів машини. Так, 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.

В залежності від первинного (привідного) двигуна (головним чином, застосовують три види приводних 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 досить висока: на теплових станціях 3000 об/хв, а на атомних – 1500 об/хв, тому вони використовуються, відповідно, з однією та двома парами полюсів на роторі неявнополюсної конструкції (рис. 3.2, а).

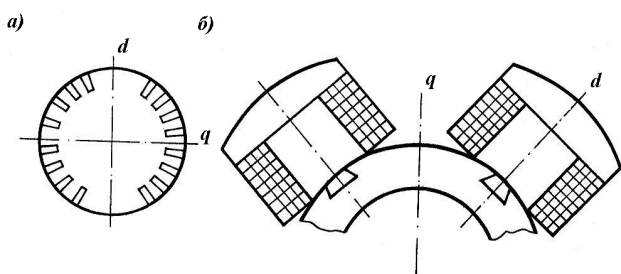


Рисунок 3.2 – Конструкція ротора неявнополюсного (а) та явнополюсного (б) синхронного генератора

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.

Вздовж вісі ротора по всій довжині висвердлюють центральний отвір, який служить для дослідження матеріалу центральної частини ротора і для розвантаження поковки від небезпечних внутрішніх напруг.

Гідрогенератор. Частота обертання гідротурбіни, яка приводить до обертання гідрогенератор, в залежності від потужності турбіни та напору води, складає від 50 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 направляючих підшипники, один з них біля жорсткого фланцевого з'єднання валів генератора і турбіни.

Механічна міцність різних деталей гідрогенераторів розраховується по, так званій, руйнівній частоті обертання, яка в 2 - 3 рази більша від номінальної і може мати місце 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 $600 \div 1500$ об/хв.

Дизель-генератори, в порівнянні 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 ставлять ряд вимог:

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

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

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

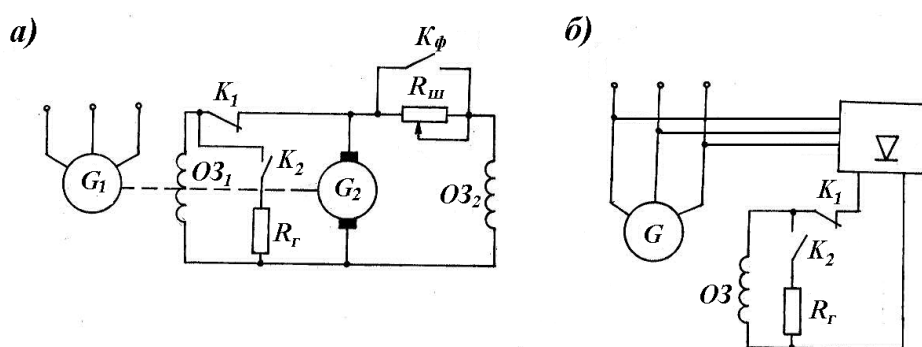


Рисунок 3.3 – Електромашинна система збудження (а) та система с самозбудженням (б) синхронних генераторів

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, як правило, 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 форсировку збудження синхронного генератора контактором K_{ϕ} , що шунтує опір в колі збудження збуджувача. Гасіння магнітного поля (рис. 3.3) здійснюється в такій послідовності: вмикається контактор K_2 (шунтують опором R_2 , величина якого приблизно в п'ять раз більша, ніж опір обмотки збудження, саму обмотку), потім розмикається контактор K_1 і енергія, що накопичується в обмотці збудження, гаситься на резисторі R_2 , 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. Різновидністю вентильного збудження є безщіткова система збудження. В цьому випадку на валу основної синхронної машини розміщують якор 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 при різному характері навантаження синхронних генераторів

Як відомо основний магнітний потік синхронного генератора створюється постійним струмом, що протікає по обмотці збудження. В режимі холостого ходу в машині має місце лише один основний потік Φ_{ϕ} . 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 має місце також в 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 у усіх трьох фазах створюються однакові е.р.с. 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 ($i_1 = I_{\max}$) – в цьому випадку вісь фази співпадає з віссю результуючої м.р.с. статора.

В загальному випадку навантаження синхронного генератора змішане (активно-індуктивне чи активно-ємкісне). Але, розглядаючи реакцію якоря, простіше розглянути крайні випадки: $\psi = 0$ – активне навантаження, е.р.с. і струм співпадають; $\psi = 90^\circ$ – індуктивне навантаження, е.р.с. випереджає струм на 90° ; $\psi = -90^\circ$ – ємкісне навантаження, струм випереджає е.р.с. на кут 90° . Найбільш наглядно пояснюється реакція якоря за допомогою векторних діаграм (рис. 3.4). При побудові таких діаграм, слід мати на увазі, що вектор е.р.с. \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 I_1 співпадає з е.р.с. \dot{E}_0 , під дією якої він виникає, і тому направлений по поперечній вісі генератора. Цей же напрям має і потік реакції якоря Φ_{aq} , так як співпадає по напрямку з м.р.с. \dot{F}_1 , а також, зі струмом I_1 . Враховуючи це, можна зробити висновок, що при активному навантаженні реакція якоря синхронного генератора направлена по поперечній вісі і, практично не відрізняється від реакції якоря, що має місце в генераторі постійного струму, тобто розмагнічує набігаючий і підмагнічує збігаючий край полюса, викривляючи основне поле. Так як 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, приводить до зниження е.р.с. машини \dot{E}_0 .

Індуктивне навантаження ($\psi = 90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні струм статора I_1 , при ємкісному навантаженні, випереджує е.р.с. \dot{E}_0 на кут $\psi = 90^\circ$ (рис. 3.4, б). Це приводить до появи магнітного потоку реакції якоря $\dot{\Phi}_{ad}$, направлено на зустріч основному потоку машини по вісі d . Отже, реакція якоря синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні має *поздовжно-розмагнічувальну дію*. На відміну від реакції якоря при активному навантаженні, в цьому випадку, магнітне поле не викривляється.

Ємкісне навантаження ($\psi = -90^\circ$). Так як струм I_1 , при ємкісному навантаженні, випереджує е.р.с. \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 ємкісному навантаженні реакція якоря має

поздовжно-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 I_1 зсунутий відносно е.р.с. 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 $\Phi_{aq} = \Phi_a \cos \psi_1$ осях. І при активно-індуктивному і при активно-ємнісному навантаженнях складова потоку Φ_{ad} відстає від основного потоку Φ_0 , а складова Φ_{aq} 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 ряду причин: реакцією якоря, магнітним потоком розсіювання, падінням напруги на активному опорі обмотки статора.

Звичайно при навантаженні, в магнітному колі машини обертається результуючий магнітний потік, але щоб простіше зрозуміти вплив усіх факторів, що діють при роботі навантаженої машини, розглядають дію складових результуючого потоку окремо.

У навантаженому явнополюсному синхронному генераторі результуючий магнітний потік створюється такими м.р.с.: основна м.р.с., що створюється обмоткою збудження F_0 , м.р.с. реакції якоря по поздовжній вісі F_{ad} та поперечній вісі F_{aq} , і магнітним потоком розсіювання Φ_0 . Магнітні потоки, кожної з цих м.р.с., і потік розсіювання. Створюють в обмотці статора кожен свою е.р.с.

1. Основний магнітний потік Φ_0 , зчіплюючись з обмоткою статора, індукує в ній основну е.р.с. генератора E_0 .

