

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



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

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
(Трансформатори. Асинхронні машини)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

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

Харків
ХНУМГ ім. О. М. Бекетова
2023

Глебова М. Л. Електричні машини. (Трансформатори. Асинхронні машини) : конспект лекцій для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти всіх форм навчання зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / М. Л. Глебова, О. Б. Єгоров, Я. Б. Форкун ; Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023. – 97 с.

Автори:

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

Рецензенти:

Д. В. Тугай, доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова);

О. В. Сенецький, доктор технічних наук, доцент кафедри альтернативної електроенергетики та електротехніки (Харківський національний університет міського господарства імені О. М. Бекетова)

Рекомендовано кафедрою альтернативної електроенергетики та електротехніки, протокол № 14 від 28.06.2023

© О. Б. Єгоров, М. Л. Глебова, Я. Б. Форкун, 2023

© ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2023

ЗМІСТ

Вступ.....	4
1 Загальні відомості про електричні машини. Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	5
1.1 Класифікація електричних машин.....	5
1.2 Номінальні дані електричних машин.....	8
1.3 Вимоги щодо електричних машин.....	10
1.4 Особливості конструкції електричних машин, зумовлені умовами їхньої експлуатації.....	12
1.5 Електротехнічні матеріали, застосовувані в електричних машинах....	22
1.6 Електромеханічне перетворення енергії, оборотність електричних машин.....	28
2 Трансформатори.....	31
2.1 Принцип дії та конструкція трансформатора.....	31
2.2 Рівняння трансформатора, схема заміщення та векторна діаграма.....	35
2.3 Характеристики трансформатора.....	41
2.4 Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів, паралельна робота трансформаторів.....	53
2.5 Вищі гармоніки струму, потоку та ЕРС.....	63
2.6 Перехідні процеси в трансформаторах.....	68
3 Асинхронні машини.....	73
3.1 Принцип дії та конструкція асинхронних машин.....	73
3.2 Зведений асинхронний двигун, рівняння та схеми заміщення, векторна діаграма.....	78
3.3 Механічна характеристика, її залежність від напруги і активного опору в полі ротора.....	82
3.4 Енергетична діаграма, ККД і робочі характеристики асинхронного двигуна, колова діаграма.....	87
3.5 Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів із фазними та короткозамкненими роторами.....	91
3.6 Покращення пускових характеристик асинхронних короткозамкнених двигунів.....	93
Список рекомендованих джерел.....	95

ВСТУП

Сучасна енергетика є складною багаторівневою ієрархічною структурою, призначеною забезпечити комфортні умови проживання населення, а також стале 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 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.);

- акумулювальні – призначені для часткового регулювання режиму виробництва енергії (електричні і теплові акумулятори, насосно-акумулюванні гідроелектричні станції 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». Цей 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.

1 ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ. ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНЕ ПЕРЕТВОРЕННЯ ЕНЕРГІЇ, ОБОРОТНІСТЬ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1 Класифікація електричних машин

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

– електромашинні генератори, які перетворюють механічну енергію в електричну. Їх встановлюють на електричних станціях та різних транспортних установках: автомобілях, літаках, тепловозах, кораблях, пересувних електростанціях тощо. На електростанціях вони приводяться в обертання за допомогою потужних парових і гідравлічних турбін, а на транспортних установках – від двигунів внутрішнього згорання 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 (обертіві 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, електротрансмісії великовантажних автомобілів, вантажопідйомні та землерийні машини, складні металообробні верстати тощо, 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 зазвичай застосовують для живлення пристроїв зв'язку, зарядження акумуляторних батарей, як основні джерела живлення на транспортних установках (автомобілях, літаках, тепловозах, пасажирських вагонах). Проте останнім часом генератори постійного струму замінюються генераторами змінного струму, що працюють з напівпровідниковими випрямлячами.

У системах автоматичного регулювання машини постійного струму широко використовують в якості електромашинних підсилювачів, виконавчих двигунів і тахогенераторів.

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

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

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

- 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...2 000 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...1 500 об/хв; швидкохідні – 1 500...6 000 об/хв; надшвидкохідні – понад 6 000 об/хв. Мікромашини виконують для частот обертання від декількох оборотів в хвилину до 6 000 об/хв; машини великої і середньої потужності – зазвичай до 3 000 об/хв.

1.2 Номінальні дані електричних машин

Кожна електрична машина має паспортну табличку, вибиту на металевій пластині і 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 обмотки тощо). 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; 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 °С. Гранично допустимі температури різних частин обмоток регламентуються за стандартами, що мають силу законів.

До стандартів на електричні машини і трансформатори включаються також інші нормативні матеріали, 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 силові обладнання, не повинні перевищувати – 5...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 щодо 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, нескладними у виготовленні і зручними в обслуговуванні і експлуатації. Загальні технічні вимоги для машин загальнопромислового застосування сформульовані в спеціальному Гостеві, 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 перевантаження, напрузі, частоті змінного струму, частотою обертання, температурі охолоджуючої середовища, висоті 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 (валу, 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.

Здебільшого 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 перелічених 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 визначаються умовами їхньої 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.

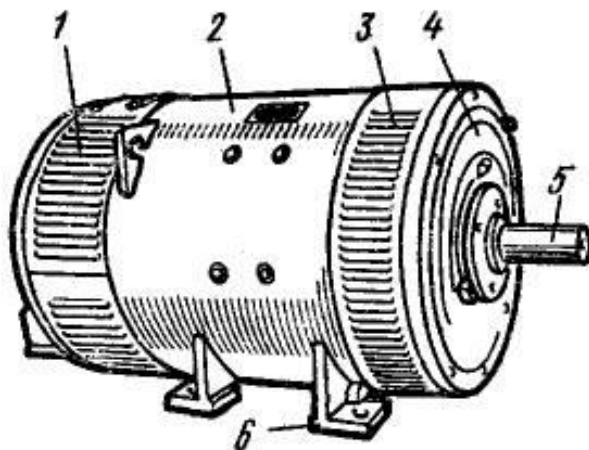


Рисунок 1.1 – Двигун постійного струму захищеного виконання (ступінь захисту IP22):

*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.

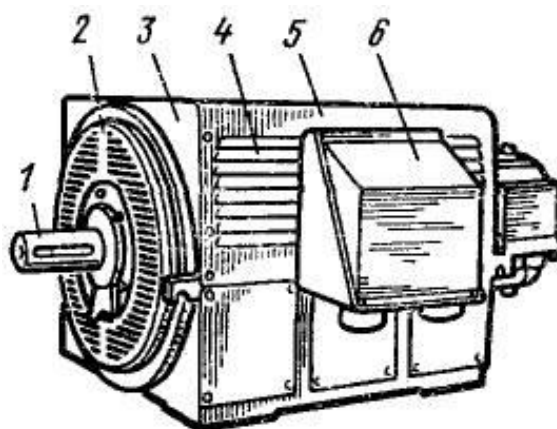


Рисунок 1.2 – Асинхронний двигун у краплезахищеному виконанні
(ступінь захисту IP23):

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

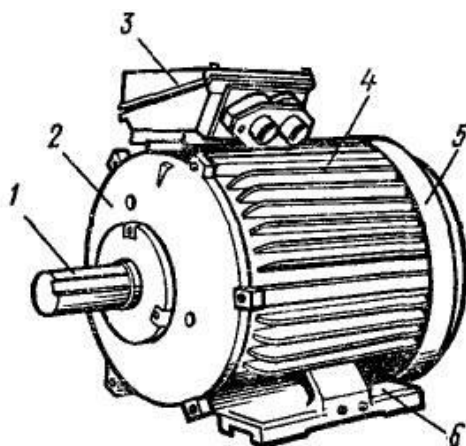


Рисунок 1.3 – Асинхронний двигун закритого виконання
(ступінь захисту IP44):

*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 використовуються зрідка й 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 запиленних 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.

Використовуються також машини, призначені для роботи в особливих умовах.

Вибухозахищене (вибухобезпечне) – машини можуть працювати у вибухо- й пожежонебезпечному 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 інію.

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

Тропікостійке – 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 ± 10) °С, 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; із 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 із помірно холодним морським кліматом, мають позначення М, з тропічним морським – ТМ; для необмеженого району плавання – ОМ; двигуни, призначені для всіх макрокліматичних районів на суші й на морі – В.

Залежно від умов розміщення передбачаються 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 вентильованими. Вентильовані 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.

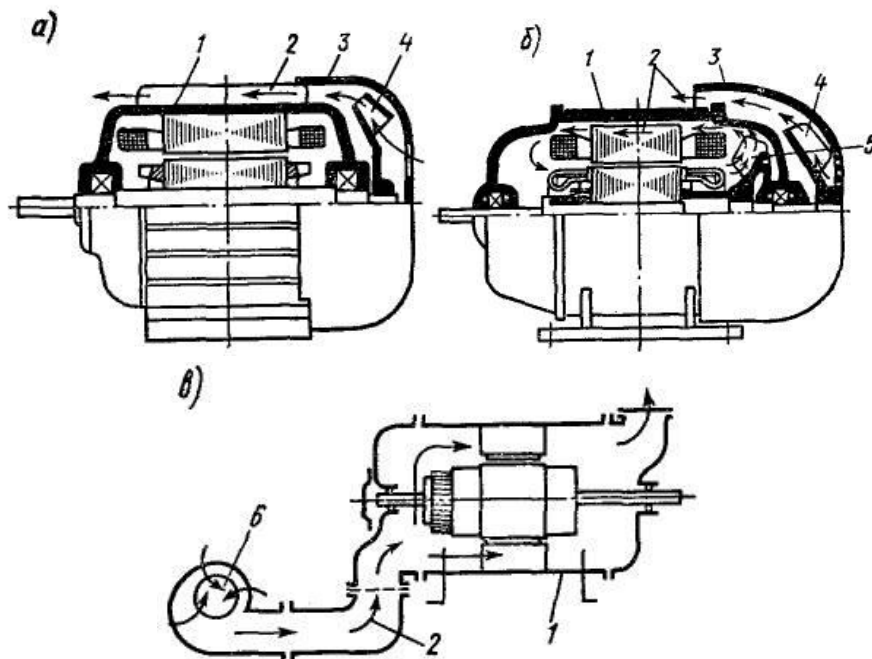


Рисунок 1.4 – Способи вентиляції закритих електричних машин:
 1 – корпус машини; 2 – потоки охолоджуючого повітря;
 3 – кожух; 4 – зовнішній вентилятор; 5 – внутрішній вентилятор;
 6 – допоміжний вентилятор

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).

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 (IC17). 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- й водозахищеного виконань охолоджуючий повітря зазвичай проганяється вентилятором навколо обмоток і по вентиляційних каналах, наявними в статорі, роторі і колекторі.

Система вентиляції може бути осьової і радіальної. 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.

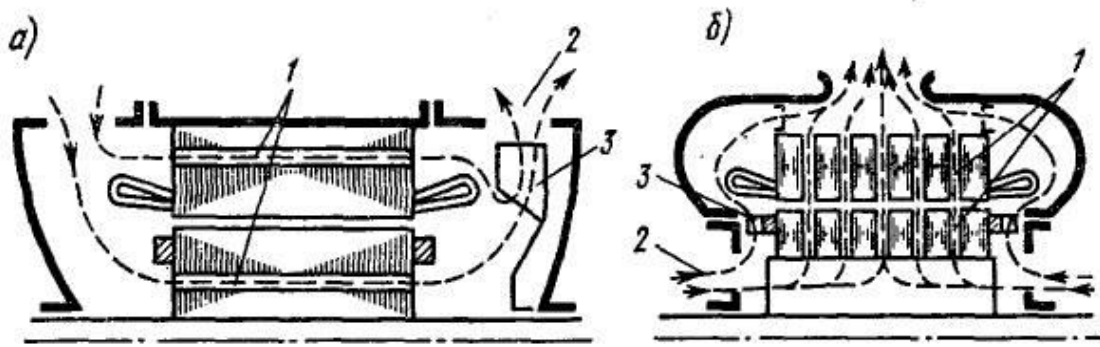


Рисунок 1.5 – Осьова і радіальна системи вентиляції відкритих і захищених електричних машин:

*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 кілька охолоджуючих агентів, одночасно водневе охолодження ротора і 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.

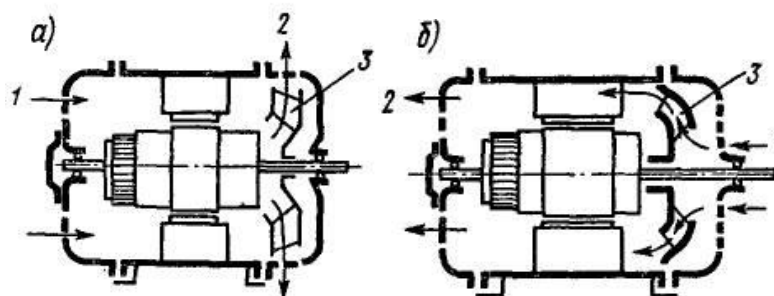


Рисунок 1.6 – Витяжна й нагнітальна системи вентиляції:
1 – вхідне повітря; 2 – виходить повітря; 3 – вентилятор

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).

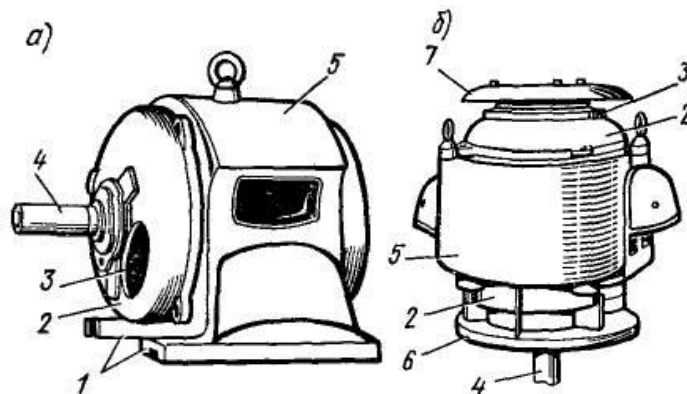


Рисунок 1.7 – Загальний вигляд електричних машин:

а – з кріпленням за допомогою лап; б – з фланцевим кріпленням і вертикальним розташуванням валу; 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.

Відомі такі конструктивні групи: ІМ1 – машина на лапах з підшипниковими щитами; ІМ2 – на лапах з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті; ІМ3 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на одному щиті; ІМ4 – без лап з підшипниковими щитами і фланцем на станині; ІМ5 – без підшипників; ІМ6 – з підшипниковими щитами і 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.

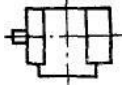
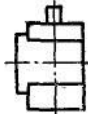
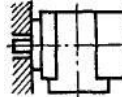

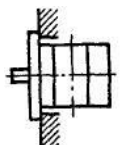
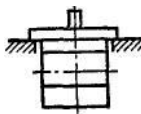
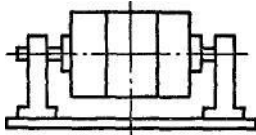
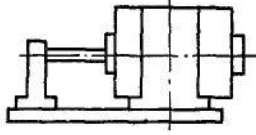
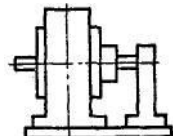
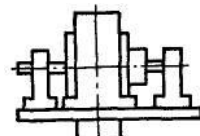
Віброакустичні умови. При проектуванні і виготовленні електричних машин у багатьох випадках застосовують спеціальні конструктивні заходи для зменшення шуму.

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 – Конструктивні форми виконання електричних машин

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="735 1592 1078 1832"> <i>ІМ6010</i>  </div> <div data-bbox="1091 1592 1398 1832"> <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.

Залежно від вимог, щодо 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.

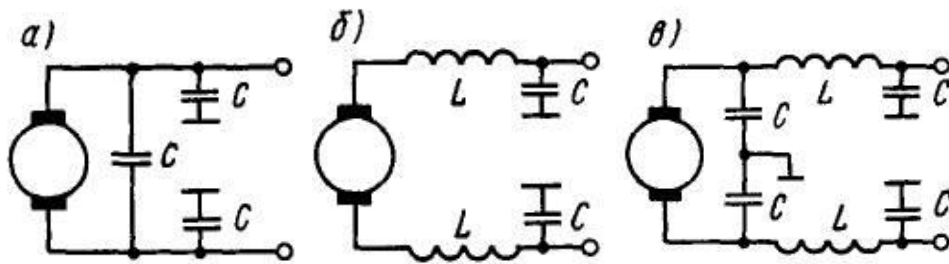


Рисунок 1.8 – Схеми перешкодопригнічувальних фільтрів

Рівень перешкод, поширюваних по дротах і кабелях, приєднаним до електричної машини, 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 перешкодопригнічувальних фільтрів, що перешкоджають поширенню височастотних коливань по проводах мережі, до якої приєднана машина. Найбільш простими перешкодопригнічувальними фільтрами є ємнісні, що становлять конденсатори C , включаються між струмопровідними затискачами, а також між цими затискачами й 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 струмоведучих провідником, приєднуваних до вихідних затискачів машини. У ряді випадків застосовують більш складні фільтри – Γ -подібний (рис. 1.8, б) і Π -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 перешкодопригнічувального конденсатора зазвичай підбирають дослідним шляхом; вона становить $0,1 \dots 1$ мкФ, а індуктивність дроселя фільтра – $50 \dots 500$ 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 напрямком магнітного потоку на всьому його шляху збігалось 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, 2312 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 опалювання (для усунення погіршення магнітних властивостей сталі в результаті утворення наклепу при технологічних операціях) і оксидації для створення ізоляційного шару. Сталі марок 2212, 2321 і 2411 мають електроізоляційне покриття і не вимагають відпалу. Застосування цих сталей, що мають низькі втрати, підвищує ККД і, крім того, спрощує технологію виготовлення, оскільки не потрібно опалювати листи 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 опалюють, а потім ізолюють. При великих висотах обертання використовують сталі марок 2112, 2212, 2312, 2411.

При виготовленні магнітопроводів трансформаторів використовують холоднокатані анізотропні сталі марок 3412, 3413 з ізоляційним покриттям; після штампування сталь обпалюють. 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 магнітом'якої сталі або сталевого литва, оскільки вони є тільки частиною. Сталеве лиття застосовують також для виготовлення станин і роторів синхронних машин. Вали машин виконують з

високоміцних конструкційних сталей з додаванням хрому, нікелю тощо. 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 дорожча за алюміній, проте її використовують для виготовлення обмоток частіше, ніж алюміній, так як вона має більш високу електропровідність (приблизно в 1,6 раза), 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.

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, ефіроцелюлозні 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.

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; плівкосклопласт «Ізофлекс»; 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; плівкосклопласт «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 скловолокнисті і слюдяні матеріали, що містять кремнійорганічні зв'язуючі і просочуючі склади, що емалева ізоляція проводів на основі кремнійорганічних лаків і синтетичні плівки типу «Ізофлекс», «Імідсфлекс» та ін. Вони відрізняються також високою електричної і механічної 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 подальшим 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 °С), 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 катушку 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.

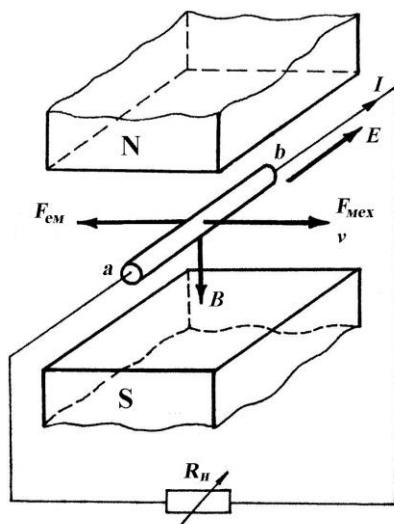


Рисунок 1.9 – Елементарний генератор

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 *F_{мех.}*, то він буде переміщатися з лінійною швидкістю *v* у напрямі дії сили. Згідно із законом електромагнітної індукції, у провіднику *ав* буде виникати електрорушійна сила (ЕРС):

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

де *B* – магнітна індукція, Тл .