2. Магнітний потік реакції якоря по поздовжній вісі Φ_{ad} створює в обмотці статора е.р.с.

$$\dot{E}_{ad} = -jI_d X_{ad} \quad , \quad (3.2)$$

де $I_d = I_1 \sin \psi_1$ – реактивна складова частина струму навантаження (проекція струму статора на поздовжню ось машини); X_{ad} – індуктивний опір реакції якоря по поздовжній вісі генератора, що характеризує рівень впливу реакції якоря по поздовжній вісі машини на роботу синхронного генератора: так 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 вісі машині Φ_{aq} створює в обмотці статора е.р.с.

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

де $I_q = I_1 \sin \psi_1$ – реактивна складова частина струму навантаження (проекція струму статора на поздовжню вісь машини); X_{aq} – індуктивний опір реакції якоря по поперечній вісі 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 Φ_σ створює в обмотці статора е.р.с. розсіювання

$$\dot{E}_\sigma = -j\dot{I}_1 X_\sigma, \quad (3.4)$$

де X_σ – індуктивний опір розсіювання, аналогічний індуктивному опору X_l обмоток трансформатора та асинхронного двигуна.

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

$$\dot{U}_{a1} = \dot{I}_1 R_1 \quad (3.5)$$

Згідно з другим законом Кірхгофа, враховуючи вище названі е.р.с. та падіння напруги, складають рівняння.

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - \dot{I}_1 R_1 = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma - \dot{I}_1 R_1 \quad (3.6)$$

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

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

$$\dot{U}_1 \approx \sum \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_\sigma \quad (3.7)$$

Рівняння (3.6) та (3.7) уявляють собою *рівняння е.р.с. явнополюсного синхронного генератора*.

Розглядаючи рівняння е.р.с. неявнополюсної машини, слід мати на увазі, що індуктивні опори реакції якоря по поздовжній та поперечній осях, практично, однакові:

$$X_{ad} \approx X_{aq} \approx X_a \quad (3.8)$$

де X_a – індуктивний опір реакції якоря статорної обмотки. З урахуванням цього, немає потреби розділяти реакцію якоря такої машини на складові по осям, а отже е.р.с. викликана магнітним полем реакції якоря, буде виражена як

$$\dot{E}_a = j\dot{I}_1 X_a \quad (3.9)$$

Потік реакції якоря і магнітний потік розсіяння створюється одним струмом I_1 , тому можна об'єднати індуктивні опори X_a і X_σ , розглядаючи їх як єдиний опір

$$X_c = X_a + X_\sigma \quad (3.10)$$

де X_c – синхронний опір неявнополюсної машини.

Відповідно і суму е.р.с. E_a та E_σ слід розглядати як одну синхронну е.р.с.

$$E_c = E_a + E_\sigma = -jI_1 X_a - jI_1 X_\sigma = -jI_1 X_c \quad (3.11)$$

З урахуванням викладеного, рівняння е.р.с. неявнополюсного синхронного генератора буде мати вигляд

$$\dot{U}_1 = \sum \dot{E} - I_1 R_1 = E_0 - jI_1 X_c - I_1 R_1 = E_0 + E_c - I_1 R_1, \quad (3.12)$$

або, нехтуючи $I_1 R_1$

$$\dot{U}_1 \approx \sum \dot{E} = E_0 - jI_1 X_c = E_0 + E_c. \quad (3.13)$$

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: е.р.с. генератора в режимі НХ. E_0 , струм навантаження I_1 , кут між е.р.с. та струмом $\cos \psi_1$, поздовжній X_{ad} і поперечний X_{aq} реактивні опори реакції якоря, активний опір фазної обмотки статора R_1 .

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

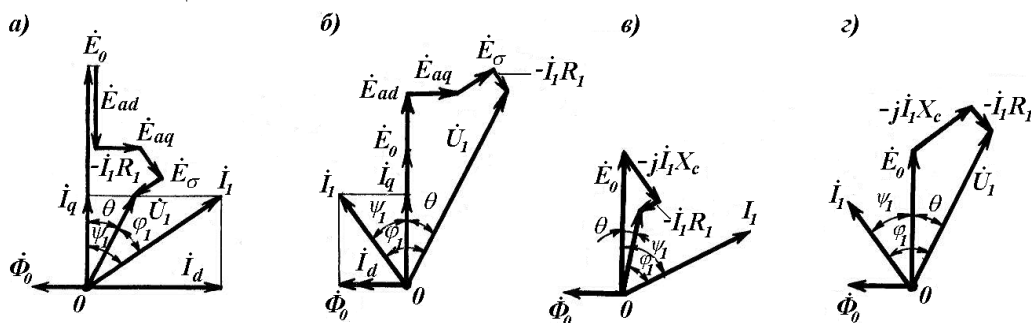
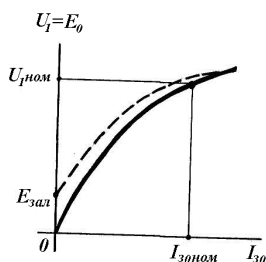
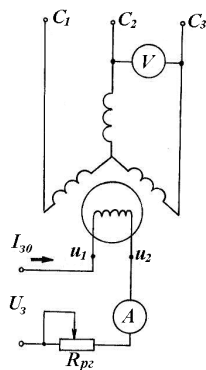


Рисунок 3.4 – Векторні діаграми явнополюсного (а), (б) та неявнополюсного (в), (г) синхронних генераторів при активно-індуктивному (а), (в) і активно-ємнісному (б), (г) навантаженнях

Побудову векторно-потенційних діаграм (рис. 3.4) розпочинають з того, що довільно вказують напрям основного магнітного потоку Φ_0 . На прямиий кут відстає від потоку е.р.с. E_0 , яку він створює. Під кутом ψ_1 вправо (рис. 3.4, а, в), або вліво (рис. 3.4 б, г), в залежності 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 е.р.с. E_0 , відкладаються вектори е.р.с. $E_{ad} = -jI_d X_{ad}$, $E_{aq} = -jI_q X_{aq}$, $E_\sigma = -jI_1 X_\sigma$ 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 θ – початок координат з кінцем вектора U_{a1} , отримують вектор напруги U_1 , що має місце 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 е.р.с. E_{ad} ; при роботі генератора на активно-індуктивне навантаження, тобто зі струмом I_1 , що відстає по фазі від е.р.с. E_0 , напруга U_1 на затискачах обмотки статора генератора при збільшенні навантаження знижується, що пояснюється розмагнічувальною дією реакції якоря; при роботі на активно - ємнісне навантаження (зі струмом, що випереджує по фазі е.р.с. E_0) напруга U_1 , зі збільшенням навантаження, збільшується, що пояснюється підмагнічувальною дією реакції якоря (рис. 3.4, б, г).



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

Характеристики холостого ходу.

Ці характеристики уявляють собою залежність на виході генератора в режимі НХ. $U_1 = E_0$ від струму збудження I_{30} при $n = const$. Такі характеристики знімаються за схемою (рис. 3.5, а) і уявляють собою: теоретичну криву намагнічування для

Рисунок 3.5 – Схема проведення дослідів (а) та характеристики (б) холостого ходу синхронного генератора

матеріалів, з яких складається магнітне коло генератора – суцільна крива на (рис. 3.5, б) та, показану пунктирною лінією, дослідну характеристику холостого ходу, що зміщена вліво, від теоретичної кривої: при струмі $I_{30} = 0$ е.р.с. не дорівнює 0, тому що має місце е.р.с. $E_{зал} = (2 \div 3) \% U_{ном}$, створена залишковим магнетизмом попереднього намагнічування.