Необхідно пам'ятати, що напрям ЕРС 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 ЕРС (на рис. 1.9 від *a* до *b*).

Якщо замкнути провідник на навантаження *R_n*, то в колі, під дією ЕРС, 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 у магнітному полі, згідно з явищем електромагнітної індукції, діє електромагнітна сила (сила Ампера):

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

Напрямок цієї сили визначається *правилом лівої руки*. Долонню лівої руки розміщують назустріч лініям поля, чотири витягнуті 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 ($v = \text{const}$), тоді сили механічна і електромагнітна урівноважують одна одну $F_{\text{мех}} = F_{\text{ем}}$. Оскільки $v \neq 0$, то, помноживши обидві частини рівняння на швидкість, отримаємо:

$$F_{\text{мех}} \cdot v = F_{\text{ем}} \cdot v. \quad (1.3)$$

Скориставшись (1.2), підставимо в праву частину значення $F_{\text{ем}}$:

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

У 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 ЕРС E . Отже, можна стверджувати, що даний макет демонструє, як механічна потужність в генераторі перетворюється в електричну.

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

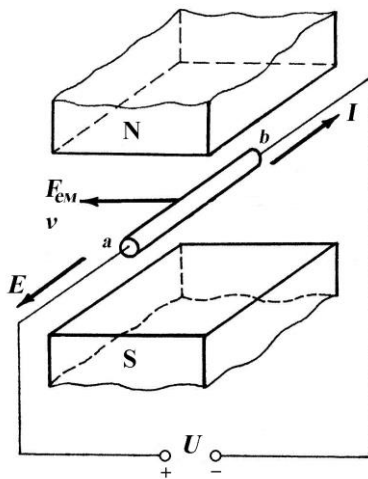


Рисунок 1.10 – Елементарний двигун

Як і в попередньому випадку на провідник буде діяти сила $F_{\text{ем}}$, напрям якої визначиться *правилом лівої руки* і буде справа наліво. Під дією цієї сили провідник буде переміщуватися в тому самому напрямі, у якому діє $F_{\text{ем}}$, що спричинить появу ЕРС E . Скориставшись *правилом правої руки*, побачимо, що напрям ЕРС протилежний напрямам струму та напруги.

Отже, згідно з *другим законом Кірхгофа*, частина прикладеної напруги урівноважується тут ЕРС 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 зазвичай 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):

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

У 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 ЕРС 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 ЕРС. Розміщення індуктора і якоря на статорі чи роторі залежить від виду та призначення машини, що не впливає на принцип роботи.

2 ТРАНСФОРМАТОРИ

2.1 Принцип дії та конструкція трансформатора

Найпростіший силовий трансформатор складається з магнітопроводу (осердя), виконаного із феромагнітного матеріалу (звичайно, це електротехнічна сталь) і двох обмоток розташованих на *стрижнях 1* магнітопроводу (рис. 2.1, а).

Стрижні магнітопроводу з'єднуються між собою *ярмами 2*. На (рис. 2.1, б) показаний однофазний трансформатор в електричних схемах.

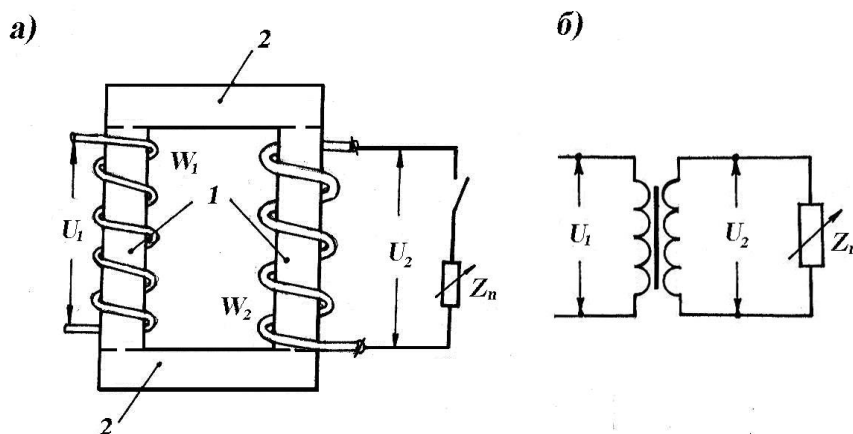


Рисунок 2.1 – Електромагнітна (а) і принципова (б) схеми трансформатора

Обмотка, яка умикається до мережі, напругою U_1 , число витків її позначається W_1 , називається *первинною*, а обмотка, W_2 , до якої умикається навантаження Z_H – *вторинною*. Кожна з цих обмоток має повний комплексний опір Z_1 і Z_2 , відповідно:

$$Z_1 = R_1 + jX_1 \quad (2.1)$$

$$Z_2 = R_2 + jX_2 \quad (2.2)$$

де R_1 , R_2 – активний опір, X_1 ; X_2 – індуктивний опір первинної та вторинної обмоток відповідно; j – поворотний одиничний множник.

В подальшому викладі матеріалу, при необхідності, векторні комплексні величини будуть подаватись з крапкою над величиною, а комплексні скалярні – без такої (як, наприклад, в 2.1 і 2.2). Спеціальний знак вектора над величинами використовуватись не буде.

Електричний зв'язок між обмотками W_1 , та W_2 відсутній і потужність від однієї обмотки до другої передається лише за рахунок електромагнітного зв'язку.

Дія трансформатора основана на явищі електромагнітної індукції: якщо обмотка перетинається змінним магнітним полем, то в її витках створюється ЕРС.

При умиканні до мережі з напругою U_1 первинної обмотки W_1 по її витках протікає струм I_1 і створює намагнічуючу силу $F_1 = I_1 W_1$. В магнітній системі трансформатора з магнітним опором R_M виникає потік $\Phi_1 = F_1 / R_M$. Цей потік в часі змінюється за синусоїдальним законом, як і напруга мережі, а в просторі осердя трансформатора пульсує, і перетинає витки первинної та вторинної обмоток W_1 та W_2 , створюючи в них ЕРС:

– у первинній обмотці ЕРС самоіндукції

$$e_1 = -W_1 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.3)$$

– у вторинній обмотці ЕРС взаємоіндукції

$$e_2 = -W_2 \frac{d\Phi}{dt}, \quad (2.4)$$

де $d\Phi/dt$ – швидкість зміни магнітного потоку трансформатора в часі.

Під дією ЕРС E_2 , якщо увімкнути навантаження Z_n , в колі вторинної обмотки потече струм I_2 , який створить свою намагнічуючу силу $F_2 = I_2 W_2$, відповідно, потік Φ_2 . Потоки Φ_1 та Φ_2 , замикаючись в одній магнітній системі, створюють результуючий потік Φ_0 :

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2. \quad (2.5)$$

Враховуючи, що первинна обмотка увімкнена до мережі, потужність якої можна розглядати як нескінченно велику, в порівнянні з потужністю трансформатора, величина діючого значення потоку Φ_0 , при будь-якій зміні навантаження, змінюватись не може, тобто завжди залишається такою, щоб магнітна система була насиченою, як і при неробочому ході. Дійсно, уявимо, що магнітний потік Φ_2 направлений назустріч потоку Φ_1 , однак зниження Φ_0 неможливе, тому що зростання потоку Φ_2 автоматично компенсується з мережі збільшенням струму I_1 , а отже, і Φ_1 , залишаючи магнітну систему насиченою. Таким чином, зростання струму навантаження трансформатора I_2 автоматично приводить до зростання струму I_1 , завдяки незмінності основного магнітного потоку Φ_0 .

Як впливає зі співвідношення (2.3 та 2.4), ЕРС e_1 та e_2 , що індукуються в обмотках трансформатора, відрізняються одна від іншої лише за рахунок різної кількості витків, тому, використовуючи необхідне співвідношення витків, можна створити трансформатор на будь-яке співвідношення напруги.

Обмотка, що має більшу кількість витків називається *обмоткою вищої напруги* (ВН), а обмотка з меншою кількістю витків – *низької напруги* (НН). Якщо первинною обмоткою є обмотка ВН, то трансформатор називають *знижувальним*, якщо НН, то – *підвищувальним*.

Як і електрична машина, трансформатор має властивість оборотності, тобто один і той же трансформатор може використовуватись і як знижувальний, і як підвищувальний. Але, звичайно, кожен трансформатор має визначене призначення: або він підвищувальний, або – знижувальний. З принципу дії витікає, що трансформатор може працювати лише в мережі змінного струму, тому що при увімкненні первинної обмотки на постійний магнітний потік ($d\Phi/dt = 0$), і ЕРС в обмотках створюватись не буде.

Сучасний силовий трансформатор – це досить складний пристрій, що має значну кількість різних конструктивних елементів: магнітопровід, обмотки, уводи, бак та ін. Магнітопровід з насадженими на стрижні обмотками складає *активну частину* трансформатора. Решту елементів називають *допоміжними* (неактивними).

Розглянемо більш детально конструкцію основних частин трансформатора.

Магнітопровід. Магнітопровід у трансформаторі виконує подвійну функцію: по-перше, він складає магнітне коло, по якому замикається магнітний потік, а по-друге, на ньому кріпляться обмотки, відводи, перемикачі та інші деталі і вузли.

Як уже зазначалось, магнітопровід складається зі стрижнів і ярем. Він має *шихтовану конструкцію*, тобто набирається із окремих пластин електротехнічної сталі товщиною 0,35...0,5 мм, ізольованих одна від одної ізоляційною плівкою. Така конструкція дозволяє знизити втрати від вихрових струмів, а якість сталі – від гістерезису, що, в кінцевому результаті, підвищує ККД трансформатора.

У сучасних трансформаторах використовується *шихтована конструкція* магнітних систем з *косими* та з *комбінованими* (частково *прямі*, частково *косі*) стиками, що дозволяє знизити втрати в стиках від. Стрижні системи опресовуються і стягуються *склобандажами*, а ярма – спеціальними *балками* та металевими *напівбандажами*.

Обмотки. Обмотки трансформаторів виконують із обмоткових дротів круглого чи прямокутного перерізу, ізольованих *бавовняною пряжею* або *кабельним папером*. Як правило, обмотки намотуються на *паперово-бакелітові* циліндри і насаджуються *концентрично* одна другій на стрижень осердя, при цьому, для зниження ізоляційних проміжків, обмотка НН розташовується безпосередньо на стрижні, а обмотка ВН – на ній, зовні.

Залежно від номінального струму та класу напруги, обмотки трансформаторів бувають *циліндричні одно-, дво- та багатходові*, а також, *безперервні обмотки*. Ці дві обмотки можуть використовуватись і як ВН, і як НН, а *гвинтові* – лише, як обмотки НН зі значними струмами.

Як відомо, за способом охолодження трансформатори поділяють на сухі (охолоджуються *навколишнім повітрям*) та масляні (охолоджуються *трансформаторним маслом*). У останніх активна частина поміщається в *бак*, заповнений трансформаторним маслом. Трансформаторне масло, маючи кращу теплопровідність ніж повітря, служить для відводу тепла від активної частини трансформатора. Крім цього, трансформаторне масло, як гарний діелектрик, забезпечує високу електричну міцність, а отже, більш надійну роботу трансформатора. У трансформаторів незначної потужності до 20...30 кВА застосовують баки з гладкими стінками. У більш потужних – трубчаті баки, або баки з *навісними радіаторами*. Це збільшує поверхню охолодження і дозволяє знизити габарити трансформатора. На *кришці* бака розташовують:

- *виводи ВН та НН* для з'єднання обмоток трансформатора з мережею та навантаженням;

- *перемикач*, призначений для ступінчатої зміни числа витків в обмотці, як правило, ВН;

- *розширник*, яким компенсується об'єм масла при зміні температури і зменшується площа дотику масла до повітря;

- *масловказівник* – скляна трубка, що з'єднана обома кінцями з розширником і указує на рівень масла при фіксованій температурі;

- *газове реле* призначене для подачі сигналу і відмикання трансформатора від мережі при аварійних режимах, які супроводжуються виділенням газу з масла; з цією метою газове реле має дві пари контактів, розміщених в спеціальних поплавках;

- *викидна труба* забезпечує захист трансформаторів, потужність яких 1 000 кВА і більше, від розривання бака при зростанні тиску в середині бака у аварійних випадках; з цією метою викидна труба закінчується *фланцем* зі скляним *диском*, який лопається при зростанні тиску;

- *візок* прикріплюється до дна бака і забезпечує переміщення трансформатора в межах підстанції.

Властивості трансформатора визначаються його *номінальними параметрами*:

- *номінальна первинна лінійна напруга* $U_{1ном}$, В або кВ;

- *номінальна вторинна напруга* (номінальною вторинною напругою є напруга при відімкненому навантаженні, тобто, при ХХ) $U_{2ном}$, В або кВ;

- *номінальні лінійні струми* у первинній $I_{1ном}$ і вторинній $I_{2ном}$ обмотках, А;

- *номінальна повна потужність* $S_{ном}$ кВА (для однофазного трансформатора $S_{ном} = U_{1ном} \cdot I_{1ном} = U_{2ном} \cdot I_{2ном}$, для трифазного – $S_{ном} = \sqrt{3}U_{1ном} \cdot I_{1ном} = \sqrt{3}U_{2ном} \cdot I_{2ном} = 3 \cdot U_{1ф} \cdot I_{1ф} = 3 \cdot U_{2ф} \cdot I_{2ф}$).

Номинальні лінійні струми в паспорті трансформатора не указані, тому їх для трифазного трансформатора визначають як

$$I_{1ном} = \frac{S_{ном}}{\sqrt{3}I_{1ном}}$$

Кожен трансформатор може вмикатися лиш до мережі змінного струму визначеної частоти. В Україні трансформатори загального призначення розраховані на частоту $f = 50$ Гц (в деяких країнах $f = 60$ Гц), в пристроях автоматики і зв'язку можуть застосовувати трансформатори на частоти 50, 400 або 1 000 Гц.

2.2 Рівняння трансформатора, його схема заміщення та векторна діаграма

Фізичні процеси, що відбуваються при роботі навантаженого трансформатора, найпростіше пояснити скориставшись рівняннями, які б описували таку роботу. Ці рівняння складають для обмоток трансформатора, які розглядають як незалежні контури, де діють ЕРС і створюються падіння напруги.

В контурі первинної обмотки слід враховувати дію двох е.р.с.: по-перше, напругу мережі U_1 слід віднести до суми ЕРС, тому що саме вона є причиною виникнення струму I_1 ; по-друге – ЕРС самоіндукції E_1 , що створюється основним магнітним потоком Φ_0 . Так як ніяких опорів, крім повного опору первинної обмотки, в коло цієї обмотки не ввімкнено, то, згідно з другим законом Кірхгофа, маємо

$$U_1 + E_1 = I_1 Z_1 \quad (2.6)$$

В колі вторинної обмотки діє лише ЕРС E_2 , наведена, як і E_1 , основним магнітним потоком Φ_0 , а падінь напруги два: безпосередньо на опорі обмотки Z_2 і на опорі навантаження Z_n . Отже, рівняння ЕРС цієї обмотки буде мати вигляд:

$$E_2 = I_2 Z_n + I_2 Z_2 \quad (2.7)$$

Падіння напруги на навантаженні називають звичайно *напругою вторинної обмотки* $U_2 = I_2 \cdot Z_n$, тому

$$E_2 = U_2 + I_2 Z_2 \quad (2.8)$$

Рівняння намагнічувальних сил можна отримати помноживши ліву і праву частини виразу (2.5) на магнітний опір системи R_m :

$$\Phi_0 = \Phi_1 \cdot R_m + \Phi_2 \cdot R_m \quad (2.9)$$

або

$$F_0 = F_1 + F_2 \quad (2.10)$$

де $F_0 = I_0 W_1$ – намагнічуюча сила, що створює струмом I_0 основний магнітний потік Φ_0 , тобто:

$$I_0 \cdot W_1 = I_1 \cdot W_1 + I_2 W_2 \quad (2.11)$$

Якщо рівняння (2.11) поділити на число витків первинної обмотки W_1 , то отримаємо рівняння струмів:

$$I_0 = I_1 + I_2 \cdot \frac{W_2}{W_1} \quad (2.12)$$

де $\frac{W_2}{W_1} = \frac{1}{K}$ – величина зворотна коефіцієнту трансформації, а вираз

$$\frac{I_2}{K} = I_2' \quad (2.13)$$

де I_2' – струм вторинної обмотки зведений до числа витків первинної обмотки.

Якщо рівняння (2.6) та (2.8) переписати з урахуванням (2.1) та (2.2), а рівняння (2.12) з урахуванням (2.13), то отримаємо систему рівняння, що є математичною моделлю трансформатора при роботі під навантаженням:

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 \cdot R_1 + jI_1 \cdot X_1; \\ U_2 = E_2 - I_2 \cdot R_2 - jI_2 \cdot X_2; \\ I_1 = I_0 + (-i_2') \end{cases} \quad (2.14)$$

У рівнянні (2.14) струм первинної обмотки є сумою двох струмів – намагнічуючого I_0 та струму $-I_2'$, який слід розглядати як струм, що протікає в первинній обмотці щоб урівноважити розмагнічувальну дію струму навантаження I_2 . Цей струм показує на скільки повинен зрости струм I_1 , що споживається з мережі, при зростанні навантаження, щоб намагнічуючий струм I_0 залишався без зміни. Так як максимальне значення магнітного потоку при зміні навантаження незмінне і створюється ще в режимі холостого ходу, то і струм I_0 називають *струмом холостого ходу*.

Враховуючи що магнітний потік трансформатора змінний, в магнітній системі будуть мати місце втрати пов'язані з перемагнічуванням (гістерезисом) та вихровими струмами, тому струм холостого ходу, яким створюється потік, буде мати дві складові частини – реактивну I_{0p} , якою безпосередньо створюється поле, та активну I_{0a} , еквівалентну втратам в магнітній системі:

$$I_0 = I_{0a} + I_{0p} \quad (2.15)$$

Потрібно зазначити, що активна складова частини струму I_{0a} незначна, і складає не більше 10 % від I_0 , тому суттєвого впливу на цей струм не виказує.

На рисунку 2.3 зображена діаграма потоку, струмів і ЕРС при відсутності навантаження.

Кут α – називають *кутом магнітних втрат* або *кутом магнітного запізнення*, він показує на скільки відстає потік від намагнічуючого струму. Звичайно α незначний і складає близько $6 \dots 8^\circ$.

В загальному випадку параметри первинної та вторинної обмоток відрізняються між собою. Реальний трансформатор замінюють теоретичним, так званим *зведеним*, у якого не лише струм вторинної обмотки I_2' (2.13), а і решта величин цієї обмотки перераховані на число витків первинної обмотки. Тобто це такий трансформатор, у якого $W_2' = W_1$, а отже, коефіцієнт трансформації $K' = 1$.

Перераховуючи реальний трансформатор на зведений, енергетичні показники (потужності, втрати та фазові зсуви) залишають незмінними. Так електромагнітна потужність зведеного трансформатора $E_2' I_2'$ повинна дорівнювати електромагнітній потужності реального трансформатора:

$$E_2' \cdot I_2' = E_2 \cdot I_2 \quad (2.16)$$

Підставивши значення зведеного струму $I_2' = I_2 / K$ (2.13), отримаємо формулу зведеної вторинної ЕРС:

$$E_2' = \frac{E_2 \cdot I_2}{I_2'} = \frac{E_2 \cdot I_2}{I_2 / K} = E_2 \cdot K. \quad (2.17)$$

Враховуючи рівність електричних потужностей $U_2 I_2 \approx U_2' I_2'$, отримаємо, по аналогії:

$$U_2' = U_2 \cdot K \quad (2.18)$$

З умови рівностей електричних втрат $I_2^2 R_2 = I_2'^2 R_2'$ визначається зведений активний опір:

$$R_2' = R_2 \cdot K^2 \quad (2.19)$$

і, за аналогією, зведений індуктивний опір:

$$X_2' = X_2 \cdot K^2 \quad (2.20)$$

Зведений повний опір вторинної обмотки визначиться через зведені активні та індуктивні опори:

$$Z_2' = R_2' + jX_2' = (R_2 + jX_2) \cdot K^2 = Z_2 \cdot K \quad (2.21)$$

По аналогії зведений повний опір навантаження:

$$Z'_n = Z_n \cdot K^2 \quad (2.22)$$

Система рівнянь, що описує роботу зведеного трансформатора, буде відрізнятися від системи рівнянь реального трансформатора лише зведеними величинами, замість реальних, в системі рівнянь (2.14)

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 \cdot R_1 + jI_1 \cdot X_1; \\ U_2' = E_2' - I_2' \cdot R_2' - jI_2' \cdot X_2'; \\ I_1 = I_0 + (-i_2') \end{cases} \quad (2.23)$$

Ця система рівнянь може розглядатись як математична модель зведеного трансформатора. Відомо, що будь-якій математичній моделі є фізичний відповідник, тобто, можна побудувати *фізичну модель*, яка буде відповідати рівнянням математичної моделі. Такою моделлю є *електрична схема заміщення* зведеного трансформатора. В цій схемі реально існуючий магнітний зв'язок замінюється електричним, що дозволяє суттєво спростити розрахунки трансформатора.