Струм збудження $I_{30ном}$ (рис. 3.5, б) – це такий струм збудження, який при неробочому ході створює номінальну напругу $U_{ном}$.

Враховуючи, що магнітні системи усіх синхронних генераторів виконують з одних і тих же матеріалів, їх характеристики холостого ходу (побудовані у відносних одиницях $E_{0*} = f(I_{3*})$, де $E_{0*} = E_0 / U_{ном}$, а $I_{3*} = I_3 / I_{3ном}$) будуть виражатись кривою, що називається *нормальною характеристикою НХ*:

I_{3*}	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 $E_{*ГГ}$ – е.р.с. гідрогенератора, $E_{*ТГ}$ – е.р.с. турбогенератора.

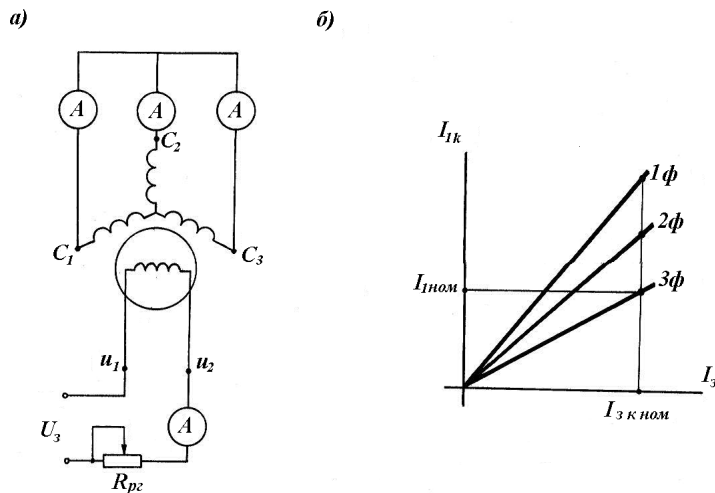


Рисунок 3.6 – Схема проведення дослідів (а) та характеристики (б) короткого замикання синхронного генератора

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 в статорі не перевищував номінальний

струм більше, ніж на 25% ($I_{Ik} < 1.25 I_{Iном}$). При цьому е.р.с. статора E_k буде в кілька разів менша, ніж у робочому режимі генератора, і, відповідно, основний магнітний потік також буде досить малим, а магнітна система генератора ненасиченою. З цієї причини характеристики КЗ будуть уявляти прямі лінії, що проходять через початок координат (рис. 3.6, б).

Як уже відзначалось, активний опір обмотки статора R_1 у порівнянні з її індуктивним опором незначний, тому, знехтувавши ним ($R_1 \approx 0$), можна вважати струм КЗ чисто індуктивним, а отже, реакція якоря при КЗ поздовжнорозмагнічувальна. Саме цим і пояснюється незначний струм трифазного КЗ, у порівнянні 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, в свою чергу, зменшує е.р.с. E_k і відповідно струм КЗ.

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

$$0 \approx E_k + E_{ad} + E_\sigma \quad (3.14)$$

Із (3.14) випливає, що е.р.с. E_k , яка створюється в обмотці статора при КЗ, урівноважується падінням напруги на індуктивному опорі розсіювання $jI_{Ik}X_l$ та розмагнічувальною дією реакції якоря $jI_{Ik}X_{ad}$ (при $I_q = 0$; $I_d = I_{Ik}$).

Струм збудження, що в режимі трифазного КЗ створює номінальний струм в обмотці статора $I_{Iном}$, на вісі абсцис (рис. 3.6, б) позначений, як $I_{3к ном}$. Відношення струмів збудження, того, що при НХ створює номінальну напругу, $I_{30 ном}$, та того, що при КЗ створює номінальний струм, $I_{3к ном}$, називають відношенням короткого замикання генератора **в.к.з.**, що є одним з важливих параметрів синхронної машини

$$в.к.з. = I_{30 ном} / I_{3к ном} \quad (3.15)$$

Для турбогенераторів $в.к.з. = 0.4 \div 0.7$; для гідрогенераторів $в.к.з. = 1.0 \div 1.4$. 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 уявляють собою залежність напруги на затискачах обмотки статора від струму навантаження: $U_1 = f(I_1)$ при $I_3 = const, \cos\varphi_1 = const, n = const$.

Слід мати на увазі, що I_3 та $\cos\varphi_1$ постійні лише в межах заданого характеру навантаження.

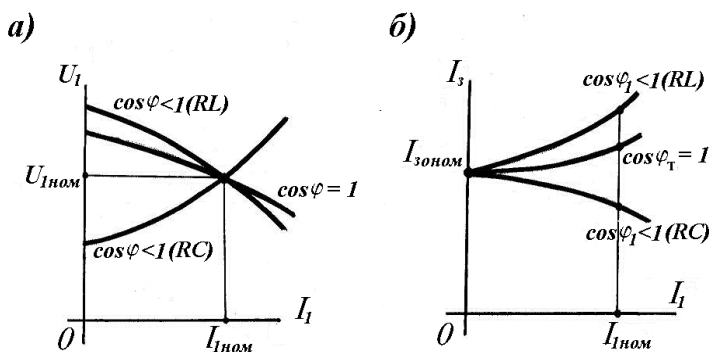


Рисунок 3.7 – Зовнішні (а) та регулювальні (б) характеристики синхронного генератора

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 вісі.

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 вісі.

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

Зміна напруги синхронного генератора, при скиданні номінального навантаження при $I_3 = const$ і $n = const$, називається *номінальною зміною (підвищенням напруги (%))*:

$$\Delta U_{ном} = \frac{E_0 - U_{1ном}}{U_{1ном}} \cdot 100. \quad (3.16)$$

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

В процесі експлуатації синхронного генератора напруга U_1 при коливанні навантаження підтримується незмінною за рахунок швидкодіючих автоматичних регуляторів. Щоб запобігти пошкодженню ізоляції обмотки статора, $\Delta U_{ном}$ не повинна перевищувати 50%.

Регулювальні характеристики. Регулювальні характеристики показують, як потрібно змінювати струм збудження генератора при зміні навантаження, щоб напруга на затискачах залишалась незмінно рівною номінальній: $I_z = f(I_1)$ 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, слід збільшувати струм збудження. *Активно-індуктивний* характер навантаження ($\cos\varphi_1 < 1$, RL) викликає більш різке падіння напруги U_1 (рис. 4.7, 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 в 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 $P_{el} = m_1 I_1^2 R_1$, де R_1 – активний опір однієї фази обмотки статора при розрахунковій робочій температурі. Слід зазначити, що враховуючи незначну величину активного опору, цими втратами досить часто нехтують, особливо при визначенні розрахункових величин, що не потребують значної точності.

Втрати на збудження:

- при збудженні від окремого збуджувального пристрою

$$P_3 = I_z^2 R_z + \Delta U_{щ} I_z, \quad (3.17)$$

де R_z – опір обмотки збудження, зведений до робочої температури;

$\Delta U_{щ} = 2 B$ – падіння напруги в контакті «щітка-кільце».

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

$$P_3 = (I_z^2 R_z + \Delta U_{щ} I_z) / \eta_z, \quad (3.18)$$

де η_z – ККД збуджувача; в цьому випадку втрати на збудження рівні підведеній до збуджувача потужності, тобто, P_1 збуджувача.

Магнітні втрати синхронної машини відбуваються в осереді 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 рівні сумі втрат на тертя та вентиляцію, як і у асинхронному двигуні і при самовентиляції можуть бути розраховані (приблизно).

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

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_n в полюсних наконечниках ротора зумовлені пульсацією магнітної індукції в зазорі через зубчасту внутрішню поверхню статора.

Додаткові втрати при навантаженні $P_{\text{доод}}$ в синхронних машинах визначаються, як і в інших електричних машинах, в % від підведеної потужності двигуна або від корисної потужності генератора. Для синхронних машин потужністю до 1000 кВт додаткові втрати при навантаженні приймають рівними 0,5%, а для машин потужністю більше 1000 кВт – 0,25 ÷ 0,4%.

Загальні втрати синхронної машини

$$\Sigma P = P_{e1} + P_z + P_{\text{мех}} + P_{\text{маг}} + P_n + P_{\text{доод}}. \quad (3.21)$$

Коефіцієнт корисної дії:

Для синхронного генератора

$$\eta_2 = 1 - \Sigma P / (P_{I_{\text{ном}}} + \Sigma P), \quad (3.22)$$

де

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

- активна потужність, що відбирається від генератора при номінальних фазних струмі $I_{I_{\text{ном}}}$ та напрузі $U_{I_{\text{ном}}}$ (при номінальному навантаженні);

ККД синхронної машини залежить від величини навантаження ($\beta = P_2 / P_{\text{ном}}$) 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

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

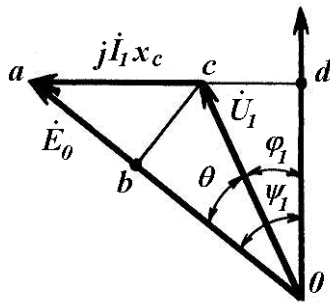


Рисунок 3.8 – До визначення електромагнітної потужності неявнопольсного синхронного генератора

Для дослідження паралельної роботи ця формула не досить зручна, тому що, як відзначалось раніше, потужність, що віддається до мережі цілком залежить від часового зсуву між е.р.с. E_0 та напругою мережі U_1 (або просторового між всіма полюсів поля ротора та статора), тобто, від кута вильоту ротора θ . Щоб вивести залежність електромагнітної потужності від кута θ , користуються спрощеною векторно-потенційною діаграмою явнопольсного 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 :

$$P_{em} = \frac{m \cdot U_1 \cdot E_0}{x_c} \sin \theta. \quad (3.25)$$

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

$$M_{em} = \frac{m_1 \cdot U_1 \cdot E_0}{\omega x_c} \sin \theta. \quad (3.26)$$

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

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

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

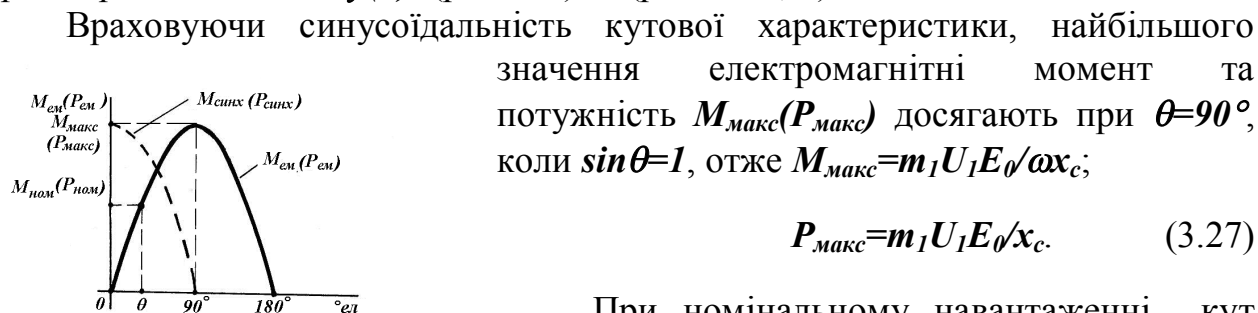


Рисунок 3.9 – Електромагнітний (потужність) та синхронізуючий момент неявнополюсного генератора

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

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

При номінальному навантаженні кут $\theta_{ном} = 20 \div 35^\circ$. Статична перевантажувальність неявнополюсного генератора, тобто відношення максимального моменту до номінального $\lambda = M_{макс} / M_{ном}$ складає

відповідно $1,75 \div 2,90$.

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

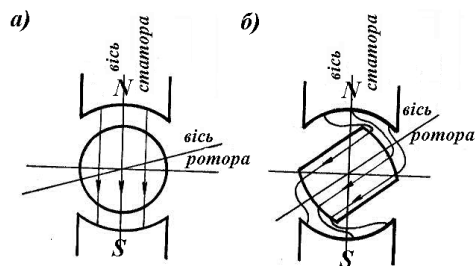


Рисунок 3.10 - Для магнітних ліній поля в неявнополюсній (а) та явнополюсній (б) машинах

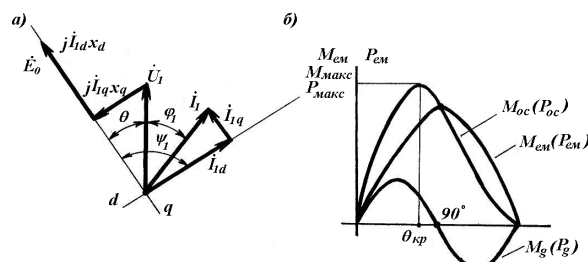


Рисунок 3.11 - Векторно-потенційна діаграма (а) та кутові характеристики (б) явнополюсного синхронного генератора

Електромагнітні процеси, які відбуваються в синхронній явнополюсній машині, до деякої міри, відрізняються від процесів, що мають місце 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 вісі по відношенню до вісі поля статора. В 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 приводить до появи в явнополюсному генераторі додаткового електромагнітного момента (потужності), не пов'язаного з основним магнітним полем машини. Тобто, у явнополюсній машині, крім основного електромагнітного момента M_{oc} (аналогічного з електромагнітним моментом неявнополюсного генератора), буде створюватись ще один, додатковий момент, M_d .

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

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

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

$$\begin{aligned} P_{em} &= m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot \cos(\psi_1 - \theta) = m_1 \cdot U_1 \cdot I_1 \cdot (\cos \psi_1 \cdot \cos \theta + \sin \psi_1 \sin \theta) = \\ &= m_1 \cdot U_1 \cdot (I_{1q} \cdot \cos \theta + I_{1d} \cdot \sin \theta), \end{aligned} \quad (3.29)$$

де $I_{1q} = I_1 \cos \psi$ – активна складова частина струму статора;

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

Враховуючи, що (рис. 3.11, а)

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

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

визначають значення складових частин струму статора:

$$I_{1d} = \frac{E_0 - U_1 \cos \theta}{x_d} ; \quad I_{1q} = \frac{U_1 \sin \theta}{x_q} . \quad (3.30)$$

Отримані значення струмів підставляють в (3.29):

$$\begin{aligned} P_{em} &= m \cdot U_1 \left(\frac{U_1 \sin \theta}{x_q} \cdot \cos \theta + \frac{E_0 - U_1 \cos \theta}{x_d} \sin \theta \right) = \\ &= \frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d} \cdot \sin \theta + \frac{m_1 \cdot U_1^2}{x_q} \cdot \sin \theta \cos \theta - \frac{m_1 \cdot U_1^2}{x_d} \cdot \sin \theta \cdot \cos \theta \end{aligned}$$

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

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

де $\frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d} \sin \theta = P_{oc}$ – основна частина електромагнітної потужності, викликана взаємодією струму статора з основним магнітним потоком

машини, (так як у формулу цієї складової входить величина е.р.с. E_0 , яка створюється основним потоком, та напруга мережі, що викликає струм статора);

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

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

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

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

При роботі 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 вісями магнітних полів, що створюються струмами цих обмоток.