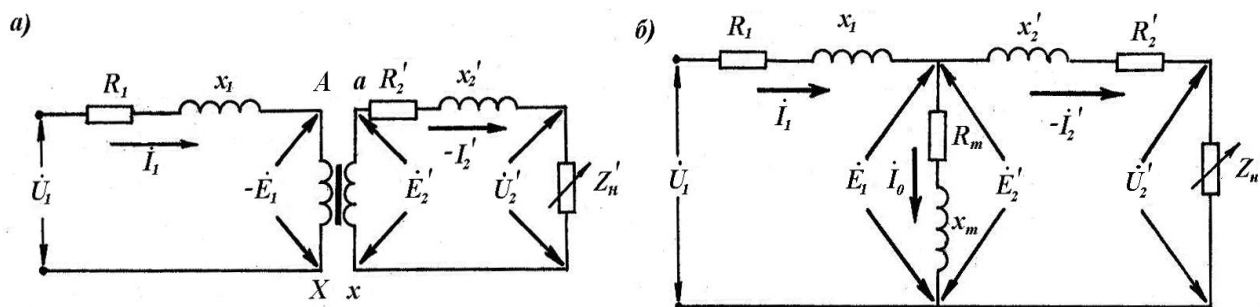


Рисунок 2.4 – Еквівалентна схема (а) та схема заміщення (б) зведеного

Якщо умовно опори активний R та індуктивний X винести з відповідних обмоток і ввімкнути їх послідовно обмотці, то еквівалентна схема буде мати вигляд (рис. 2.4, а). В цій схемі можна з'єднати точки X та x , що, як відомо з електротехніки, не спричинить у контурах ніяких змін.

В свою чергу, враховуючи, що у зведеного трансформатора $K' = 1$, а тому $E_1 = E_2'$, можна об'єднати точки A та a , як такі, що мають рівні потенціали.

В результаті з'єднання точок A та a і X та x отримано T -подібну схему заміщення (рис. 2.4, б), у якій

$$E_1 = E_2' = I_0 Z_m \quad (2.24)$$

де $Z_m = R_m + jX_m$ – повний опір намагнічуючий вітки, якою протікає струм I_0 .

Легко переконатись, що ця схема повністю відповідає системі рівнянь (2.23), а отже, є їх фізичним відповідником.

Всі параметри схеми (рис. 2.4, б), крім величини Z_n' , є величинами незмінними і можуть бути легко визначеними з дослідів ХХ та КЗ, а отже, і за каталожними даними трансформатора.

Щоб наочно показати співвідношення та фазові зсуви між струмом, ЕРС та напругами зведеного трансформатора, будують його векторно-потенційну діаграму – графічне вираження системи рівнянь (2.23).

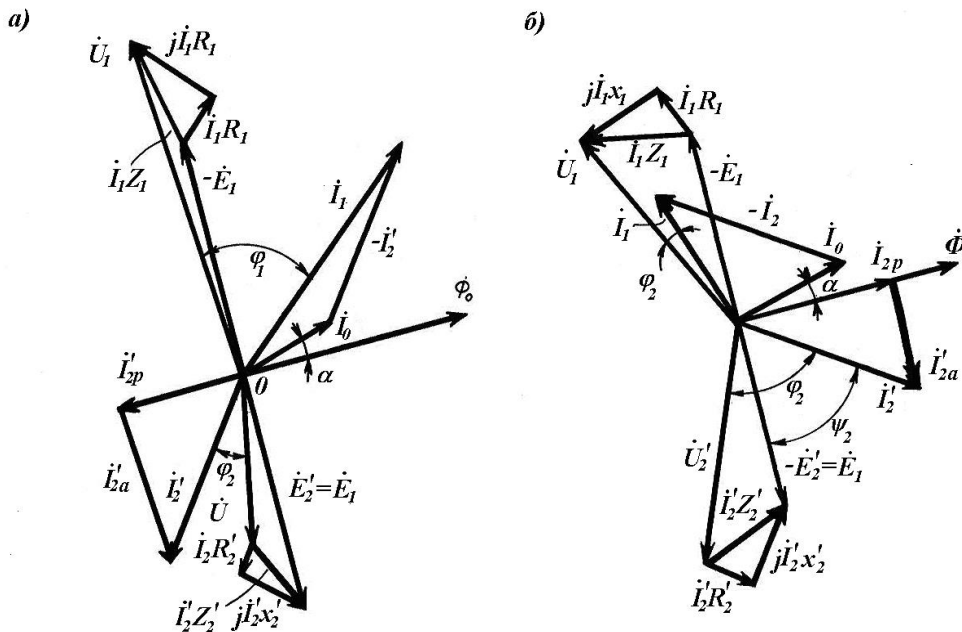


Рисунок 2.5 – Векторно-потенційні діаграми трансформатора при активно-індуктивному (а) та активно-ємнісному (б) навантаженні

При такій побудові вважають відомими величину навантаження і його характер (активне, активно-індуктивне, чи активно-ємнісне), а також, параметри *T-подібної* схеми заміщення: R_1 ; X_1 ; R_2' ; X_2' ; R_m ; X_m та масштаби струмів і напруг.

В довільному напрямі відкладають в масштабі напруг вектор U_2' , далі під кутом φ_2 (характер навантаження, а отже, і кут φ_2 , відомі) струм I_2' в масштабі струмів (рис. 2.5).

Геометрично додавши до напруги U_2' , падіння напруг на активному (паралельно I_2') та індуктивному (перпендикулярно I_2') опорах, отримують вектор ЕРС $E_2' = E_1$. Вектор магнітного потоку Φ_0 випереджує ЕРС на кут в 90° , а вектор I_0 на кут α потік. Вектор струму первинної обмотки I_1 , отримують з'єднавши початок координат з кінцем вектора $-I_2'$, доданого до вектора струму ХХ I_0 . Напругу U_1 будують через параметри первинної обмотки

так, як ЕРС $E_2' = E_1$ через параметри вторинної. Важливим при побудові векторних діаграм для різних, за характером, навантажень є те, що при активно-емнісному навантаженні вектор напруги U_2' вторинної обмотки виявляється довшим від вектора ЕРС E_2' (рис. 2.5, б). Це пояснюється підмагнічувальною дією струму навантаження, реактивна складова якого співпадає з основним магнітним потоком, тоді як при активно-індуктивному навантаженні (рис. 2.5, а) вона направлена на зустріч Φ_0 .

T-подібна схема заміщення (рис. 2.4, б) при розрахунках дає результати досить високої точності, яка на практиці непотрібна. Векторна діаграма, що будується за цією схемою (рис. 2.5) настільки складна, що її, взагалі, неможливо використати для практичних розрахунків. Враховуючи все це, розрахунки трансформатора проводять за спрощеною схемою заміщення та векторною діаграмою.

Спрощення схеми заміщення базується на тому, що при режимах роботи трансформатора близьких до номінального, струми в його обмотках набагато перевищують значення струму ХХ ($i_0 = 1.5...10\%$).

Якщо знехтувати цим струмом (уважати, що $i_0 = 0$, і відповідно $Z_m = \infty$), то схема заміщення трансформатора не буде мати намагнічуючий вітки (рис. 2.6).

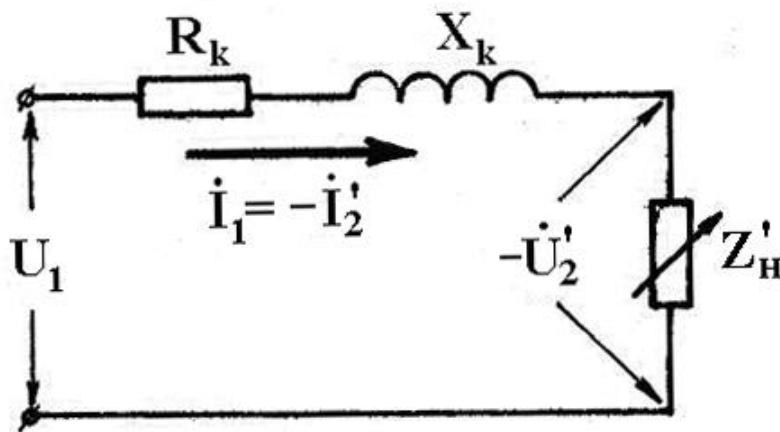


Рисунок 2.6 – Спрощена схема заміщення трансформатора

Для цієї схеми (рис. 2.6) $R_x = R_1 + R_2'$; $X_k = X_1 + X_2'$ визначаються в досліді КЗ, а рівняння напруги має вигляд:

$$U_1 = -U_2' + I_1 \cdot R_k + jI_1 \cdot X_k \quad (2.25)$$

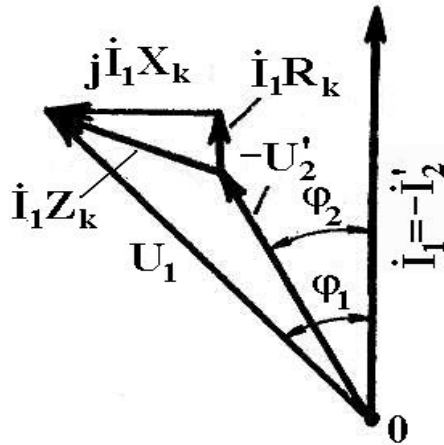


Рисунок 2.7 – Спрощена векторно-потенційна діаграма трансформатора

Відповідно до спрощеної схеми заміщення, згідно з рівнянням (2.25), будується спрощена векторно-потенційна діаграма. Приклад такої діаграми для активно-індуктивного навантаження зображений на (рис. 2.7).

Побудова такої діаграми проста. Спершу в довільному напрямі відкладають вектор струму $I_1 = -I_2'$, цей вектор випереджує на кут φ_2 (характер навантаження, а отже і кут, при побудові діаграми, відомі) вектор зведеної напруги $-U_2'$, до кінця якого, відповідно паралельно та перпендикулярно до струму $I_1 = -I_2$, відкладають вектори падінь напруги на активному та індуктивному опорах КЗ трансформатора. Результуючий вектор – є вектор підведеної напруги U_1 , що на кут φ_1 випереджує струм $I_1 = -I_2'$.

2.3 Характеристики трансформатора

Характеристики холостого ходу, знімають при розімкненій вторинній обмотці, за схемами (рис. 2.9), у яких вимірюють струми та потужність, що споживаються з мережі, а також, напруги на первинній та вторинній обмотках.

Регулятором напруги змінюють первинну напругу від нуля до $1,25 U_{ном}$, знімаючи показання вимірювальних приладів 5...6 точок, обов'язково точки $U_1 = U_{ном}$. Це дає змогу визначити характеристики ХХ (рис. 2.8):

$$i_0 \cdot P_0 \cdot \cos \phi_0 = f(U_1) \quad (2.26)$$

Коефіцієнти потужності для однофазного трансформатора –

$$\cos \phi_0 = \frac{P_0}{U_1 \cdot I_1} \quad (2.27)$$

і для трифазного трансформатора –

$$\cos\phi_0 = \frac{P_0}{3 \cdot U_1 \cdot I_1}. \quad (2.28)$$

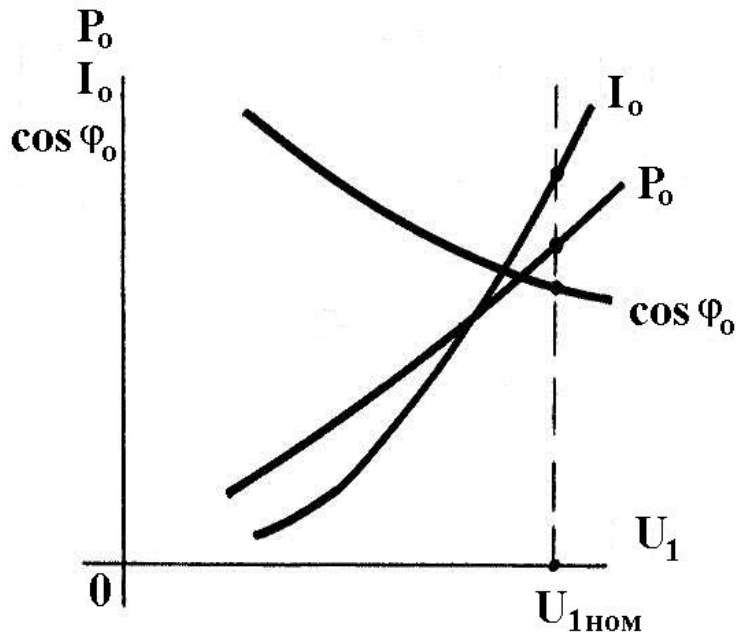


Рисунок 2.8 – Характеристики XX трансформатора

Дані точки $U_1 = U_{1ном}$, а саме i_0 та P_0 заносяться до каталогу трансформатора.

Намагнічуючий струм i_0 лежить в межах 1,5...10 % від $I_{1ном}$. Таке мале значення струму XX пояснюється якістю електротехнічної сталі, з якої виготовляють магнітні системи трансформаторів та відсутністю в них повітряних зазорів.

Потужність, що споживається з мережі, є потужністю втрат XX, так як ніякої корисної роботи при XX трансформатор не виконує. Враховуючи, що у вторинній обмотці струм відсутній, а в первинній досить малий, електричними втратами при XX можна знехтувати, отже, втрати XX – це *магнітні втрати*, або *втрати в залізі* на вихрові струми та перемагнічування (гістерезис). Максимальний магнітний потік трансформатора при зміні навантаження лишається незмінним:

$$\Phi_{макс} \approx U_1 / (4,44 \cdot f \cdot W_1). \quad (2.29)$$

Нехтуючи падінням напруги в первинній обмотці, можна вважати, що $U_1 \approx E_1$, отже, втрати XX називають ще *постійними втратами*.

Систему рівнянь (2.23) для режиму ХХ можна записати так:

$$\begin{cases} U_1 = -E_1 + I_1 \cdot R_1 + jI_1 \cdot X_1; \\ U_2' = E_2'; \\ I_1 = I_0 \end{cases} \quad (2.30)$$

Відповідно до цієї системи рівнянь Т-подібна схема заміщення при ХХ буде мати такий вигляд (рис. 2.9, а).

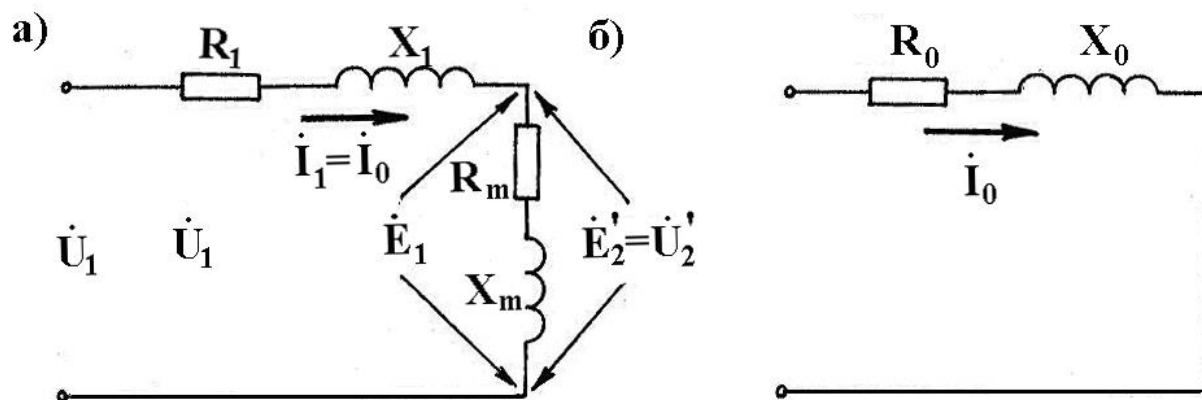


Рисунок. 2.9 – Схема заміщення трансформатора при ХХ (а) та згорнута схема заміщення (б)

За згорнутою схемою заміщення (рис. 2.9, б) проводиться розрахунок параметрів намагнічувальної гілки:

$$Z_0 = \sqrt{R_0^2 + X_0^2} = U_1 / I_0 \quad (2.31)$$

$$R_0 = Z_0 \cdot \cos \varphi_0 \quad (2.32)$$

$$X_0 = \sqrt{Z_0^2 - R_0^2} \quad (2.33)$$

де $R_0 = R_1 + R_m$; $X_0 = X_1 + X_m$; Z_0 – активний, індуктивний та повний опори холостого ходу трансформатора.

Якщо врахувати, що $R_1 \ll R_m$ а $X_1 \ll X_m$, то можна вважати, що $R_m \approx R_0$, а $X_m \approx X_0$.

Характеристики короткого замикання. Розрізняють два види короткого замикання – аварійне, коли до первинної обмотки підведена номінальна напруга, і струми КЗ можуть в 20...40 разів перевищувати номінальне значення, що уявляє небезпеку для трансформатора; а також, дослідне КЗ, коли

до первинної обмотки підводиться знижена напруга. В обох випадках вторинна обмотка замкнена коротко.