Результуючий магнітний потік кожного синхронного генератора, який виникає при взаємодії основного поля і поля статора, обертається з такою ж частотою обертання, як і поля статора, тому і ротори усіх синхронних машин можна вважати як з'єднані між собою. На відміну від полів статора, які «з'єднані жорсткою муфтою», ротори слід розглядати як такі, що «з'єднані еластичною муфтою», яка дозволяє осям роторів відхилятися на електричний кут в 180° (від -90° в режимі двигуна до $+90^\circ$ в режимі генератора). Таку еластичну муфту можна розглядати як дію мережі, на кожен окрему машину, направлену на утримання даної машини в синхронізмі. Ця властивість називається синхронізуючою здатністю синхронної машини. В загальному вигляді режим роботи синхронної машини, що відповідає будь-якій точці кривої $M_{em} (P_{em})$ 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 $\Delta M_{em} / \Delta \theta > 0$ або $\Delta P_{em} / \Delta \theta > 0$.

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

$$P_{\text{синх}} = \frac{dP_{em}}{d\theta} = \frac{m_1 \cdot E_0 \cdot U_1}{x_d} \cdot \cos \theta, \quad (3.33)$$

та питомого синхронізуючого момента

$$M_{\text{синх}} = \frac{dM_{em}}{d\theta} = \frac{m \cdot E_0 \cdot U_1}{\omega x_d} \cdot \cos \theta, \quad (3.34)$$

які зображені пунктирною лінією на (рис. 4.9) і уявляють собою 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 $P_{\text{синх}}$ та $M_{\text{синх}}$ для явнополюсної машини необхідно продиференціювати, відповідно, (3.31) та (3.32) по вильоту ротора:

$$P_{\text{синх}} = \frac{m_1 E_0 U_1}{x_d} \cos \theta + m_1 U_1^2 \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta, \quad (3.35)$$

$$M_{\text{синх}} = \frac{m_1 E_0 U_1}{\omega x_d} \cos \theta + \frac{m_1 U_1^2}{\omega} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \cos 2\theta. \quad (3.36)$$

3.7 Паралельна робота синхронних генераторів

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

- е.р.с. генератора E_0 і напруга мережі U_m повинні бути рівними і протилежно направленними ($E_0 = -U_m$);
- частота генератора f_r повинна бути рівна частоті мережі ($f_r = f_m = 50 \text{ Гц}$);
- чергування фаз е.р.с. 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*.

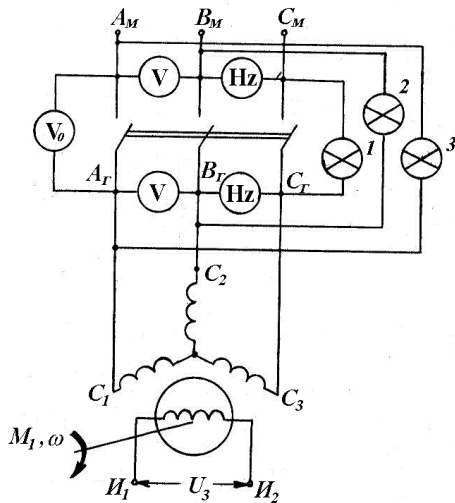


Рисунок 3.12 – Схема увімкнення синхронного генератора на паралельну роботу за методом точної синхронізації

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

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

При увімкненні ламп «на погасання», момент синхронізації відповідає одночасному погасанню усіх ламп. Якщо зірка е.р.с. генератора E_A ; E_B ; E_C обертається з кутовою частотою ω_r , що не перевищує кутову частоту обертання ω_m , зірки

напруг мережі U_A ; U_B ; U_C , то напруга на лампах визначається геометричною сумою E_A+U_A ; E_B+U_B ; E_C+U_C . В момент співпадання векторів зірки е.р.с. генератора і зірки напруг мережі ця сума досягає найбільшого значення і лампи світять з найбільшим накалом (напруга ламп дорівнює подвоєній напрузі мережі).

В наступні моменти часу зірка е.р.с. обганяє зірку напруг і накал на лампах зменшується. В момент синхронізації вектори е.р.с. і напруг займають положення, при якому $E_A+U_A=0$; $E_B+U_B=0$; $E_C+U_C=0$, тобто $U_0=0$ і всі три лампи гаснуть одночасно. При значній різниці кутових частот ω_r і ω_m лампи блимають часто. Змінюючи частоту обертання привідного двигуна ω , можна досягти рівності $\omega_r = \omega_m$, про що свідчить погасання ламп на значний час. В цей момент і слід замкнути рубильник, увімкнувши генератор на паралельну роботу.

Е.р.с., що створюється в обмотках генератора, і її частота контролюються відповідно вольтметром та частотоміром. Зміну, при необхідності, величини е.р.с. оператор, що проводить синхронізацію, здійснює регулюванням струму збудження генератора.

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

Так як лампи гаснуть при напрузі, що складає 30 ÷ 60 % від їх номінальної напруги, то для точного вибору моменту вмикання рубильника, в схемі передбачено, так званий, нульовий вольтметр. Стрілка такого вольтметра буде повільно коливатись у відповідності з погасанням ламп і покаже нуль, коли напруга між точками A_m і A_r рівна нулю.

Достоїнством 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. Так як у момент вмикання обмотки статора до мережі її е.р.с. рівна 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 при проектуванні генераторів. Способом самосинхронізації вмикають на паралельну роботу синхронні генератори потужністю до 500 мВА.

Після увімкнення синхронного генератора на паралельну роботу з мережею, при виконанні усіх умов синхронізації, його е.р.с. E_0 урівноважує напругу мережі (рис. 3.13, а), тому струм по обмотках статора протікати не буде – генератор працює в режимі холостого ходу.

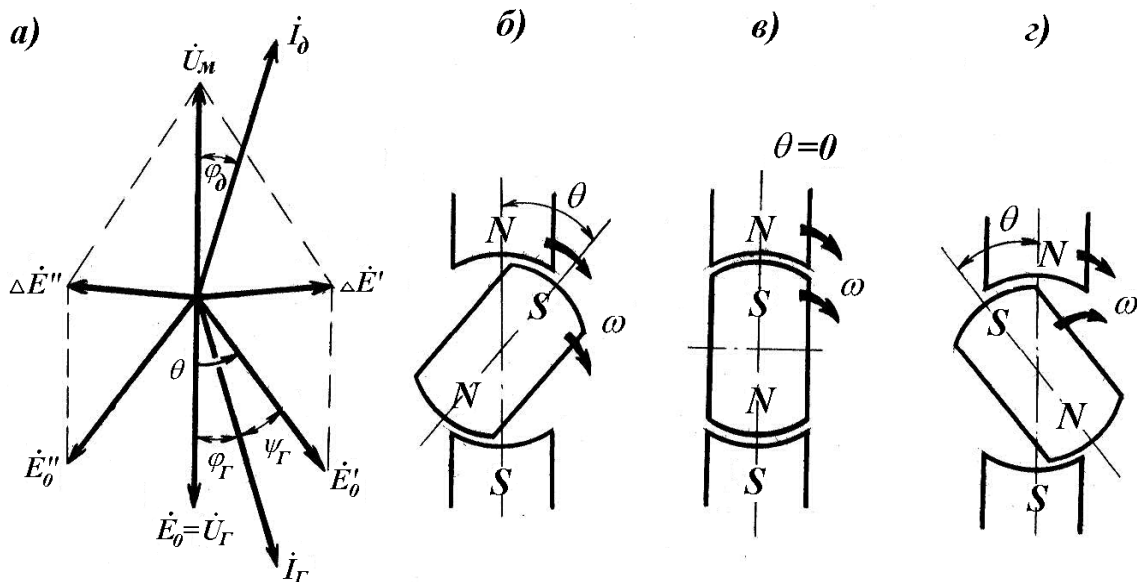


Рисунок 3.13 – Векторна діаграма (а) та положення магнітних полів статора і ротора в режимі генератора (б), при XX (в) і в режимі двигуна (г) синхронної машини при паралельній роботі з мережею

Механічна потужність привідного двигуна затрачується на покриття втрат холостого ходу ($P_0 = P_{\text{мех}} + P_{\text{магн}} + P_z + P_n$). Момент привідного двигуна урівноважується моментом холостого ходу ($M_1 = M_0$), і вісі 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). Е.р.с. генератора повернеться разом з 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 е.р.с. $\Delta E' = E_0 + U_m$, яка викличе струм I_r . Якщо знехтувати активним опором обмотки статора і вважати її опір чисто 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_m (кут між ними складає $180 - \varphi_2$), а отже, він протікає із машини в мережу, і, враховуючи незначну величину φ_2 , є, в основному, 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 е.р.с 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_m , 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_0 , практично, співпадає з вектором напруги мережі U_m , 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 впливає 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 $M_{\text{ем}}$, що діє на ротор синхронної машини. При роботі в режимі генератора електромагнітний момент є гальмівним, так як направлений проти обертання ротора і разом з моментом M_0 урівноважує момент привідного двигуна

$$M_1 = M_0 + M_{\text{ем}}$$

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

$$P_1 = P_0 + P_{em},$$

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

$$P_{em} = P_1 - P_0. \quad (3.37)$$

Отже, електромагнітна потужність синхронного генератора уявляє собою 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)

$$P_2 = P_{em} - P_{e1}. \quad (3.38)$$

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 е.р.с. E_0 урівноважує напругу мережі U_c ($E_0 = -U_c$). Якщо при цьому збільшити струм збудження, тобто, *перезбудити* машину, то зросте її е.р.с. E_0 і в колі обмотки статора генератора виникне надмірна е.р.с. $\Delta E' = E_0' + U_m$, вектор якої співпадає з напрямом е.р.с. E_0' .

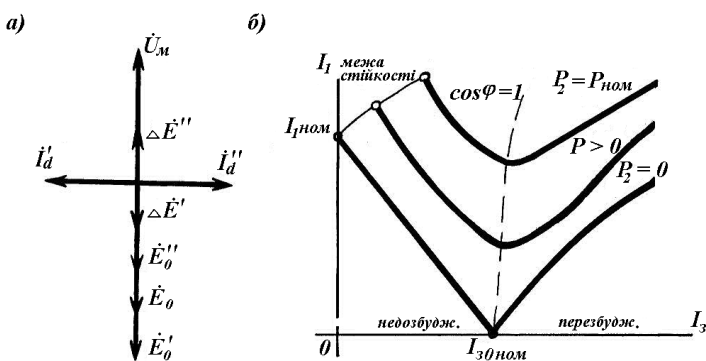


Рисунок 3.14 – Векторні діаграми е.р.с. (а) та U-подібні характеристики синхронного генератора при паралельній роботі з мережею

Струм I_d' , викликаний е.р.с. $\Delta E'$, буде відставати від неї по фазі на кут в 90° (враховуючи, що активним опором обмотки статора нехтуємо $R_1 \approx 0$). По відношенню до е.р.с. E_0' (а отже, до генератора) цей струм відстаючий (індуктивний), тому викликає поздовжно-розмагнічувальну реакцію якоря і машина розмагнічується. Що ж стосується мережі, то по відношенню до неї, цей струм випереджаючий (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 е.р.с. E_0 , відповідно, знизиться до значення E_0'' і в колі обмотки статора знову виникне надмірна е.р.с. $\Delta E'' = E_0'' + U_m$. Тепер її вектор буде співпадати з вектором напруги (тому що за абсолютним значенням $U_m > E_0''$), і

струм, який викличе цю е.р.с., будучи відстаючим від неї, випереджуватиме E_0'' на 90° , тобто буде ємнісним по відношенню до генератора та індуктивним – до мережі. Цього разу реакція якоря буде повздовжно-намагнічувальною за рахунок тієї реактивної потужності, яку споживає генератор з мережі.

Фізично ці процеси можна пояснити таким чином: при перезбудженні генератора надмірна м.р.с. збудження $F_0 = I_3 \cdot W_3$ створює в обмотці статора розмагнічувальний струм I_d' , а викликана ним реакція якоря компенсує надмірну м.р.с. генератора, урівноважуючи е.р.с. 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 е.р.с. та напругу.

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

$$P_2 = m_1 \cdot U_m \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \text{const.}$$

З цього виразу витікає, що при $U_m = \text{const}$ активна складова струму статора також постійна:

$$I_q = I_1 \cdot \cos \varphi_1 = \text{const.}$$

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

Залежність струму статора I_1 від струму збудження I_3 при незмінному навантаженні на паралельній роботі з мережею графічно виражається U-подібною кривою. На (рис. 3.14, б) ці криві представлені 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_3 , при якому струм статора I_1 стає мінімальним і рівним лише активній складовій частині: $I_{1min} = I_1 \cos \varphi_1 = I_d$. В 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 е.р.с. E_0 , а отже, і струм I_3 , тому що згідно з (3.13):

$$E_0 = U_1 + jI_1 X_c.$$

Необхідно також врахувати і те, що при поступовому зниженні струму збудження настає таке його мінімальне значення, при якому 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 $I_{ном}$ на (рис. 3.14, б) отримують лінію *межі стійкості* роботи синхронного генератора при недозбудженні.

З точки зору 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 (відстаючих по фазі від напруги мережі) доводиться, дещо, перезбуджувати генератор, створюючи умови, при яких струм статора I_1 , випереджує по фазі напругу мережі U_1 . Слід 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 приводного двигуна M_1 , наприклад, до значення M_n , яке відповідає повороту ротора за напрямом обертання на кут вильоту θ_n , (рис. 3.15 крива 1). Збільшення моменту M_1 веде до зростання кута між вісями полів ротора та статора, однак, враховуючи інерційність обертових мас ротора і приводного двигуна, вісь ротора повернеться на кут $\theta_n' > \theta_n$. Гальмівний електромагнітний момент, що розвиває генератор при такому куті, буде більшим, ніж M_1

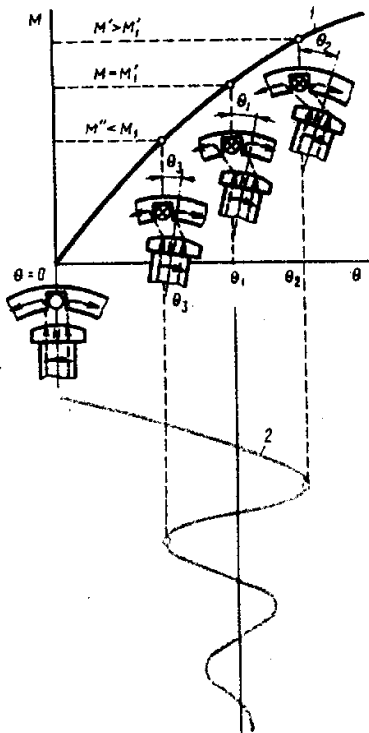


Рисунок 3.15 – Коливання синхронної машини

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

Таким чином, ротор синхронного генератора буде здійснювати коливальні рухи (коливання) біля значення кута вильоту θ_n (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 *незатухаючими*.