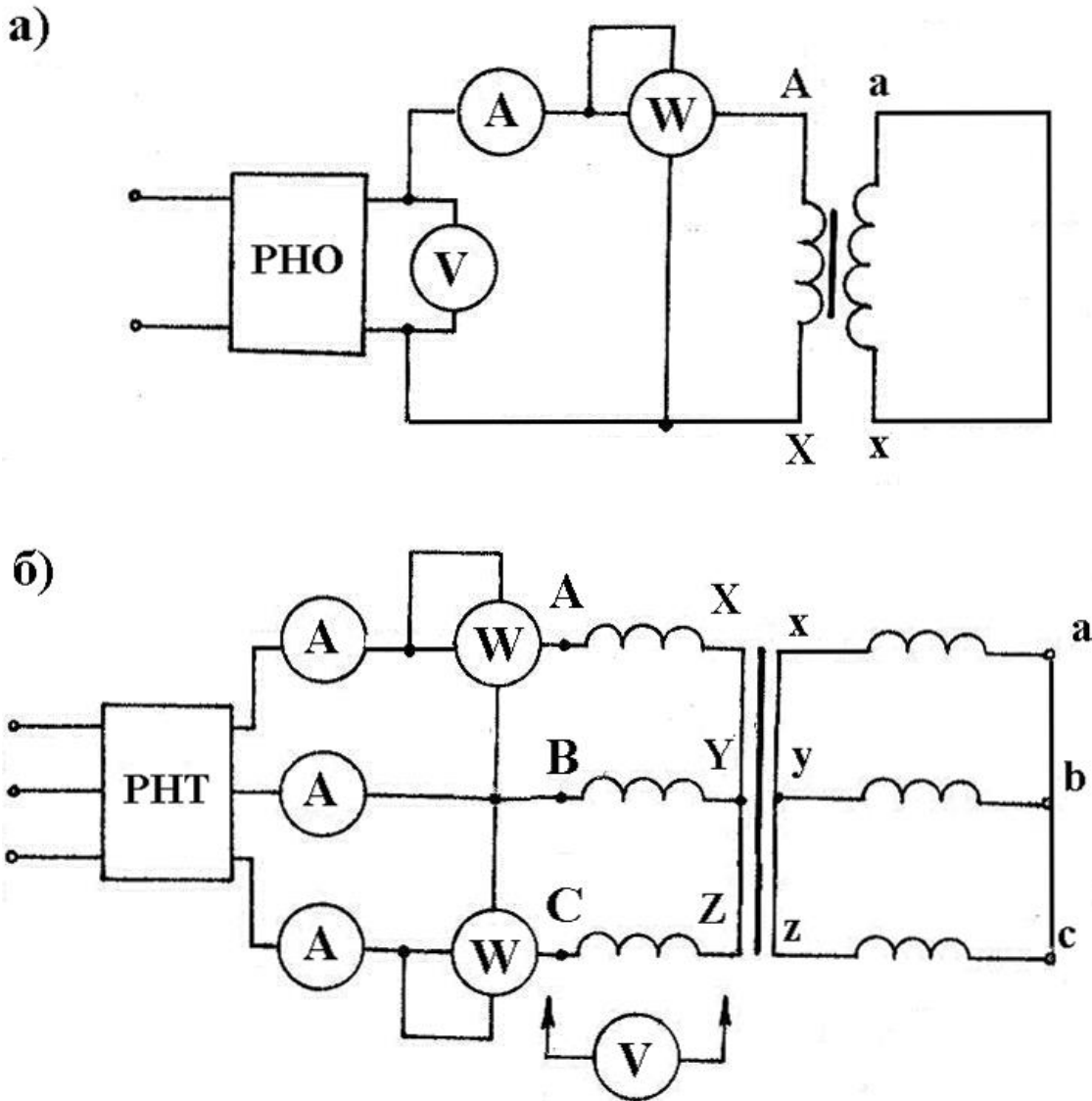


Рисунок 2.10 – Схема досліду КЗ однофазного (а) та трифазного (б)

Дослідне КЗ проводять за схемами (рис. 2.10) аналогічними схемами досліду ХХ при замкнених обмотках НН. Трансформатори від регуляторів напруги живляться з боку обмотки ВН, щоб струм регуляторів був меншим.

Як і в досліді ХХ, в досліді КЗ, знімають показання вимірювальних приладів кількох точок, змінюючи підведену напругу так, щоб струм в обмотках змінювався від 0 до $1,25 I_{ном}$. Обов'язково записують показання приладів в точці $I_1 = I_{ном}$, при цьому значення напруги короткого замикання, u_k та втрат короткого замикання, P_k , заносять до каталогу трансформатора. За результатами досліду будують *характеристики КЗ* (рис. 2.11).

$$I_k \cdot P_k \cdot \cos \phi = f(U_k), \quad (2.34)$$

де I_k , P_k , U_k – значення струму, потужності та напруги, що визначаються за показаннями приладів схем (рис. 2.10), а коефіцієнт потужності $\cos \phi_k$ обчислюються, так:

– для однофазного трансформатора:

$$\cos \phi_k = P_k / U_k \cdot I_k, \quad (2.35)$$

– для трифазного трансформатора:

$$\cos \phi_k = P_k / 3 \cdot U_k \cdot I_k, \quad (2.36)$$

де $U_k = (U_{ka} + U_{kb} + U_{kc}) / 3$, $I_k = (I_{ka} + I_{kb} + I_{kc}) / 3$ – середнє арифметичне значення напруги та струмів фаз, а $P_k = P_{k1} \pm P_{k2}$ – загальна потужність, що споживається з мережі в досліді.

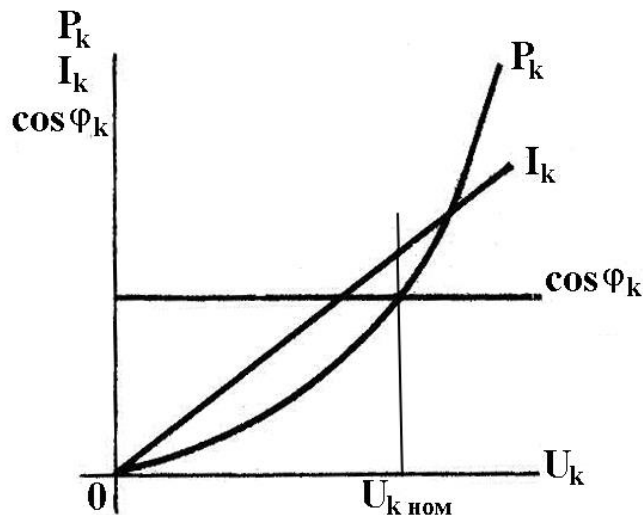


Рисунок 2.11 – Характеристики КЗ трансформатора

Напруга, що підводиться до трансформатора при дослідному КЗ, називається *напругою КЗ* – це така знижена напруга, яку підводять до первинної обмотки трансформатора, при замкненій вторинній, щоб струми в обох обмотках були номінальними. У каталог трансформатора записують величину напруги КЗ у відсотках:

$$U_k = (U_k / U_{1ном}) \cdot 100, [\%]. \quad (2.37)$$

В сучасних трансформаторів $u_k \approx 4...15 \%$, менші значення відносяться до менш потужних, а більші до більш потужних трансформаторів.

Як і в досліді ХХ, в досліді КЗ, трансформатор не виконує ніякої корисної роботи, тому підведена потужність, P_k , називають потужністю втрат КЗ і заносять до каталогу трансформатора. Так як підведена в досліді напруга знижена, а магнітний потік, згідно з (2.29), пропорційний напрузі, то магнітними втратами в досліді КЗ можна знехтувати і уважати втрати КЗ лише *електричними*, або *втратами в обмотках*. На відміну від втрат ХХ, ці втрати є *змінними*, тому що при зміні навантаження змінюється струм в обмотках, а отже, і пов'язані з ним втрати.

Як і магнітними втратами, можна знехтувати намагнічуючим струмом I_0 , тому рівняння струмів (2.14) при КЗ буде мати такий вигляд:

$$I_1 = -I_2' \quad (2.38)$$

а в схемі заміщення буде відсутня намагнічувальна гілка (рис. 2.12).

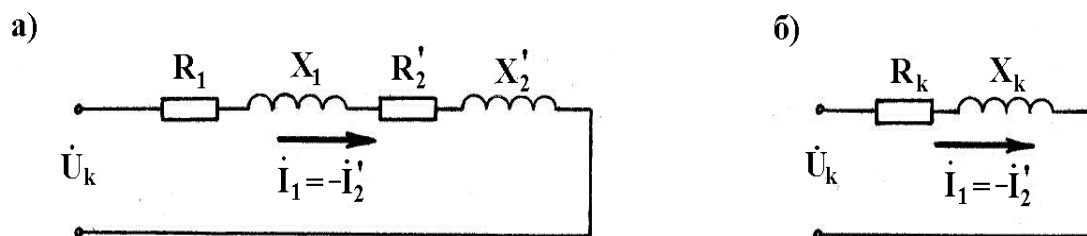


Рисунок. 2.12 – Схема заміщення (а) та згорнута схема заміщення (б) трансформатора в досліді КЗ

За згорнутою схемою заміщення (рис. 2.12, б) визначають параметри КЗ:

$$Z_k = \sqrt{R_k^2 + X_k^2} = U_k / I_k \quad (2.39)$$

$$R_k = Z_k \cos \varphi_k \quad (2.40)$$

$$X_k = \sqrt{Z_k^2 - R_k^2} \quad (2.41)$$

де $R_k = R_1 + R_2'$; $X_k = X_1 + X_2'$; Z_k – активний, індуктивний та повний опори короткого замикання трансформатора.

Враховуючи, що у зведеного трансформатора $R_1 \approx R_2'$, а $X_1 \approx X_2'$, ці величини легко визначаються з даних досліді КЗ:

$$R_1 \approx R_2 = R_k / 2, X_1 \approx X_2 = X_k / 2 \quad (2.42)$$

Значення опорів R_k , Z_k , потужності втрат P_k , коефіцієнту потужності $\cos \varphi_k$, а також, напруги КЗ U_k необхідно привести до робочої температури обмоток +75 °С.

$$R_{k75} = R_k \cdot [1 + \alpha(75^\circ - \theta^\circ)]; \quad (2.43)$$

$$Z_{k75} = \sqrt{R_{k75}^2 + X_{k75}^2}; \quad (2.44)$$

$$\cos \varphi_{k75} = R_{k75}/Z_{k75}; \quad (2.45)$$

$$u_{k75} = (I_1 Z_{k75}/U_{1\text{ном}}) \cdot 100; \quad (2.46)$$

$$P_{k75} = I_1^2 \cdot R_{k75} \cdot P_{k75} = 3 \cdot I_1^2 \cdot R_{k75}, \quad (2.47)$$

де $\alpha = 0,004$ – температурний коефіцієнт міді та алюмінію, а θ° значення температури навколишнього середовища при проведенні досліді КЗ.

Рівняння напруги трансформатора, відповідно до схеми заміщення (рис. 2.12, а) має такий вигляд:

$$U_k = I_1(R_1 + R_2') + jX_1(X_1 + X_k), \quad (2.48)$$

або за згорнутою схемою (рис. 2.12, б):

$$U_k = I_k R_k + jI_1 X_k = I_1 \cdot Z_k, \quad (2.49)$$

Користуючись рівняннями струмів (2.38) та рівняннями напруг (2.48), для досліді КЗ будують векторно-потенційну діаграму трансформатора (рис. 2.13) при КЗ. Побудову діаграми, як правило, починають з вектора струму $I_1 = -I_2'$, який відкладають довільно. За напрямком струмів відкладають вектор падіння напруги на активному опорі первинної обмотки $I_1 R_1$ і перпендикулярно йому вектор реактивного падіння напруги $jI_1 X_1$. До кінця вектора $I_1 Z_1 = I_1 R_1 + jI_1 X_1$ добудовують, аналогічно, вектори падіння напруги на зведеній вторинній обмотці $-I_2' Z_2' = -I_2' R_2' - jI_2' X_2'$, отримуючи точку А. Заключний вектор OA і є вектором напруги КЗ $U_k = I_1 Z_k$, а трикутник OAB – *трикутником короткого замикання*.

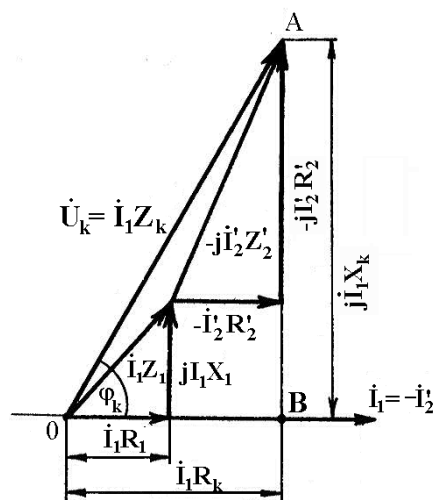


Рисунок 2.13 – Векторна діаграма трансформатора в досліді КЗ

Сторони цього трикутника:

$$\begin{aligned} OB &= I_1 R_1 - I_2' R_2 = I_1 R_k = U_{ka} \\ BA &= jI_1 X_1 - jI_2' X_2 = jI_1 X_k = U_{kp} \\ OA &= I_1 Z_k = U_k \end{aligned}$$

Тут

$$U_k = \sqrt{U_{ka}^2 + U_{kp}^2}, \quad (2.50)$$

де U_{ka} , U_{kp} – відповідно активна та реактивна складові частини напруги короткого замикання.

При роботі трансформатора під навантаженням його вторинна напруга U_2 змінюється пропорційно до зміни навантаження. Зокрема, в разі відсутності навантаження (ХХ) $U_2 = U_{2ном}$, а при навантаженні

$$U_2 = U_{2ном} - \Delta U, \quad (2.51)$$

де ΔU – падіння вторинної напруги, В.

Падіння вторинної напруги є важливим показником роботи трансформатора, так як визначає величину вторинної напруги при заданому навантаженні. Воно може бути визначене для реального трансформатора як в іменованих одиницях, В:

$$\Delta U = U_{2ном} - U_2, \quad (2.52)$$

так і у відсотках:

$$\Delta u = (U_{2ном} - U_2) \cdot 100 / U_{2ном}. \quad (2.53)$$

Формула (2.53) виражає лише фізичну суть падіння напруги, тому для її визначення необхідно вивести значення ΔU через каталожні дані трансформатора. Для цього слід скористатися спрощеними схемою та векторно-потенційною діаграмою трансформатора.

Зі спрощеної схеми (рис. 2.6) випливає, що $U_2' = U_{1ном} - I_1 Z_k$, а отже, ΔU для зведеного трансформатора – це алгебраїчна різниця між напругами:

$$\Delta U = U_{1ном} - U_2', \quad (2.54)$$

визначити яку можна, провівши нескладну побудову, на спрощеній векторно-потенційній діаграмі (рис. 2.14).

Вектор напруги $-U_2'$ продовжується на відрізок ab , який і є значенням зниження напруги, що необхідно визначити. Точка b отримана шляхом перенесення розтином циркуля вектора U_1 (відрізок od) на продовження вектора $-U_2'$ (при цьому вважають, що кут $\angle b$ прямий). На відрізок \bar{ab} опускають перпендикуляр з кінця вектора U_{ka} в точку c . З незначними допущеннями можна вважати, що $U_{1ном} - U_2' = ab = ac + cb$, де $ac = U_{ka} \cos \varphi_2$; $cb = U_{kp} \sin \varphi_2$, тоді

$$\Delta U_{ном} = U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2 \text{ [В]}, \quad (2.55)$$

Або

$$\Delta u_{ном} = u_{ka} \cos \varphi_2 + u_{kp} \sin \varphi_2 \text{ [%]}, \quad (2.56)$$

де $u_{ka} = (P_k / S_{ном}) \cdot 100\%$, $u_{kp} = \sqrt{u_k^2 - u_{ka}^2}$, % – активна та реактивна складові частини напруги КЗ, визначені за каталожними даними трансформатора.

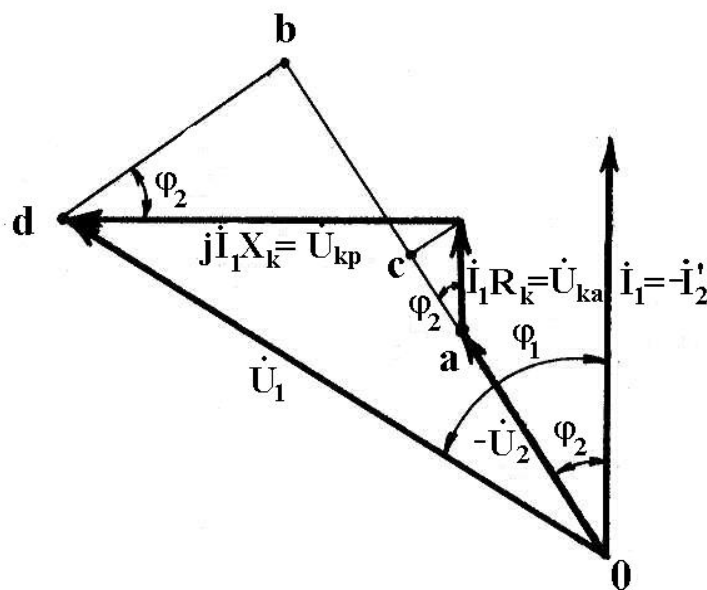


Рисунок 2.14 – До визначення формули ΔU

Формули (2.55) та (2.56) дозволяють визначити зміну напруги лише для номінального режиму роботи трансформатора, щоб отримати будь-яке поточне значення зміни напруги, ці формули помножують на коефіцієнт навантаження $\beta = I_2 / I_{2ном}$:

$$\Delta U = \beta (U_{ka} \cos \varphi_2 + U_{kp} \sin \varphi_2). \quad (2.57)$$

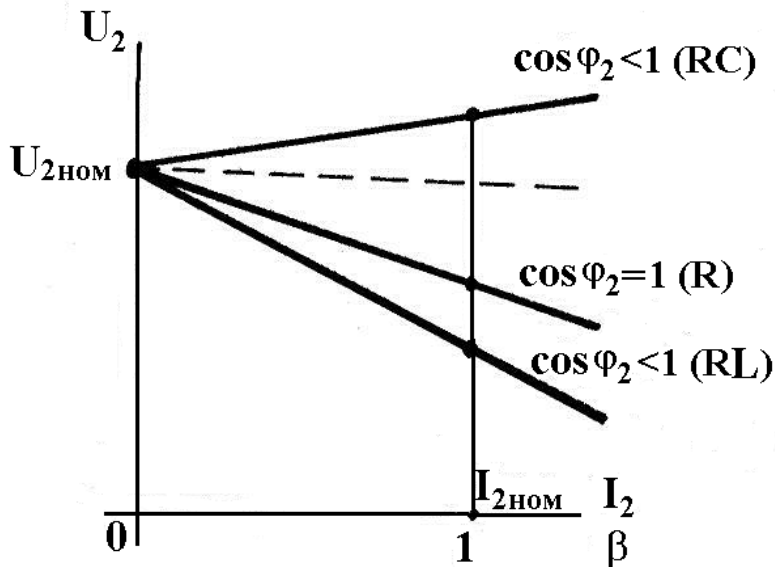


Рисунок 2.15 – Зовнішні характеристики трансформатора

Якщо врахувати, що $U_{ка} = U_k \cos \varphi_k$; $U_{кр} = U_k \sin \varphi_k$, отримаємо ще одну формулу для визначення зміни напруги:

$$\Delta U = \beta U_k (\cos \varphi_k \cdot \cos \varphi_2 + \sin \varphi_k \sin \varphi_2) = \beta U_k \cos(\varphi_k - \varphi_2). \quad (2.58)$$

Із (2.58) випливає, що найбільше падіння напруги буде відбуватися при рівності кутів КЗ та навантаженні $\varphi_k = \varphi_2$, $\cos(\varphi_k - \varphi_2) = 1$.

За формулами (2.51) та (2.57) чи (2.58) будують *зовнішні характеристики* трансформатора – залежність вторинної напруги U_2 від струму навантаження I_2 . Варто пам'ятати, що за номінальну вторинну напругу в силових трансформаторах вважають напругу при ХХ. На рисунку 2.15 подано зовнішні характеристики трансформатора при різних, за характером, навантаженнях.

Характеристика $U_2 = f(\beta)$ при активно-ємнісному (RC) навантаженні зростає, що легко пояснити підмагнічувальною дією ємнісного струму вторинної обмотки трансформатора, а більше значне падіння напруги при активно-індуктивному навантаженні, в порівнянні з «чисто» активним – розмагнічувальною дією індуктивного струму.

Перетворення електричної енергії P_1 шляхом трансформування в електричну енергію P_2 супроводжується втратами енергії, що можна відобразити у вигляді енергетичної діаграми (рис. 2.16).

Підведена до первинної обмотки трансформатора потужність P_1 частково

затрачується на електричні втрати P_{e1} , а частково на магнітні $P_{маг}$, решта у вигляді електромагнітної потужності, передається через магнітну систему до вторинної обмотки:

$$P_{ем} = mE_1 I_1 \cos \psi_1 = mE_2 I_2 \cos \psi_2, \quad (2.59)$$

де m – число фаз, ψ_1, ψ_2 – кути між ЕРС та струмами первинної і вторинної обмоток відповідно.

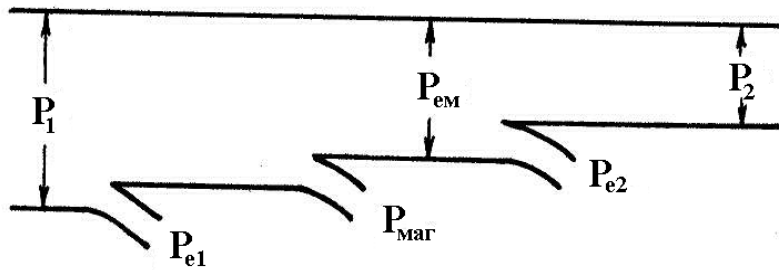


Рисунок 2.16 – Енергетична діаграма трансформатора

У вторинній обмотці наявні електричні втрати P_{e2} і потужність, що залишилась, P_2 передається на навантаження як корисна потужність:

$$P_2 = mU_2 I_2 \cos \varphi_2 = \beta S_{ном} \cos \varphi_2. \quad (2.60)$$

Таким чином, втрати в трансформаторі можна розділити на , зумовлені нагріванням обмоток струмами:

$$P_e = P_{e1} + P_{e2} = mI_1^2 R_1 + mI_2'^2 R_2'. \quad (2.61)$$

Ці втрати для номінального режиму указують в каталозі трансформатора $P_{кном}$, їхнє поточне значення

$$P_e = \beta^2 P_{кном} \quad (2.62)$$

пропорційне квадрату коефіцієнта навантаження; магнітні, постійні, указують в каталозі як $P_{оном}$.

Магнітні втрати відбуваються, головним чином, в осерді трансформатора. Причина їх появи – систематичне перемагнічування магнітопроводу змінним магнітним полем. Це перемагнічування викликає два види магнітних втрат:

втрати від гістерезису $P_{гист}$, та втрати на вихрові струми $P_{в.с.}$, які визначаються змінним потоком в пластинах магнітної системи:

$$P_{маг} = P_{гист} + P_{в.с.} \quad (2.63)$$

З метою зниження цих втрат магнітопровід трансформатора виконують з магнітом'якого феромагнітного матеріалу – тонколистової електротехнічної сталі, шихтованим із тонких пластин з двох боків ізольованих плівкою лаку.

Магнітні втрати від гістерезису прямо пропорційні частоті змінного струму ($P_{гист} \equiv f$), а втрати від вихрових струмів пропорційні квадрату цієї частоти ($P_{в.с.} \equiv f^2$), тому сумарні магнітні втрати вважають пропорційними частоті в ступені 1,3, тобто $P_{маг} \equiv f^{1,3}$. Величина магнітних втрат пропорційна також квадрату магнітної індукції ($P_{маг} \equiv B^2$), отже:

$$P_{маг} = P_{пит} (B/1.5)^2 (f/50)^{1,3} G, \quad (2.64)$$

де $P_{пит}$ – питомі втрати при індукції $B = 1,5 \text{ Тл}$ та частоті $f = 50 \text{ Гц}$; G – маса сталі, кг.

Коефіцієнт корисної дії (ККД) трансформатора визначають як відношення корисної активної потужності P_2 до затраченої потужності, яка споживається з мережі, P_1 :

$$\eta = P_2 / P_1 = P_2 / (P_2 + \sum P), \quad (2.65)$$

де $\sum P = P_{оном} + \beta^2 P_{кном}$ – сума втрат в трансформаторі.

З урахуванням (2.60) та (2.65), ККД трансформатора можна подати так:

$$\eta = \frac{\beta S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta S_{ном} \cos \varphi_2 + P_{оном} + \beta^2 P_{кном}} \quad (2.66)$$

Враховуючи, що у формулі (2.66) β є і в чисельнику і в знаменнику, зростання β буде спершу спричиняти зростання ККД до максимального значення $\eta_{макс}$, а потім його зниження. Щоб визначити коефіцієнт навантаження β' , при якому значення ККД буде найбільшим, необхідно прирівняти до нуля похідну від виразу (2.66), тобто розв'язати рівняння $d\eta/d\beta = 0$. При цьому отримаємо умову максимуму ККД – рівність змінних та постійних втрат: $\beta'^2 P_{кном} = P_{оном}$, а звідси і значення навантаження,

що відповідає максимальному ККД:

$$\beta' = \sqrt{P_{0ном}/P_{кном}} \quad (2.67)$$

Зазвичай ККД трансформатора має найбільше значення при навантаженнях, що відповідають $\beta' = 0,45 \dots 0,65$. Якщо в (2.66) підставити значення (2.67), то отримаємо вираз із максимальним ККД трансформатора:

$$\eta_{\max} = \frac{\beta' S_{ном} \cos \varphi_2}{\beta' S_{ном} \cos \varphi_2 + 2P_{0ном}} \quad (2.68)$$

Залежність ККД від коефіцієнта навантаження при різних характерах навантаження зображена на рисунку 2.17.

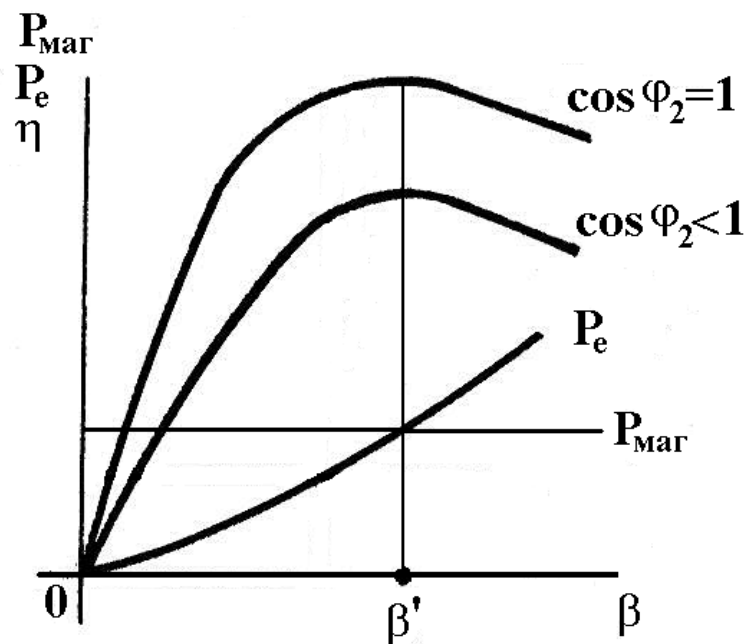


Рисунок 2.17 – Втрати та ККД трансформатора

2.4 Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів, паралельна робота трансформаторів

Трансформування трифазного струму можна здійснювати трьома однофазними трансформаторами, які утворюють *трансформаторну групу*, або одним трифазним трансформатором, на кожному з трьох стрижнів магнітної системи якого розташовано по дві обмотки, що створюють відповідно три фази.

Зірка (позначається літерою Y) – це таке сполучення, коли кінці обмоток з'єднують в загальну точку нуль, з цієї точки може виконуватись нульовий вивід. При такому сполученні лінійні напруги більші від фазних в $\sqrt{3}$, а лінійні струми рівні фазним. Нагадаємо, що лінійні напруги – це напруги між фазами – U_{AB} ; U_{BC} ; U_{CA} , а фазні – між початком та кінцем фази – U_{AX} ; U_{BY} ; U_{CZ} (рис. 2.18, а).

Трикутник (позначається літерою Δ) – це схема, за якою початок попередньої фази з'єднують з кінцем наступної. У трикутнику лінійні та фазні напруги рівні, а лінійні струми більші від фазних у $\sqrt{3}$ рази. Нагадаємо, що лінійні струми – це струми, які підтікають до точок а, в, с, а фазні – які з цих точок витікають (рис. 2.18, б).

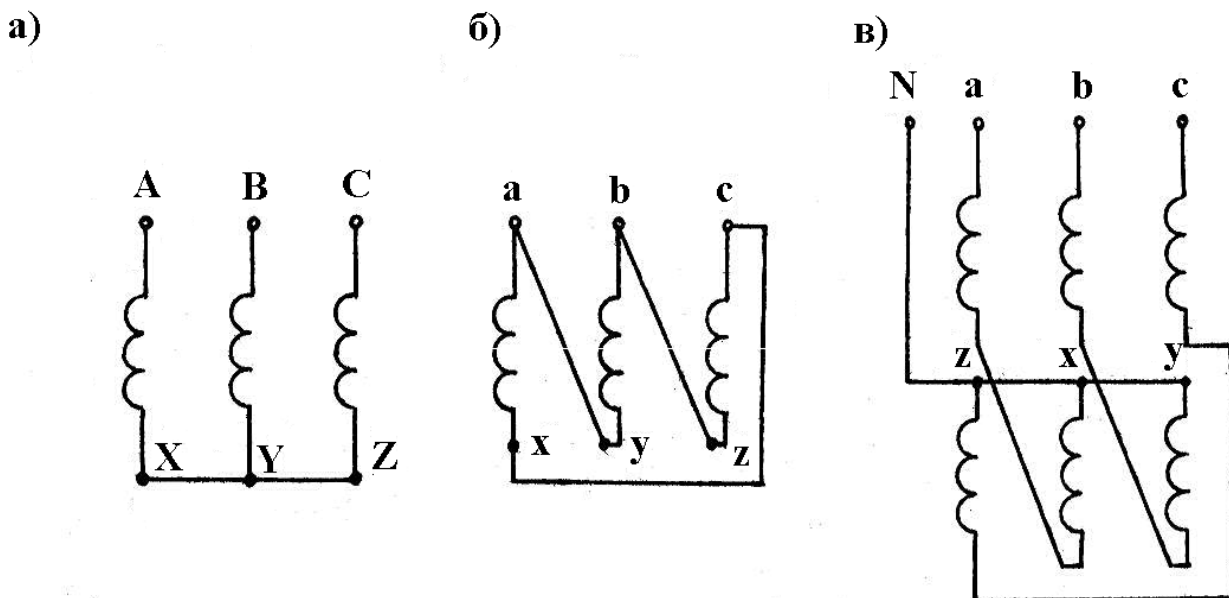


Рисунок 2.18 – Схеми сполучення обмоток ВН у зірку (а) та в трикутник (б) і зигзаг (в) трансформатора

Зигзаг (позначається літерою Z) – це схема, при сполученні за якою обмотка фази ділиться на дві частини, кожна з них розміщується на різних стрижнях, між собою ці частини вмикаються зустрічно, тому напруга фази виявляється в $\sqrt{3}$ більше напруги кожної частини (рис. 2.19, в). Зигзаг називають рівноплечевим, якщо частини фази, що розміщені на різних стрижнях, рівні; і нерівноплечевим – якщо частини різні.

Схеми з'єднання обмоток трансформаторів позначають як дріб (Y/Y , Y/Δ і т. д.). Чисельник цього дроби позначає схему сполучення обмотки ВН, а знаменник – обмотки НН. При виборі схеми з'єднання обмоток

враховують ряд обставин. При високих напругах перевагу віддають схемі сполучення зірка з заземленням нульової точки, що дозволяє знизити напругу проводів лінії електропередач відносно землі в $\sqrt{3}$ раз і знизити вартість ізоляції. Обмотки НН з'єднують в зірку і виводять нульовий вивід (позначається Y_0), якщо необхідно живити змішане навантаження, наприклад, освітлення, яке вмикають на фазу і нуль та трифазні двигуни, що, звичайно, вмикають на лінійну напругу трьох фаз.

Якщо напруга обмотки НН вище 400 В, перевагу віддають схемі сполучення трикутник, так як при цьому покращуються умови роботи трансформатора при несиметричному навантаженні і знижується вплив несинусоїдності напруги.

Схема сполучення зигзаг використовується в спеціальних трансформаторах, які працюють з напівпровідниковими випрямлячами, або інверторами. Слід зазначити, що такі схеми вимагають в $2/\sqrt{3}$ раз більших затрат обмоткового дроту, в порівнянні зі схемою зірка.

В паспорті трансформатора після схеми сполучення обмоток указують через дефіс цифру, яка позначає групу сполучення ($Y/Y-0$; $Y/\Delta-11$). Під групою сполучення обмоток розуміють кут, на який лінійний вектор ЕРС обмотки НН $E_{НН}$ відстає від однойменного вектора обмотки ВН $E_{ВН}$.

У однофазного трансформатора фазні ЕРС будуть одночасно і лінійними, тому ЕРС обмоток ВН та НН або співпадають по фазі, якщо обмотки намотані однаково і мають однакове найменування затискачів (рис. 2.19, а), або будуть у протифазі при різних намотках обмоток, чи не однойменне маркування (рис. 2.19, б).

У відповідності до цього для однофазних трансформаторів визначають і дві групи з'єднання – 0, якій відповідає кут в 0° і 6 – кут в 180° , тобто групі відповідає кут $n \times 30^\circ$, де n – номер групи.

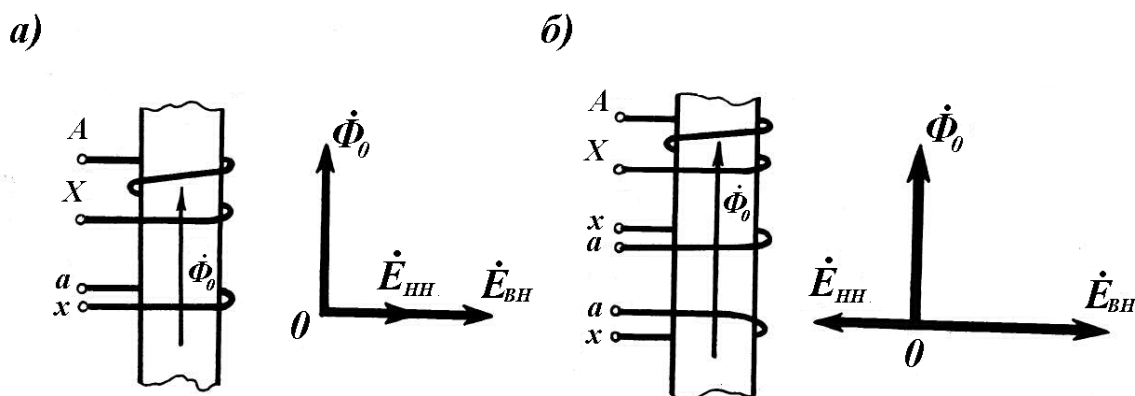


Рисунок 2.19 – Схеми та векторні діаграми потоків і ЕРС до визначення груп сполучення трансформаторів

Для розрахунку групи прийнято користуватись циферблатом стрілкового годинника: велику стрілку, яка вважається лінійним вектором обмотки ВН, ставлять на цифру 12, тоді номер групи вкаже мала стрілка – лінійний вектор ЕРС обмотки НН. Для трифазних трансформаторів, на відміну від однофазних, можна отримати (змінюючи не лише напрям намотки, чи назву затискачів, а і схеми сполучення обмоток) 12 різних груп: 0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11. При цьому парні групи будуть при однакових схемах сполучення (Y/Y; Δ/Δ), а непарні при різних (Y/Δ; Δ/Y).

Щоб визначити яку групу сполучення має трифазний трансформатор при заданих схемах з'єднання, необхідно побудувати векторно-потенційну діаграму ЕРС його обмоток. Для зручної взаємної орієнтації векторів ЕРС обмоток ВН та НН два будь-які затискачі цих обмоток (наприклад, *A* та *a*) вважають електрично з'єднаними. При дослідному визначенні дійсно з'єднують електрично точки *a* і *A*.

На (рис. 2.20, а) подана схема сполучення Y/Y, а на (рис. 2.20, б) векторно-потенційна діаграма, на якій, у відповідності до з'єднаних затискачів *A* та *a*, точки *A* і *a* суміщені. Так як обмотки *AX* та *ax* розташовані на одному стрижні осердя трансформатора, то їх відповідні фазні вектори *E_{AX}* і *E_{ax}* співпадають. Нульова точка *x; y; z* обмотки НН буде розташована на векторі *E_{AX}*, а вектор *E_{by}*, що відкладається з цієї точки, буде паралельним вектору *E_{BV}* і закінчиться на лінійному векторі *E_{BA}*, тому лінійний вектор *E_{ba}* співпадає з лінійним вектором *E_{BA}* (кут $\alpha = 0$), отже, це нульова група.

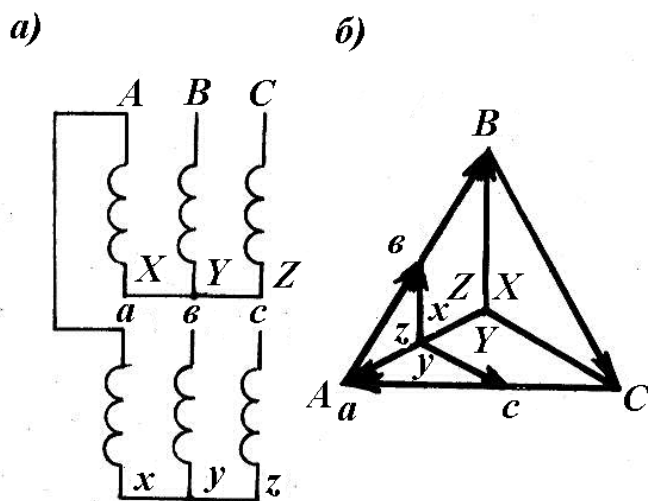


Рисунок 2.20 – Схема сполучення Y/Y (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

На (рис. 2.21) зображені схема сполучення Y/Δ , та векторно-потенційна діаграма, що відповідає цій схемі. Затискачі A і a обмоток ВН та НН з'єднані – на діаграмі це точка $(A; a; y)$, так як a та y .

На y з'єднані в трикутнику обмотки НН. Вектор E_{by} відкладають паралельно фазному вектору E_{BY} , тому що обмотки BY та by розташовані на одному стрижні і мають однакову намотку та однакове найменування затискачів, відповідно до (рис. 2.19, а). Таким чином, лінійний вектор E_{ab} (він одночасно є і E_{by}) відстає від однойменного вектора E_{AB} на кут 330° , а отже, це одинадцята група.

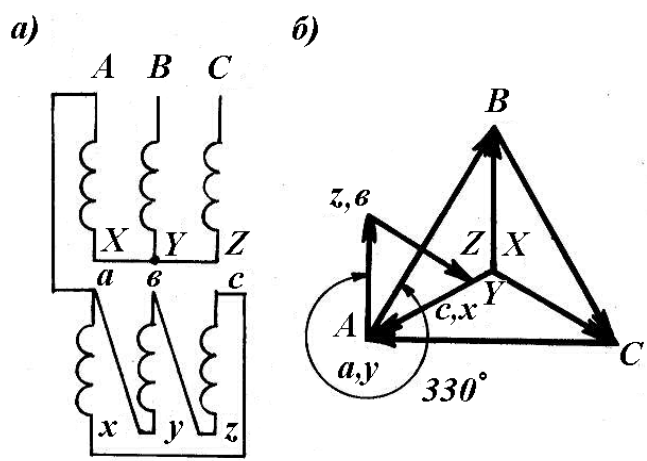


Рисунок 2.21 – Схема сполучення Y/Δ (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

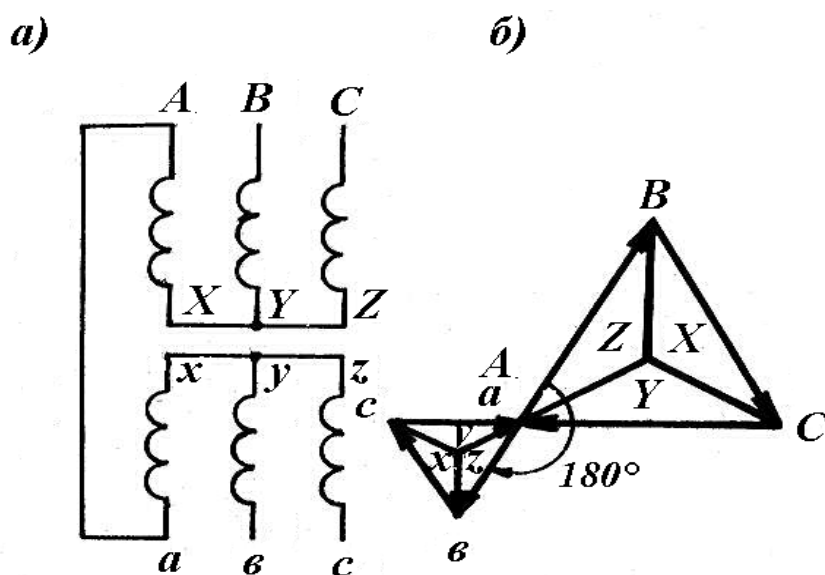


Рисунок 2.22 – Схема сполучення $Y/Y-6$ (а) та векторно-потенційна діаграма (б) цього сполучення

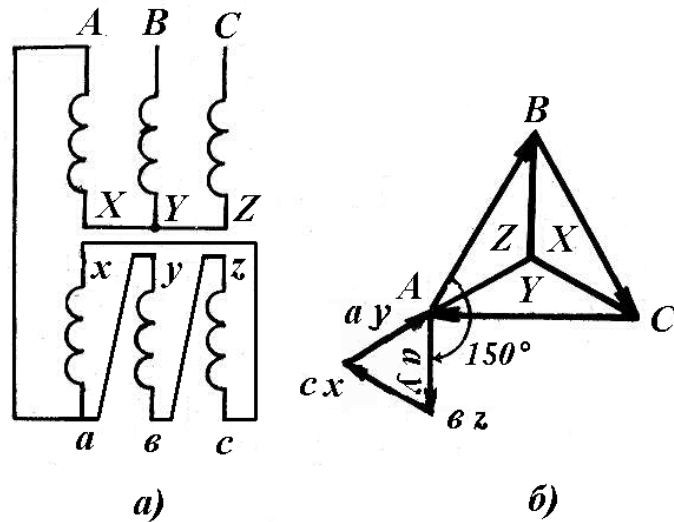


Рисунок 2.23 – Схема сполучення обмоток Y/Δ-5 (а)
та відповідна векторно-потенційна діаграма (б)

Як уже відзначалось, зміна назви затискачів обмотки, чи напрямку намотки, призведе до повороту фазного вектора даної обмотки ЕРС на кут 180^0 , а отже, щоб з нульової групи отримати шосту, а з одинадцятої – п'яту, необхідно змінити назву затискачів обмотки НН *a* на *x*, *в* на *y*, *с* на *z* і навпаки (рис. 2.22 та 2.23).