Однак, 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 при відсутності коливань частота обертання постійна і дорівнює частоті обертання результуючого магнітного поля. При виникненні 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 з результуючим магнітним полем «впливає на ротор заспокійливо», зменшуючи амплітуду його коливання. Отже, коливання мають *затухаючий* характер, і тому, через деякий час, ротор займає положення, що відповідає значенню θ_n , і при якому настає рівновага моментів. Причинами, що викликають коливання ротора, можуть бути або зміна обертового моменту привідного двигуна M_I , або зміна навантаження генератора, тобто електромагнітного моменту M_{em} . Коливання ротора, що викликані наведеними причинами, називаються *власними*.

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

$$\frac{1}{2\pi} f_0 \frac{p \cdot M_{синх}}{J} \quad , \quad (3.39)$$

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 співпадання 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 їх коливання. Однак найбільш ефективним засобом проти коливань є застосування в синхронній машині *заспокійливої* (демпфуючої) обмотки. В явнополюсних машинах ця обмотка виконується у вигляді стрижнів, закладених у пази полюсних наконечників і з'єднаних з боків короткозамикаючими кільцями (як «біляче колесо» ротора асинхронного двигуна).

3.10 Пускові та робочі характеристики синхронних двигунів

У відповідності 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, в режим двигуна відбувається при появі на валу машини гальмівного моменту, та відставанню вісі ротора від вісі 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 має місце 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 уявляють собою продовження кутових характеристик синхронного генератора в третьому квадранті осей координат. На (3.16, а) представлені криві електромагнітного моменту $M_{em} = f(\theta)$ та його складових частин: основна $M_{oc} = f(\theta)$ та додаткова $M_o = f(\theta)$ явнополюсного синхронного двигуна.

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

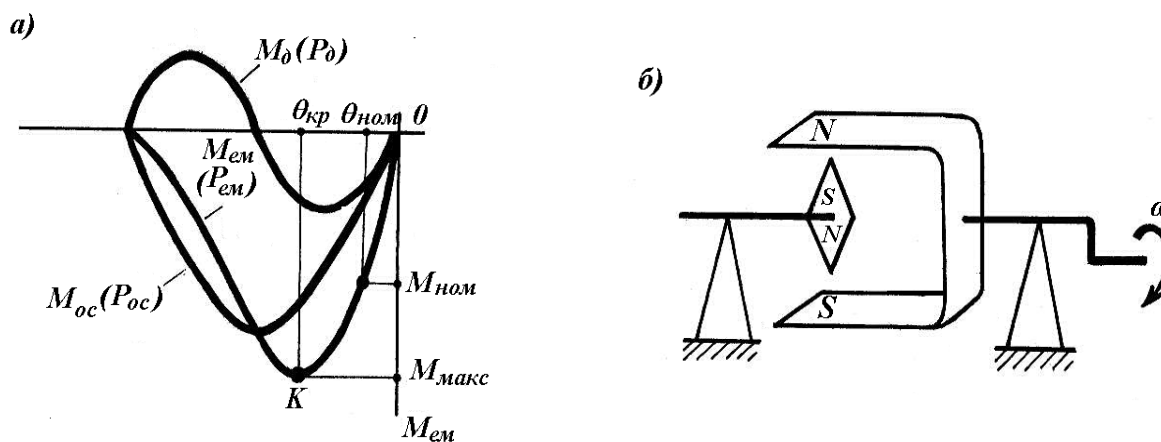


Рисунок 3.16 – Кутові характеристики (а) та макет (б) синхронного двигуна

Найпростіше принцип дії синхронного двигуна можна пояснити на макеті, що складається з зовнішнього підковоподібного магніту та магнітної стрілки, що мають можливість обертатись (рис. 3.16, б). При внесенні 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 вісі 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. У протилежному 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 OK кутової характеристики (3.16, а) при $\theta = \theta \div \theta_{кр}$. Відношення максимального електромагнітного моменту $M_{макс}$ до номінального $M_{ном}$ називається *перевантажувальною здатністю синхронного двигуна*

$$\lambda = M_{макс} / M_{ном}$$

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

Обертання ротора синхронних двигунів з незмінною синхронною частотою складає особливість цих двигунів і часто визначає галузь їх 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, в принципі, 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 покращанню ряду параметрів, зокрема, знижує пусковий струм; демпфуючу 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, не дивлячись 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 має місце при 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, 1000 об/хв) встановлюється миттєво. В 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, при якій між ротором і статором встановлюється 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 в синхронізм, і машина працює синхронно, а пускова обмотка надалі виконує роль демпфуючої, що обмежує коливання ротора. Враховуючи значні потужності синхронних двигунів, асинхронний пуск проводять, як правило, 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 ($\cos\varphi_1=1$), відстаючим або випереджаючим – що залежить від величини струму збудження.

Дійсно, в обох режимах роботи (і в режимі двигуна, і в режимі генератора) результуюче магнітне поле машини створюється м.р.с. обох обмоток — збудження та статора. При недозбудженні синхронної машини зростає м.р.с. 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. 3.16).

В 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 їх цінною властивістю, що використовується для підвищення коефіцієнта потужності електричних установок.

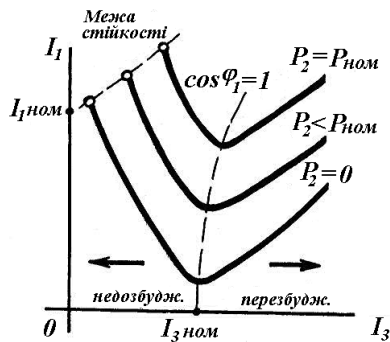


Рисунок 3.16 – U – подібні характеристики синхронного двигуна

Асинхронні двигуни, що є найпоширенішими споживачами електричної енергії, працюють з відстаючим 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 їх ємнісний струм буде частково, чи повністю, компенсувати індуктивний струм асинхронних двигунів. При цьому електрична система розвантажується від реактивних струмів, буде працювати з $\cos\varphi_1 \approx 1$, що сприяє зниженню втрат електроенергії в лініях. Слід при цьому зазначити, що при перезбудженні струм статора синхронного двигуна стає досить

значним. Тому синхронні двигуни, що призначені для роботи з перезбудженням, мають дещо більші габарити, а їх к.к.д. 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 при мінімальному струмі 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, в тому числі і синхронного, судять по його робочих характеристиках, які уявляють собою 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 (3.17).