Розглянуті вище групи отримують не змінюючи назву затискачів між стрижнями, тому ці чотири групи сполучення називають *основними*. Якщо ж змінювати назви затискачів між стрижнями, можна отримати решту груп, які називають *похідними*.

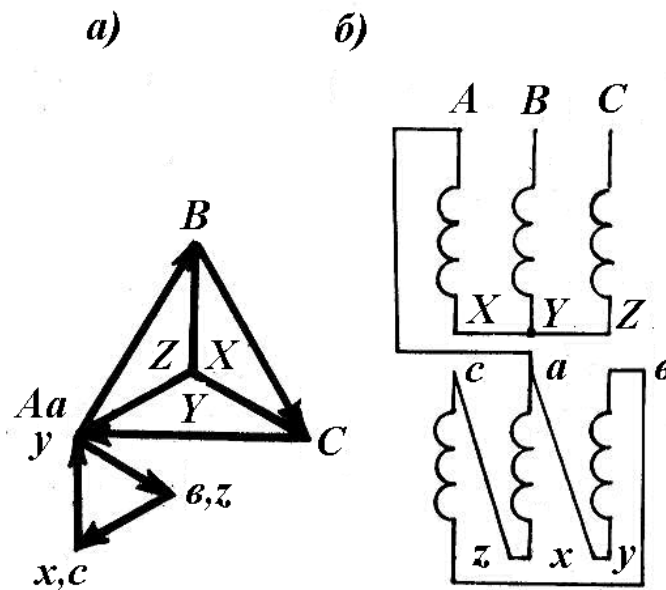


Рисунок 2.24 – Векторно-потенційна діаграма (а) та схема сполучення обмоток Y/Δ-3 (б) трифазного трансформатора

Розглянуті вище групи отримують не змінюючи назву затискачів між стрижнями, тому ці чотири групи сполучення називають *основними*. Якщо ж змінювати назви затискачів між стрижнями, можна отримати решту груп, які називають *похідними*.

Розглянемо принцип побудови похідної групи. Наприклад, необхідно з'єднати трансформатор за третьою групою. Оскільки група 3 непарна, то схеми сполучення обмоток ВН та НН повинні бути різні, $Y/\Delta-3$, або $\Delta/Y-3$. Щоб провести з'єднання затискачів обмоток, спершу будують векторно-потенційну діаграму (рис. 2.24, а), на якій E_{ab} відкладають під кутом $3 \times 30^\circ = 90^\circ$ до вектора E_{AB} , тобто повертають трикутник abc за годинниковою стрілкою, відносно трикутника ABC , на кут 90° . Внаслідок такого повороту фазні вектори ЕРС обмотки НН стали паралельними фазним векторам обмотки ВН інших фаз: зокрема, вектор E_{ax} паралельний вектору E_{BY} ; $E_{by} - E_{CZ}$; $E_{cz} - E_{AX}$. На (рис. 2.24, б), відповідно до цього позначені і з'єднані затискачі обмотки НН. Аналогічно роблять і при схемі $\Delta/Y-3$ (рис. 2.25).

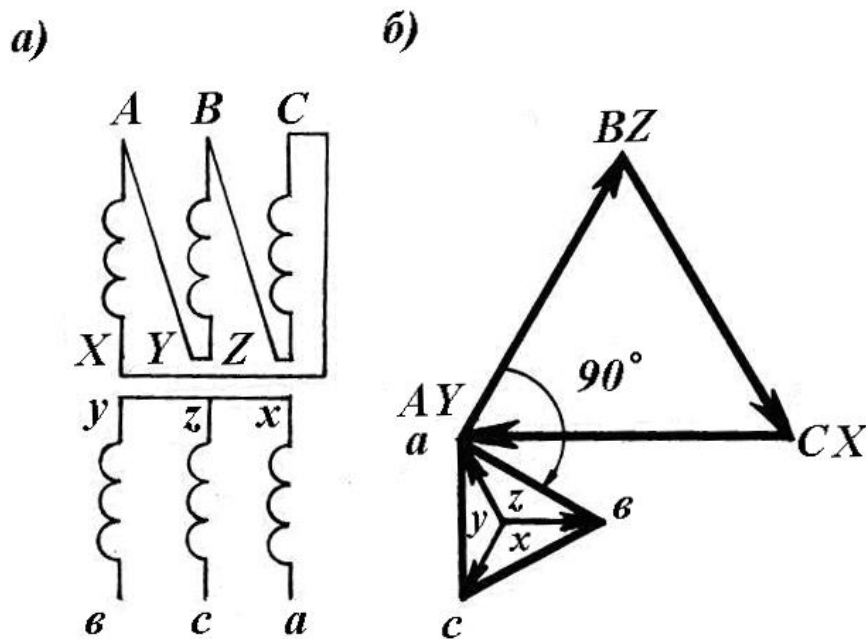


Рисунок 2.25 – Схема сполучення обмоток $\Delta/Y-3$ (а) та векторно-потенційна діаграма (б) трифазного трансформатора

Основні групи переважають стосовно похідних, оскільки передбачають однойменне маркування затискачів обмоток, що розташовані на одному стрижні, а це, в свою чергу, зменшує вірогідність помилки при з'єднанні схеми. Варто також відзначити, що на групу з'єднання зважають лише при паралельній роботі трансформаторів.

Паралельною називають таку роботу двох чи більше трансформаторів, коли їх вторинні обмотки увімкнені на спільне навантаження, при цьому первинні обмотки можуть живитись як з однієї мережі (рис. 2.26, а), так і з різних (рис. 2.26, б).

Необхідність в паралельній роботі трансформаторів виникає в таких випадках:

- потужність навантаження більша від потужності одного трансформатора;
- споживач першої категорії, що не допускає перерви в електропостачанні, якщо така перерва пов'язана з виробничим браком;
- різке коливання навантаження протягом часу дозволяє вимкнути кілька паралельно-працюючих трансформаторів при зниженні навантаження, і тим самим підвищити експлуатаційні показники решти;
- коли необхідно вивести на поточний ремонт чи профілактику трансформатор, наприклад, дільничної підстанції, без перерви в електропостачанні дільниці.

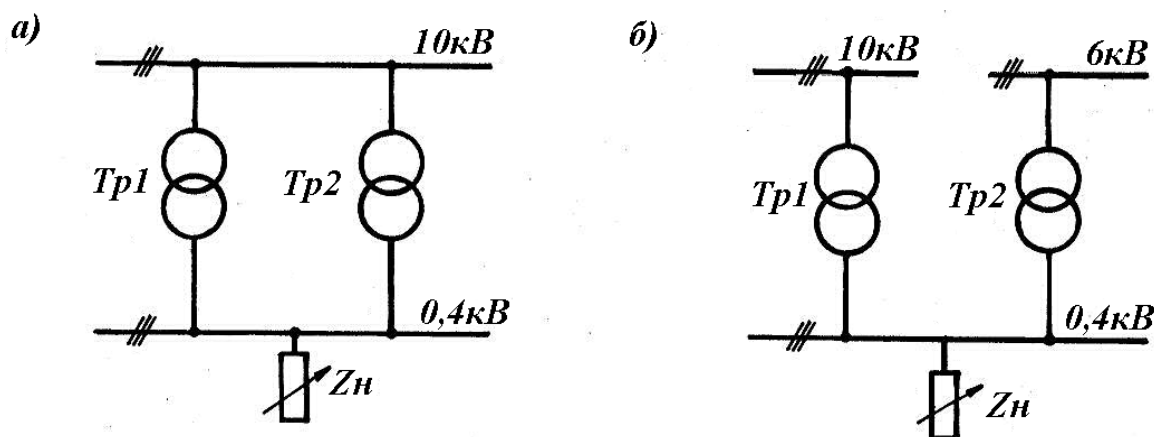


Рисунок 2.26 – Схеми паралельної роботи трифазних трансформаторів з однією мережею живлення (а), та з двома (б)

Увімкнути трансформатори на паралельну роботу можна лише в разі дотримання певних умов.

По-перше, вторинні напруги паралельно-працюючих трансформаторів повинні бути однакові; якщо у них однакові і первинні напруги (рис. 2.26, а), то повинні бути рівні коефіцієнти трансформації: $K_I = K_{II} = K_n$.

По-друге, напруги КЗ трансформаторів, що працюють паралельно, повинні бути рівними: $u_{kI} = u_{kII} = u_{kn}$.

По-третє, паралельно-працюючі трансформатори повинні мати ідентичні

схеми та групи з'єднання обмоток.

Крім цього, потужності трансформаторів, що вмикаються на паралельну роботу, не повинні відрізнятись більше ніж у три рази. Перед вмиканням трансформаторів на паралельну роботу їх обмотки повинні бути сфазовані, що означає увімкнення однойменних затискачів усіх паралельно–працюючих трансформаторів лише на «свою» шину.

Якщо на паралельну роботу увімкнено два чи більше трансформаторів з ідеально виконаними умовами паралельної роботи, то навантаження між ними розподілиться пропорційно до їхніх потужностей.

Практично підібрати кілька трансформаторів, які б ідеально підходили для паралельної роботи, досить складно, тому допускаються деякі відхилення від перерахованих вище умов.

Паралельна робота двох трансформаторів при різних коефіцієнтах трансформації.

Допускається паралельна робота трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації, якщо

$$\Delta K = (K_I - K_{II}) \cdot 100 / \sqrt{K_I - K_{II}} \leq 0,5\% , \quad (2.69)$$

нерівність між коефіцієнтами трансформації ΔK не перевищує 0,5 % від їх середньгеометричного значення $\sqrt{K_I - K_{II}}$.

Таке незначне розходження між коефіцієнтами трансформації, яке допускається, пояснюється тим, що в цьому випадку, навіть в режимі холостого ходу, між трансформаторами, що увімкнені паралельно, виникає зрівнювальний струм, зумовлений різницею вторинних напруг.

$$\Delta U = /U_1/K_I - U_1/K_{II} , \quad (2.70)$$

$$I_{зр} = \Delta U / (Z_{kI} + Z_{kII}) , \quad (2.71)$$

де Z_k, Z_{kII} – опори КЗ відповідно до першого та другого трансформаторів.

Зрівнювальний струм буде співпадати зі струмом навантаження того трансформатора, у якого менший коефіцієнт трансформації, перевантажуючи його, і розвантажуючи трансформатор з більшим коефіцієнтом трансформації. Враховуючи, що перевантаження трансформатора неприпустиме, необхідно знижувати загальну потужність навантаження.

Паралельна робота трансформаторів з різними напругами КЗ. Така робота допускається лише тоді, коли різниця між напругами КЗ не перевищує 10 % від їхнього середньоарифметичного значення:

$$\Delta U_k = (U_{kI} - U_{kII}) \cdot 100 / U_{кор} \leq 10\% \quad (2.72)$$

де $U_{кор} = (U_{кI} + U_{кII})/2$ – середньоарифметичне значення напруг КЗ.

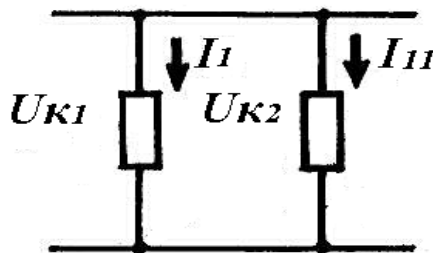


Рисунок 2.27 – До поняття розподілу струмів при паралельній роботі трансформаторів з різними напругами КЗ

Напругу КЗ трансформатора можна розглядати, як опір трансформатора у відносних одиницях, тому схему заміщення паралельної роботи трансформаторів можна зобразити у вигляді паралельно увімкнених опорів, (рис. 2.27). Отже, струм навантаження буде більшим через трансформатор, у якого менший опір, тобто напруга КЗ.

Виходячи з цього, навантаження при різних напругах КЗ розподіляється обернено пропорційно щодо напруг КЗ паралельно увімкнених трансформаторів за такою формулою:

$$S_i = S_{заг} S_{номі} / U_{ki} \sum (S_{номі} / U_{ki}), \quad (2.73)$$

де S_i – навантаження i -того трансформатора; $S_{заг}$ – загальне навантаження трансформаторів; $S_{номі}$, U_{ki} – номінальна потужність та напруга КЗ i -того трансформатора.

У виразі (2.73)

$$\sum (S_{номі} / U_{ki}) = (S_{номI} / U_{кI}) + (S_{номII} / U_{кII}) + \dots \quad (2.74)$$

Паралельна робота трансформаторів при різних схемах та групах сполучення.

Така робота не допускається, тому що зрівняльні струми, які виникають через фазовий зсув вторинних напруг, досить значні – такі, що іноді перевищують струми аварійних КЗ відповідно до (2.71).

$$\Delta U = 2U_{2\phi} \sin(\alpha/2), \quad (2.75)$$

При цьому де α – кут зсуву між фазними вторинними напругами (рис. 2.28).

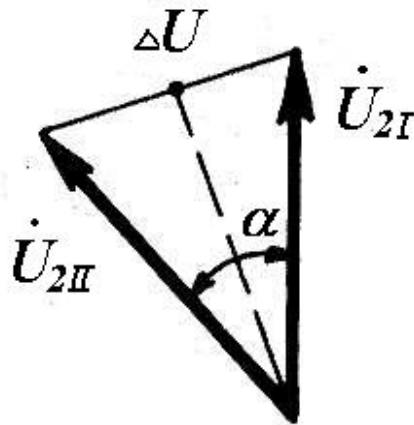


Рисунок 2.28 – До визначення ΔU при різних групах з'єднання обмоток

Якщо потужності трансформаторів відрізняються більше ніж у 3 рази, то паралельна робота між ними не має сенсу, тому що трансформатор меншої потужності, маючи менше значення напруги КЗ, може виявитись майже вдвічі перевантаженим і на величину його потужності слід буде знизити загальне навантаження.

2.5 Вищі гармоніки струму, потоку та ЕРС

Як уже зазначалося вище, основний магнітний потік створюється у трансформаторі намагнічуючим струмом, що протікає по первинній обмотці. При трансформуванні трифазного струму трансформаторною групою намагнічуючи струми в кожній фазі будуть однакові і симетричні, тобто, зсунуті на кут в 120° . Однак, використання трифазних груп нераціонально через значні габарити, велику вагу і підвищену вартість, тому їх застосовують лише при значних потужностях, щоб знизити вагу і габарити одиниці обладнання, що важливо при транспортуванні і монтажу трансформаторів. Більш поширене використання трифазних трансформаторів з розташованими трьома стрижнями осердя в одній площині і з'єднаними двома ярмами (рис. 2.29, а).

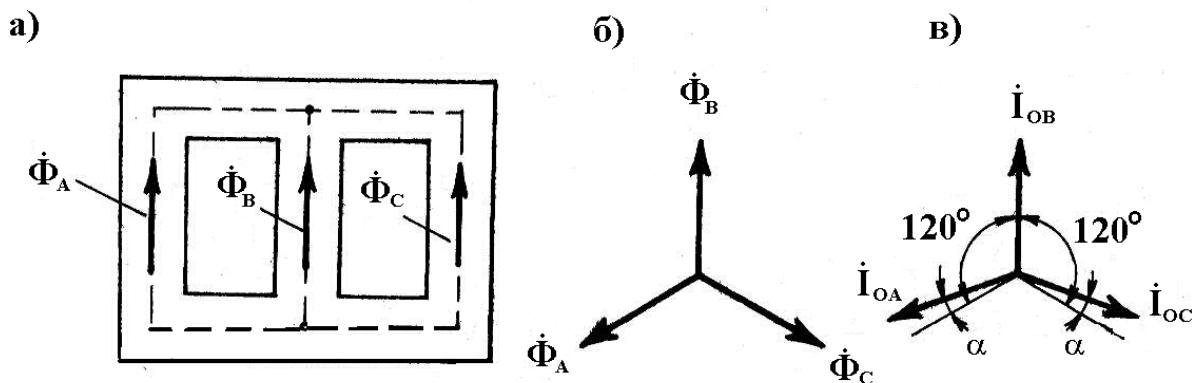


Рисунок 2.29 – Тристрижневий магнітопровід (а), векторні діаграми потоків (б) і намагнічуючих струмів (в)

Оскільки до первинної обмотки підведена симетрична система напруг U_A , U_B , U_C , то, відповідно, магнітні потоки Φ_A , Φ_B , Φ_C також створюють симетричну систему (рис. 2.29, б). Але через те що магнітна система несиметрична, намагнічуючі струми в крайніх фазах I_{OA} і I_{OC} будуть більшими ніж в середній I_{OB} , а отже, матимуть зсув по фазі відносно власних потоків на кут α . Тобто, при використанні трифазного трансформатора, симетрична система напруг спричиняє в обмотках несиметричну систему струмів XX (рис. 2.29, в).

Для зниження магнітної несиметричності тристрижневого осердя, тобто зниження магнітного опору крайніх фаз, переріз ярем виконують на 10...15 % більшим, ніж стрижнів. Варто зазначити, що несиметричність намагнічувальних струмів, практично, не впливає на роботу трансформатора, тому що, навіть, при незначному навантаженні, різниця між струмами I_A , I_B , та I_C непомітна.

Потрібно також зазначити, що синусоїдальна напруга, підведена до обмотки, викликає такий же синусоїдальний потік, але так як магнітна система при цьому насичується, то намагнічуючий струм стає несинусоїдним. Для визначення форми кривої цього струму $i_{op} = f(t)$ користуються кривою намагнічування сталі $\varphi_0 = f(i_{op})$ та графіком зміни потоку $\varphi_0 = f(t)$ (рис. 2.30). В першому квадраті зображується крива намагнічування, тобто залежність $\varphi_0 = f(i_{op})$, а в другому – зміна потоку в часі $\varphi_0 = f(t)$, яку розділяють на чотири (в даному разі) ділянки. Переносячи точки 1...4 на криву намагнічування, а з неї – у четвертий квадрат, отримують графік зміни $i_{op} = f(t)$.