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

Корисний момент на валу синхронного двигуна

$$M_2 = 9,55P_2/n_2, \quad (3.40)$$

де n_2 – частота обертання ротора, в даному випадку $n_2 = n_1 = n$. Так як 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 $P_1 = P_2 + \Sigma P$. При зростанні навантаження на

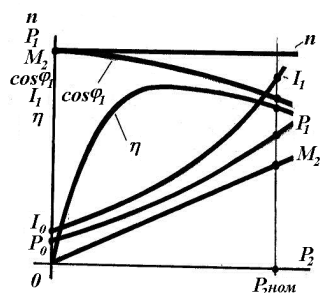


Рисунок 3.17 – Робочі характеристики синхронного двигуна

валу двигуна, зростають також і втрати ΣP , 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.

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 при зростанні навантаження коефіцієнт потужності знижується, як це на (3.17). Пояснюється це тим, що при зростанні навантаження і $I_z = \text{const}$, за рахунок 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 випереджаючий струм, а при перевантаженні – відстаючий. Найчастіше установлюють струм збудження таким, щоб $\cos \varphi_1 = 1$ був при середньому навантаженні. В 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 при навантаженні, 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. В цьому відношенні 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 слід поміняти місцями два лінійних провідники, що підводяться від мережі до клем обмотки статора.

В підсумку слід зазначити, що синхронні двигуни, в порівнянні 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. Більш того, при роботі з перезбудженням синхронні двигуни віддають в мережу реактивну потужність, чим сприяють підвищенню

коефіцієнта потужності енергосистеми в цілому. Другим достоїнством синхронних двигунів є те, що, як це впливає з (3.42), основна складова електромагнітного моменту пропорційна напрузі мережі U_L , а у асинхронних двигунів електромагнітний момент пропорційний квадрату напруги U_L^2 (3.17). З цієї причини, при зниженні напруги мережі, синхронні двигуни зберігають більшу переважувальну здатність, ніж асинхронні.

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

3.11 Синхронні компенсатори

Синхронний компенсатор уявляє собою 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, перш за все, є асинхронні двигуни.

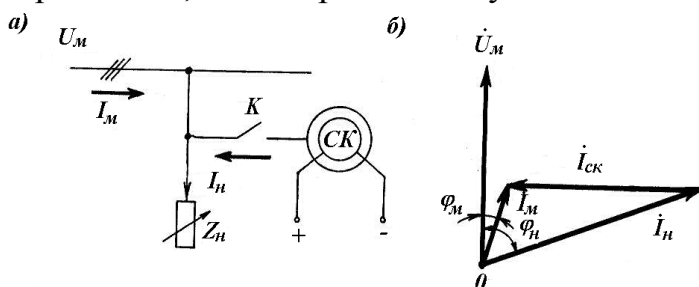


Рисунок 3.18 – Схема увімкнення синхронного компенсатора (а) та векторна діаграма струмів (б). На (рис. 3.18, а) зображена схема увімкнення синхронного компенсатора для покращання техніко-економічних показників роботи мережі. Дійсно, до увімкнення синхронного компенсатора, струм мережі дорівнює струму навантаження ($I_M = I_n$), що має активно-індуктивний характер ($\cos\varphi_n < 1$). При увімкненні синхронного компенсатора паралельно навантаженню Z_n 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. 3.18, б), це призводить до зниження результуючого струму, який протікає в мережі, і підвищення коефіцієнта потужності $\cos\varphi_m$ (кут $\varphi_m < \varphi_n$).

Слід зазначити, що використанням синхронного компенсатора можна довести, щоб $\cos\varphi_m = 1$, 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 $0,92 \div 0,95$.

В деяких випадках синхронні компенсатори можуть працювати в режимі недозбудження. Необхідність в цьому виникає, коли струм в системі має значну ємнісну складову частину, яка не компенсується індуктивними струмами споживачів. Звичайно, 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; в сучасних компенсаторів вона сягає від 10 до 160 тис. кВАр при номінальній напрузі $6,6 \div 16$ кВ. Виконують їх, як правило, з горизонтальним положенням ротора та числом полюсів $2p=6$ і 8, що відповідає 1000 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. Так як вал синхронного компенсатора не має вільного виступаючого кінця, та машина досить легко герметизується для використання водневого охолодження.

Найбільш важливими характеристиками синхронного компенсатора є U-подібні характеристики, що будуються для різних значень напруги мережі. Так як синхронний компенсатор можна розглядати як синхронний двигун, що працює в режимі НХ, то характеристики $P_2 = 0$ (рис. 3.16) є характеристикою синхронного компенсатора при номінальній напрузі мережі.

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

Список джерел

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.
2. Копылов И. П. Электрические машины. Учебник для вузов / И. П. Копылов. – Москва : Высшая школа, 2004. – 607 с.
3. Иванов-Смоленский А. В. Электрические машины. Учебник для вузов / А. В. Иванов-Смоленский. – Москва : Энергия, 1988. – 928 с. : ил.
4. Вольдек А. И. Электрические машины / А. И. Вольдек. – Ленинград : Энергия, 1984. – 840 с.
5. Брускин Д. Э. Электрические машины и микромашины / Д. Э. Брускин, А. Е. Зорохович, В. С. Хвостов. – Москва : Высшая школа, 1990. – 528 с.
6. Электрические машины. Трансформаторы : учебное пособие для студентов факультета последипломного образования и студентов дневной и заочной формы обучения специальности 6.090603 «Электрические системы электроснабжения», 6.090605 «Светотехника и источники света», 6.092202 «Электрический транспорт» / М. Л. Глебова, М. В. Чернявская, А. И. Кузнецов, И. Т. Карпалюк. – Харків : ХНАГХ, 2007. – 180 с.
7. Электрические машины переменного тока : учебное пособие для студентов факультета последипломного образования и студентов дневной и заочной формы обучения специальности 6.090603 «Электрические системы электроснабжения», 6.090605 «Светотехника и источники света», 6.092202 «Электрический транспорт» / М. Л. Глебова, М. В. Чернявская, А. И. Кузнецов, И. Т. Карпалюк. – Харків : ХНАГХ, 2008. – 102 с.
8. Синхронные машины. Машины постоянного тока : конспект лекций для студентов 3 курса направления подготовки 0922, 6.050702 – Электромеханика специальности «Электрический транспорт» / М. Л. Глебова, М. В. Чернявская, А. И. Кузнецов, И. Т. Карпалюк. – Харків : ХНАГХ, 2009. – 237 с.
9. Рисованый С. В. Проектирование вентильных реактивных двигателей / С. В. Рисованый, В. Б. Финкельштейн. – Харків : ХНАГХ, 2013 – 242 с.

Навчальне видання

ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,
ДОРОХОВ Олександр Володимирович,
ФІНКЕЛЬШТЕЙН Володимир Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

ТЕКСТ ЛЕКЦІЙ
з дисципліни

«ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ»

ЧАСТИНА 2.

Машина змінного струму

*(для студентів усіх форм навчання напряму підготовки
6.050701 – Електротехніка та електротехнології,
6.050702 – Електромеханіка)*

Відповідальний за випуск *Я. Б. Форкун*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосо жарова*

План 2016, поз. 112Л

Підп. до друку 27.04.2016

Формат 60×84/16

Друк на ризографі.

Ум. друк. арк. 5,1

Тираж 50 пр.

Зам. №

Видавець і виготовлювач:
Харківський національний університет
міського господарства імені О. М. Бекетова,
вул. Революції, 12, Харків, 61002
Електронна адреса: rectorat@kname.edu.ua
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:
ДК № 4705 від 28.03.2014р.