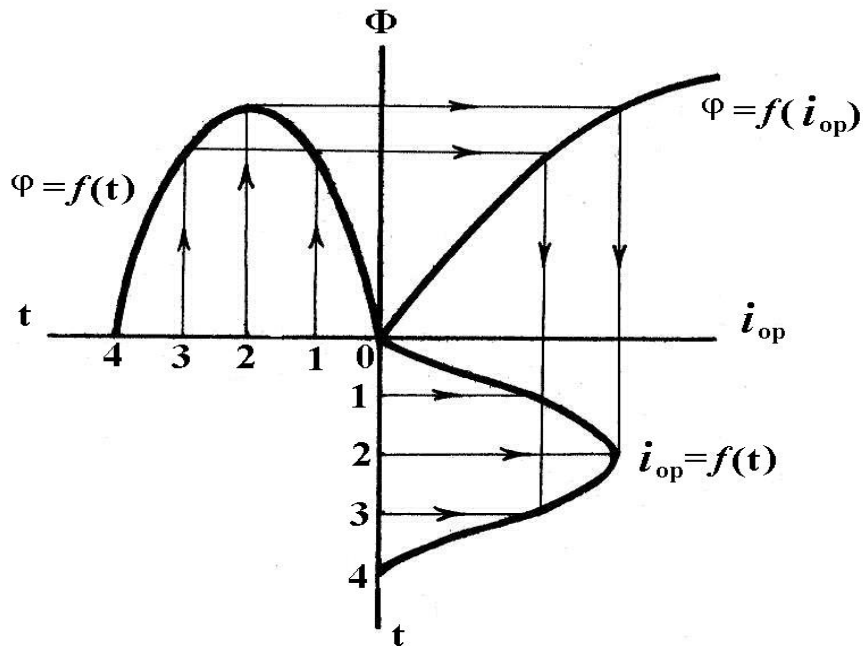


Рисунок 2.30 – Побудова графіка намагнічуючого струму

Отриманий намагнічуючий струм має загострену форму, тому при розкладанні в гармонійний ряд в його кривій будуть присутні гармоніки кратні трьом 3 математики відомо, що будь-яку криву, яка періодично змінюється, можна представити як суму синусоїд (гармонік), перша з яких має частоту таку, як і частота несинусоїдної кривої, а наступні (вищі) – в порядковий номер більшу. Так, якщо перша гармоніка має $f_1 = 50$ Гц то, наприклад, третя – $f_3 = (50 \times 3) = 150$ Гц. Залежно від насичення сталі зростає і амплітуда вищих гармонік, так у магнітопроводі трансформатора з високолегованої сталі при індукції $B = 1,4$ Тл амплітуда третьої гармоніки складає близько 30 % від амплітуди першої. Несинусоїдність стосується лише реактивної частини струму ХХ, його активна частина лишається синусоїдальною, але (зважаючи на незначну долю активного струму, не більше 10 %) можна увесь струм ХХ уважати несинусоїдним.

Із визначення вищих гармонік впливає, що миттєві значення струмів третьої гармоніки в трифазній системі будь-якої миті співпадають по фазі:

$$\begin{cases} i_{A3} = I_{3\max} \sin 3\omega t \\ i_{B3} = I_{3\max} \sin 3(\omega t - 120^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t \\ i_{C3} = I_{3\max} \sin 3(\omega t - 240^\circ) = I_{3\max} \sin 3\omega t \end{cases} \quad (2.76)$$

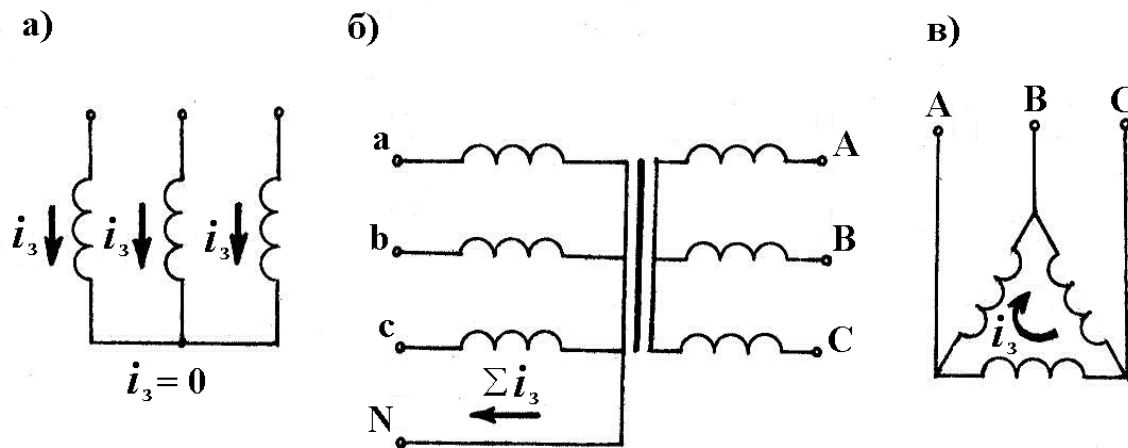


Рисунок 2.31 – Напрямок струмів третьої гармоніки при різних схемах

Сполучення Y/Y_n . Якщо первинна обмотка з'єднана за схемою Y без нульового проводу, то струми гармонік, кратних трьом, співпадаючи по фазі в кожній із фаз, в сумі складають нуль, що пояснюється відсутністю виходу струмів третьої гармоніки із нульової точки (рис. 2.31, а).

В результаті цього намагнічуючий струм виявиться синусоїдальним, а магнітний потік в осерді трансформатора навпаки – несинусоїдним, (рис. 2.32).

Основний магнітний потік в цьому випадку має приплюснуту форму з явно вираженим потоком третьої гармоніки Φ_3 . Ці потоки фази не можуть замикатись в тристрижневому осерді (як і струми третьої гармоніки при сполученні Y), оскільки спрямовані в кожному стрижні будь-якої миті в один і той самий бік. Отже, вони замикаються через повітря, чи масло, і металеві стінки баку, що суттєво зменшує їхню величину і значення відповідних ЕРС в обмотках. На практиці Φ_3 враховують лише з точки зору втрат від вихрових струмів, що індукуються цими потоками в стінках бака.

Якщо за схемою Y з'єднана трансформаторна група, то магнітні потоки третьої гармоніки замикаються кожен в своєму магнітопроводі, тому $\Phi_3 \approx 15 \div 20\%$ від Φ_1 . Ці потоки наводять у фазах несинусоїдні ЕРС:

$$e = e_1 + e_3, \quad (2.77)$$

де e_1 та e_3 – миттєві значення ЕРС першої та третьої гармонік відповідно.

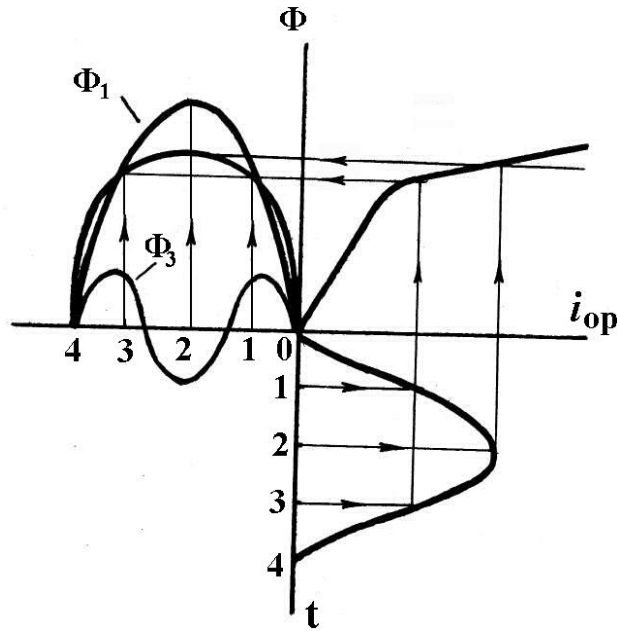


Рисунок 2.32 – Побудова графіка магнітного потоку при синусоїдальному струмі

Варто зазначити, що амплітуда ЕРС третьої гармоніки досить висока і може становити 45...65 % від амплітуди основної гармоніки. Це спричиняє значне зростання амплітуди фазної ЕРС і, як наслідок, до необхідності зміцнення ізоляції фаз.

Щодо лінійних ЕРС третіх гармонік, то враховуючи, що вони є різницею двох фазних і збігу останніх в часі, їх величина дорівнює нулю:

$$E_{3AB} = E_{3A} - E_{3B} = 0 \quad (2.78)$$

Якщо первинна обмотка трифазного трансформатора з'єднана за схемою Y_0 (рис. 2.31, б), то струми гармонік, кратних трьом, будуть протікати у фазах і виходити через нульовий провід. При цьому магнітний потік, а отже, і ЕРС у фазах будуть синусоїдальними.

Сполучення Y/Δ чи Δ/Y . Застосовується при сполученнях, коли одна із сторін (НН чи ВН) з'єднана в трикутник невадало, що спостерігається, коли первинні обмотки з'єднані зіркою, відсутні.

Припустимо, що в трикутник з'єднані первинні обмотки трансформатора. У цьому випадку струми третьої гармоніки вільно замикаються в замкненому контурі фазних обмоток, з'єднаних у трикутник (рис. 2.3, в). Наявність третьої гармоніки в намагнічувальному струмі, виключає її з магнітного потоку, і ЕРС фаз будуть синусоїдними.

Якщо ж у трикутник з'єднані вторинні обмотки, а первинні – у зірку без нульового проводу, то магнітні потоки третьої гармоніки наведуть відповідні ЕРС у вторинній обмотці. Струми третьої гармоніки, що будуть замикатися в трикутнику, створять свої магнітні потоки Φ_{23} , що, згідно з правилом Ленца, будуть спрямовані в осерді назустріч потокам, створеним струмами первинних обмоток Φ_{13} . У підсумку, результуючий потік третьої гармоніки, $\Phi_{pe} = \Phi_{13} + \Phi_{23}$ буде значно ослаблений і, практично, не впливатиме на властивості трансформатора.

2.6 Перехідні процеси в трансформаторах

Перехідні процеси виникають у трансформаторах за будь-якої зміни режиму їх роботи: вмикання трансформатора у мережу, різка зміна навантаження, коротке замикання в первинній або вторинній мережах, хвильові процеси в лінії, яка живить трансформатор, та інші випадки. При перехідних процесах в обмотках трансформатора виникають додаткові електромагнітні явища, які необхідно враховувати при проектуванні та експлуатації трансформаторів.

Вмикання трансформатора без навантаження, коли його вторинна обмотка розімкнена (рис. 2.33). За другим законом Кірхгофа для замкнутого контуру, який містить первинну обмотку, отримаємо: $U_1 + e_1 = i_1 R_1$, де $u = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{u1})$ – підведена напруга, яка змінюється у часі за синусоїдним законом з коловою частотою ω , початковою фазою ψ_{u1} і амплітудою U_{1m} , $e_1 = -w_1(d\Phi/dt)$ – ЕРС, яка індукується в первинній обмотці при зміні потоку Φ ; (i_1 , – перехідний струм в первинній обмотці, R_1 , w_1 , – активний опір і кількість витків первинної обмотки).

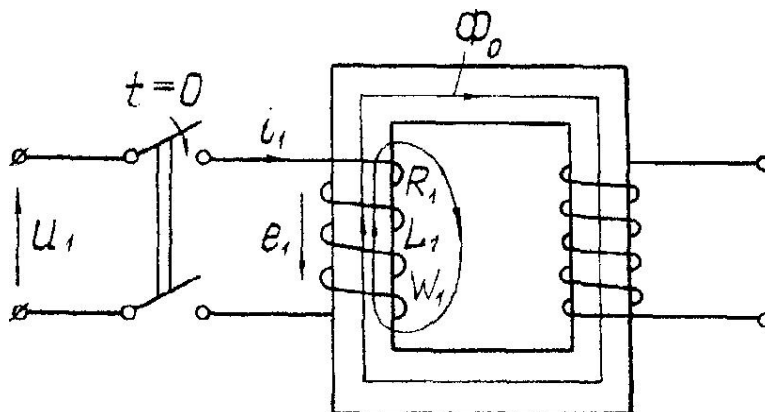


Рисунок 2.33 – Підключення до мережі однофазного не навантаженого трансформатора

Тоді рівняння перехідного процесу набуде такого вигляду:

$$w_1 \frac{d\Phi}{dt} + i_1 R_1 = U_{1m} \sin(\omega t + \Psi_{u1}) \omega \quad (2.79)$$

або

$$\frac{d\Phi}{dt} + \frac{\Phi}{L_1} R_1 = \frac{U_{1m}}{w_1} \sin(\omega t + \Psi_{u1}) \omega \quad (2.80)$$

де $L_1 = w_1 \Phi / i_1$ – індуктивність первинної обмотки трансформатора, яка є нелінійною, бо вона залежить від струму в обмотці.

Розв'яжемо останнє рівняння перехідного процесу наближено, приймаючи, що $L_1 = \text{const}$. Тоді воно переходить з нелінійного в лінійне і його розв'язок виражається сумою усталеного Φ_y і вільного Φ_v потоків, тобто $\Phi = \Phi_y + \Phi_v$.

Усталений потік

$$\Phi_y = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi),$$

де амплітуда $\Phi_m = \frac{L_1 U_{1m}}{w_1 \sqrt{R_1^2 + (\omega L_1)^2}}$, $\varphi = \arctg \frac{\omega L_1}{R_1}$.

Вільний потік

$$\Phi_v = C e^{-\frac{R_1}{L_1} t},$$

де C – стала інтегрування, яка визначається з початкових умов.

Отже,

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi) + C e^{-\frac{R_1}{L_1} t}.$$

При $t = 0$ результативний потік дорівнює залишковому Φ_z , тобто

$$\Phi_z = \Phi_m \sin(\psi_{u1} - \varphi) + C,$$

звідки стала інтегрування

$$C = \Phi_z - \Phi_m \sin(\psi_{u1} - \varphi).$$

Остаточно розв'язок набуває такого вигляду:

$$\Phi = \Phi_m \sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi) + [\Phi_3 - \Phi_m \sin(\psi_{u1} - \varphi)] \cdot e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}. \quad (2.81)$$

Найважчий перехідний процес буде за умови

$$\psi_{u1} - \varphi = -\pi/2.$$

Тоді

$$\Phi = \Phi_m \cos \omega t + (\Phi_3 + \Phi_m) e^{-\frac{R_1 t}{L_1}}.$$

Потік Φ досягає максимального значення приблизно через півперіоду після вмикання, тобто при $\omega t \cong \pi$ (рис. 2.34).

$$\Phi_{\text{макс}} \cong \Phi + (\Phi_3 + \Phi_m) e^{-\frac{R_1 \pi}{\omega L_1}}.$$

Зазвичай $R < \omega L_1 \dots i e^{-\frac{R_1 \pi}{\omega L_1}} \approx 1$. В окремих випадках залишковий потік може досягати половини амплітуди усталеного потоку, тобто $\Phi_3 \approx 0,5 \Phi_m$. Тоді $\Phi_{\text{макс}} \approx 2,5 \Phi_m$.

За допомогою кривої намагнічування трансформатора можна перейти від миттєвих значень різниці магнітних потоків $\Phi - \Phi_3$ до миттєвих значень струму і отримати графічним способом залежність струму вмикання i_1 від часу (рис. 2.35).

При вмиканні насиченого трансформатора стрибок струму вмикання $I_{\text{вм}}$ може в 100 і більше разів перевищити нормальне значення струму намагнічування $I_{0\text{м}}$, тобто у деяких випадках перевищує номінальне значення струму обмотки.

У трансформаторах малої потужності перехідний процес при вмиканні протікає швидше і пов'язаний з меншими стрибками струму. Для обмеження пускових струмів трансформаторів великої потужності використовуються пускові опори, які на час пуску вмикаються послідовно з трансформаторами, а після пуску – шунтуються.

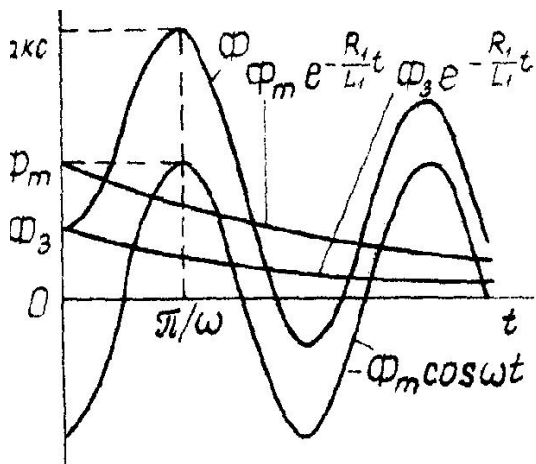


Рисунок 2.34 – Перехідний процес при вмиканні ненавантаженого трансформатора

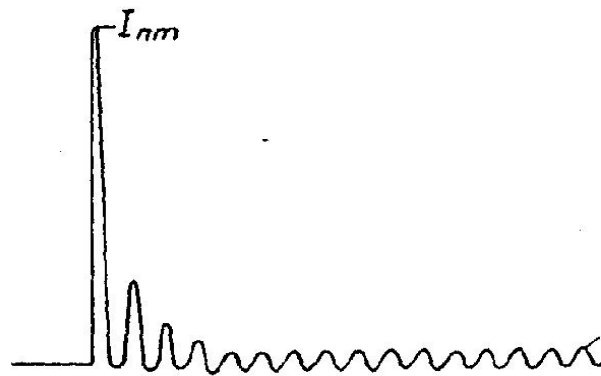


Рисунок 2.35 – Осцилограма струму вмикання насиченого трансформатора

Під час вмикання трифазного трансформатора перехідні процеси в окремих фазах протікають по-різному, бо магнітні потоки фаз зміщені між собою на 120° . В умовах експлуатації струми вмикання трансформатора враховують головним чином при регулюванні апаратури захисту.

Перехідний процес в трансформаторі при короткому замиканні на затискачах вторинної обмотки. Аварійний режим короткого замикання виникає при пошкодженні електричної мережі, несправності апаратів та інших пристроїв у вторинному колі, помилкових діях обслуговуючого персоналу тощо. Великі струми, які виникають у трансформаторі при короткому замиканні, можуть викликати механічні пошкодження обмоток або різке підвищення його температури, що загрожує цілості ізоляції.

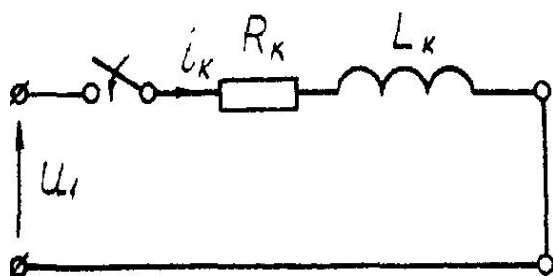


Рисунок 2.36 – Спрощена схема для аналізу короткого замикання трансформатора

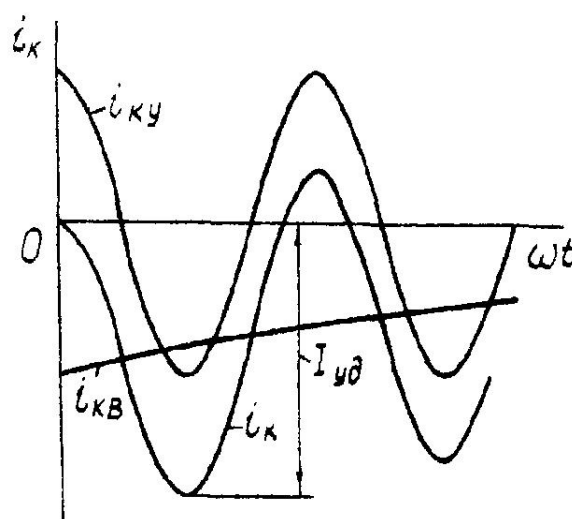


Рисунок 2.37 – Струм короткого замикання трансформатора

Для спрощеної заступної схеми трансформатора (рис. 2.36) у випадку синусоїдної напруги $u_1 = U_1 m \sin(\omega t + \psi_{u1})$ отримаємо рівняння перехідного процесу:

$$L_k \frac{di_k}{dt} + R_k i_k = U_{1m} \sin(\omega t + \psi_{U1}); i_k = i_{ky} + i_{ke}, \quad (2.82)$$

де i_{ky} і i_{ke} – усталена і вільна складові струму короткого замикання.

З теоретичної електротехніки відомо, що

$$i_{ky} = I_{kym} \sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi_k) = I_{ky} \sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi_k),$$

де

$$I_{ky} = U_1 / \sqrt{R_k^2 + \omega^2 L_k^2}, \quad \varphi_k = \arctg(\omega L_k / R_k); \quad I_{ke} = C e^{(R_k/L_k)t}, \quad (2.83)$$

C – стала інтегрування, яку визначаємо з умови, що при $t = 0$ $i_k = 0$;

$$\sqrt{2} I_{ky} \sin(\psi_{u1} - \varphi_k) + C = 0,$$

Звідки

$$C = -\sqrt{2} I_{ky} \sin(\psi_{u1} - \varphi_k).$$

Тоді

$$i_k = \sqrt{2} I_{ky} \left[\sin(\omega t + \psi_{u1} - \varphi_k) - \sin(\psi_{u1} - \varphi_k) e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \right].$$

Найнебезпечніший режим буде при $\psi_{u1} = \pi/2 + \varphi_k$, коли струм короткого замикання (рис. 3.23)

$$i_{ky} = \sqrt{2} I_{ky} \left[\cos \omega t - e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \right].$$

Його максимальне значення настає приблизно через півперіоду $\omega t \cong \pi$:

$$I_{y\delta} = \sqrt{2} I_{ky} \left[1 + e^{-\frac{R_k}{L_k} t} \right],$$

де $X_k = \omega L_k$, $I_{ky} = 100 I_H / u_k^*$, u_k^* – напруга короткого замикання трансформатора, %.

Величину $I_{y\delta}$ називають ударним струмом короткого замикання, а відношення

$$K_{y\delta} = I_{y\delta} / (\sqrt{2}I_{ky}) = 1 + e^{-\frac{R_k t}{L_k}} - \text{ударним коефіцієнтом.}$$

У потужних трансформаторах $R_k/X_k \cong 1/10 \dots 1/15$, тому $K_{y\delta} = 1,7 + 1,8$. У трансформаторах середньої потужності $K_{y\delta} = 1,2 \dots 1,3$. У трансформаторах малої потужності перехідним процесом нехтують, бо $R_k > X_k$.

3 АСИНХРОННІ МАШИНИ

3.1 Принцип дії та конструкція асинхронних машин

Принцип дії асинхронного двигуна базується на взаємодії струму з магнітним полем, може бути поясненим за допомогою макета, який складається з електропровідного диска та підковоподібного магніта (рис. 3.1).

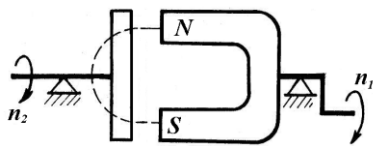


Рисунок 3.1 – Макет асинхронного двигуна

Диск і магніт закріплені так, що можуть вільно обертатись. Якщо обернути підковоподібний магніт з частотою обертання n_1 , то його поле, перетинаючи електропровідний диск, індукуює в ньому ЕРС та струм. Взаємодія струму з полем приведе до появи електромагнітних сил (рис. 3.2), які будуть обертати диск в тому ж напрямі, в якому

обертається магніт, але з меншою частотою обертання n_2 . Дійсно, як тільки частота обертання n_2 стає, з якоїсь причини, рівною n_1 – диск обертається синхронно з магнітом, магнітне поле перестає індукувати в диску ЕРС і струми (отже, зникають електромагнітні сили, що обертають диск), тому останній почне гальмуватись і n_2 стане меншою від n_1 .

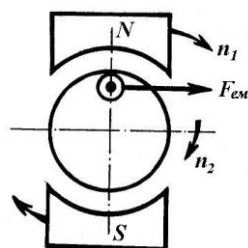


Рисунок 3.2 – До визначення напрямку обертання асинхронного двигуна

Визначаючи напрям обертання ротора асинхронного двигуна, користуються правилами правої (визначають напрям ЕРС 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. 3.2) 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 ЕРС

та струми в замкненій обмотці ротора, що й приводить до появи електромагнітного моменту і обертання ротора.

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

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} \quad (3.1)$$

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

$$S = \frac{(n_1 - n_2)100}{n_1} [\%] \quad (3.2)$$

Статор машини має 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, 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 із 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. 3.3).

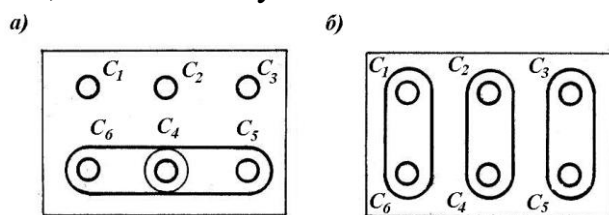


Рисунок 3.3 – Розташування кінців статорних обмоток та сполучення їх в зірку (а) та трикутник (б) в клемній коробці

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, у які закладаються провідники обмотки статора.

Обмотка виготовляється 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 *грушовату форму* для машин потужністю до 100 Вт і *прямокутну* форму для машин більшої потужності (рис. 3.4).

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

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

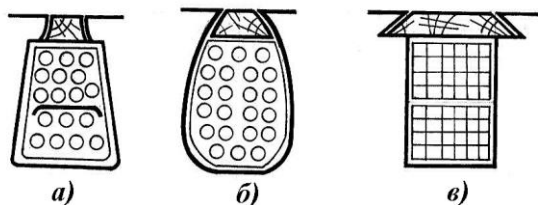


Рисунок 3.4 – Пази статора машини змінного струму трапецоїдний (а), грушоватий (б) та прямокутний (в)

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 (котушок), які вкладають в прямокутні пази (рис. 3.4, в).

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

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

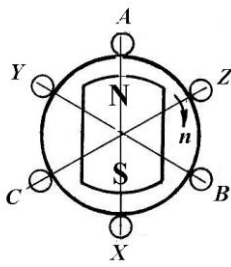


Рисунок 3.9 – До пояснення принципу утворення трифазної обмотки

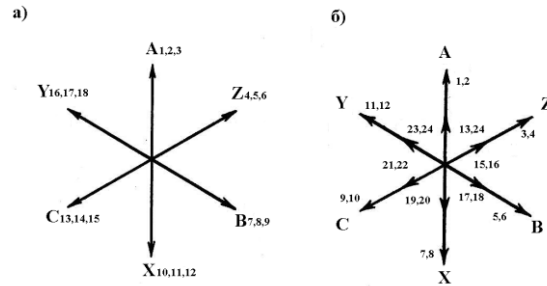


Рисунок 3.10 – Зірки пазових ЕРС трифазних обмоток $2p = 2; q = 3$ (а) та $2p = 4; q = 2$ (б)

На поперечному розрізі статора трифазної двополюсної машини зі скупченою обмоткою (рис. 3.9) показані обмотки трьох фаз, початки яких (А, В, С) мають зсув у просторі осердя на 120° .

При положенні ротора, зображеному на (рис. 3.9), максимальна ЕРС індукується у фазі А. Максимальна ЕРС такого ж напрямку створиться в фазі В через проміжок часу, що відповідає повороту ротора на кут 120° . При повороті ротора ще на 120° максимальна ЕРС буде створюватись у фазі С. Отже, при такому розміщенні обмоток в просторі статора, можна отримати необхідний зсув між ЕРС фаз у часі.

Із зазначеного 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. 3.10, а) зображена просторова зірка пазових ЕРС трифазної обмотки при $2p = 2$ і $q = 3$ з розбивкою пазів по зонах.

Якщо число пар полюсів машини більше одиниці, то зірку пазових ЕРС при розподілі пазів «обходять» p раз (рис. 3.10, б), і отримують шість p -зон. При $p > 1$ виникає необхідність ввести 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 валу, на який насаджено пакет заліза з пазами, у яких розміщена короткозамкнена обмотка. Така обмотка, її ще називають «більчина клітка», становить низку металевих (алюмінієвих чи мідних) стрижнів, розташованих в пазах осердя ротора, і замкнених з обох боків короткозамкненими кільцями (рис. 3.4). 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.

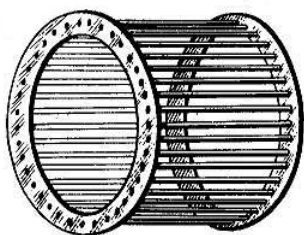


Рисунок 3.7 – Обмотка ротора «більчина клітка»

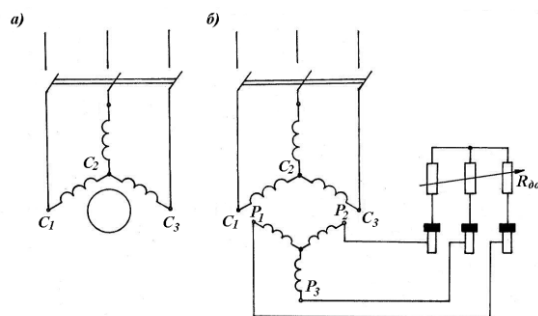


Рисунок 3.8 – Принципові схеми увімкнення трифазних асинхронних двигунів з короткозамкненим (а) і фазним (б) ротором

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. 3.8, 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 валу, 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 $R_{доd}$.

3.2 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 ЕРС та струми в обмотках ротора і статора, різні частоти струмів та ЕРС і різна кількість фаз на статорі та роторі – все це практично унеможлиблює 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). До того ж 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 ЕРС і струмів після зведення повинні залишитись такими самими, 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 такими співвідношеннями:

$$E_2' = E_2 k_\varepsilon \quad (3.3)$$

$$I_2' = I_2 / k_i \quad (3.4)$$

$$R_2' = R_2 k_r \quad (3.5)$$

$$X_2' = X_2 k_r \quad (3.6)$$

$$\frac{m_1 (W_1 k_{об1})^2}{m_2 (W_2 k_{об2})^2} = k_r \quad (3.7)$$

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

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 \\ \mathbf{0} = \dot{E}_1' - \dot{I}_2' R_2' / s - j\dot{I}_2' X_2' \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-I_2). \end{cases} \quad (3.8)$$

У рівнянні (3.8) 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 (3.8) можна легко привести до виду (2.15), якщо представити опір R_2'/s двома складовими частинами:

$$\frac{R_2'}{s} = R_2' + R_2' \frac{1-s}{s} \quad (3.9)$$

Враховуючи (3.9), рівняння ЕРС зведеної обмотки ротора виглядає, як

$$\dot{I}_2' R_2' \frac{1-s}{s} = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' R_2' - j \dot{I}_2' X_2'. \quad (3.10)$$

У такому вигляді рівняння ЕРС 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 $R_2'(1-s)/s$.

$$P_2' = m_1 I_2'^2 R_2'(1-s)/s \quad (3.11)$$

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 (3.8). 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. 3.9).

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 $I_2' R_2'$.

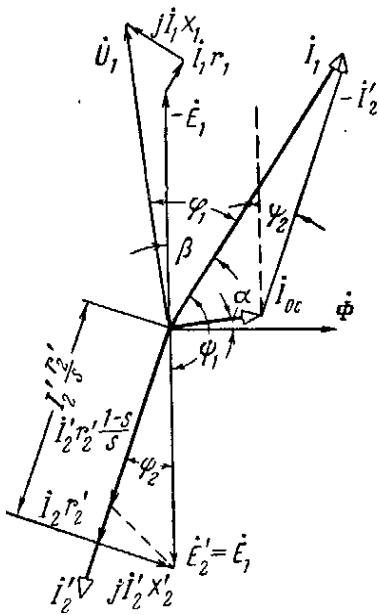


Рисунок 3.9 – Векторна діаграма асинхронного двигуна

Вектор ЕРС $\dot{E}_2' = \dot{E}_1'$ є результируючим вектором, що з'єднує початок координат з кінцем вектора $j\dot{I}_2'X_2'$. Магнітний потік Φ_0 , що відстає від намагнічуючого струму I_0 на кут магнітного запізнення α , в свою чергу, на прямий кут випереджає ЕРС, яку він створює. Побудувавши, з вже відомих векторів, рівняння струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2')$, отримаємо струм обмотки статора, за напрямом якого визначають напрями падіння напруги в колі обмотки статора і саму напругу \dot{U}_1 , прикладену до машини. Кути між величинами обмоток статора φ_1 та ротора ψ_2 отримують побудовою, проте кут зсуву струму \dot{I}_2' відносно ЕРС, що його створює, \dot{E}_2' може бути отриманий і аналітичним шляхом.

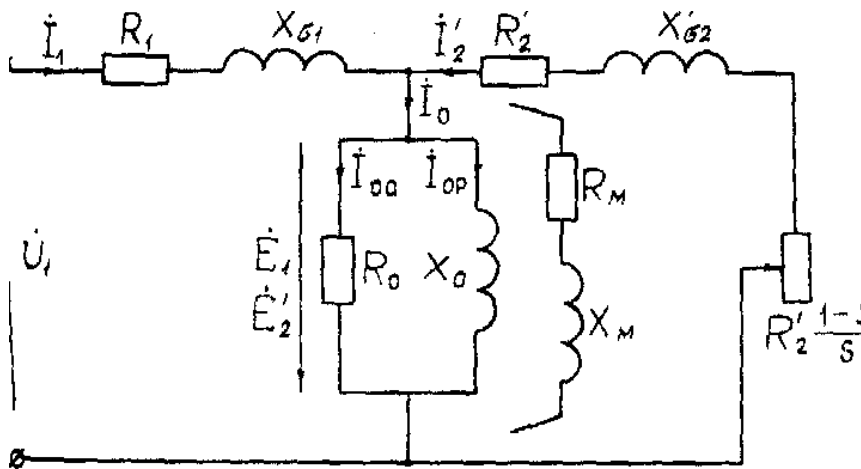


Рисунок 3.10 – Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

$$\psi_2 = \arctg(X_2's/R_2) \quad (3.12)$$

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. 3.10).

Таким чином, складання рівнянь ЕРС обмоток і струмів двигуна та зведення параметрів обмотки статора дало можливість, в кінцевому результаті, побудувати електричну схему заміщення асинхронного двигуна. У 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 Г-подібна схема заміщення дозволяє проаналізувати роботу двигуна у всьому діапазоні навантаження від ХХ до КЗ.

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 намагнічувальну гілку відмикали, нехтуючи незначним порівняно з номінальним намагнічувальним струмом. Аналогічно у схемі заміщення асинхронного двигуна діяти неможливо, тому що його намагнічувальний струм, враховуючи наявність в магнітній системі повітряного зазору та гіршу якість сталі, становить 20...50 % від номінального струму. Щоб намагнічувальний струм не став більшим, при винесенні намагнічувальної гілки на затискачі схеми заміщення послідовно з опорами намагнічувальної гілки вмикають опори обмотки статора R_1 та X_1 . Отримана таким чином схема (рис. 3.11) зручна тим, що має дві паралельні гілки: намагнічувальну зі струмом I_0 та робочу зі струмом $-I_2'$.

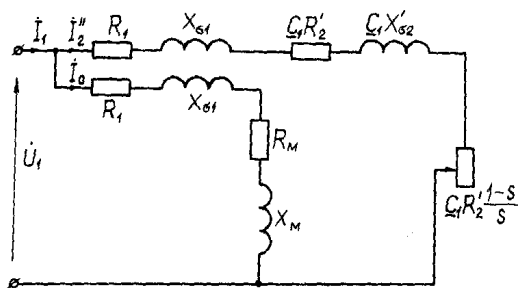


Рисунок 3.11 – Г-подібна схема заміщення асинхронного двигуна

Щоб винесення намагнічувальної гілки на затискачі схеми не порушувало співвідношень між величинами, вводиться коефіцієнт пропорційності опорів і струму ротора c_1 , який в машинах потужністю 3 кВт і більше становить 1,05...1,02, тому при практичних розрахунках приймається рівним одиниці. За Г-подібною схемою

визначається зведений струм обмотки ротора асинхронного двигуна:

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{[R_1 + R_2' + R_2'(1-s)/s]^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (3.13)$$

або з урахуванням (3.9) отримують

$$I_2' = \frac{U_1}{\sqrt{[R_1 + R_2'/s]^2 + (X_1 + X_2')^2}}, \quad (3.14)$$

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

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

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

$$M_{ем} = p m_2 W_2 k_{об} \Phi_{макс} I_2 \cos \psi_2 / \sqrt{2}, \quad (3.15)$$

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

$$M_{ем} = k_m \Phi I_2 \cos \psi_2 \quad (3.16)$$

Порівнюючи (3.16) та (1.13), легко переконатись, що походження електромагнітного моменту асинхронного двигуна та машини постійного струму однакова, оскільки добуток $I_2 \cos \psi_2$ є активною складовою струму ротора. Отримана формула, пояснюючи виникнення 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: $\Phi, I_2, \cos \psi_2$.

Отже, виводять іншу формулу, зважаючи на те, що

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

Підставивши визначений за схемою заміщення зведений струм I_2' (3.14) та

значення $\omega_1 = 2\pi f_1/p$, отримують формулу, у якій електромагнітний момент двигуна виражається через параметри схеми зміщення (рис. 3.11) та параметри мережі (U_1 і f_1):

$$M_{\text{ем}} = \frac{m_1 p U_1 R_2' / s}{2\pi f \left[(R_1 + R_2' / s)^2 + (X_1 + X_2')^2 \right]} \quad (3.17)$$

Враховуючи незмінність параметрів машини, електромагнітний момент, при $U_1 = \text{const}$, є лише функцією ковзання s , тому формула (3.17) зручна для побудови механічної характеристики машини $M_{\text{ем}} = f(s)$.

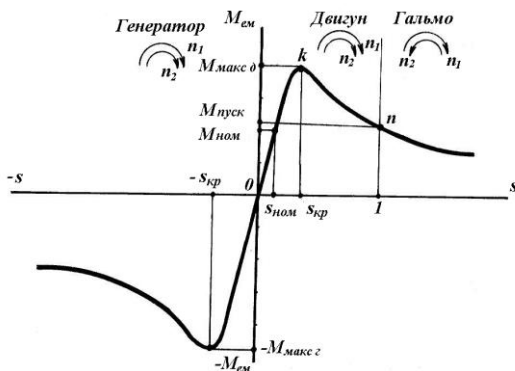
При малих ковзаннях ($s < 1$) в знаменнику (3.17) можна знехтувати всіма величинами, крім $(R_2' / s)^2$, тому

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

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

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

Звідси випливає, що при значних ковзаннях момент зворотно пропорційний ковзанню і крива $M_{\text{ем}} = f(s)$ є гіперболічною. При зміні ковзання в широких межах і $U_1 = \text{const}$ крива $M_{\text{ем}} = f(s)$ має такий вигляд (рис. 3.12).



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

$$s_{\text{кр}} = \pm R_2' / \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2} \quad (3.18)$$

Рисунок 3.12 – Залежність $M_{\text{ем}} = f(s)$ для асинхронної машини

Підставивши (3.18) в (3.17), отримають значення максимального моменту:

$$M_{\text{макс}} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 [\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + (X_1 + X_2')^2}]}$$
 (3.19)

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

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

$$s_{\text{кр}} \approx \pm R_2' / (X_1 + X_2')$$
 (3.20)

Аналогічно визначають і максимальний момент:

$$M_{\text{макс}} \approx \frac{m_1 p U_1^2}{4\pi f_1 (X_1 + X_2')}$$
 (3.21)

Варто зазначити, що згідно з (3.19) максимальний момент генераторного режиму дещо більший, ніж режиму двигуна ($M_{\text{макс } \delta} > M_{\text{макс } \epsilon}$).

Із виразу (3.17), підставивши значення $s = 1$, отримують формулу пускового моменту двигуна:

$$M_{\text{пуск}} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2'}{2\pi f_1 [(R_1 + R_2') + (X_1 + X_2')^2]}$$
 (3.22)

Здебільшого замість залежності $M_{em} = f(s)$ використовують залежність $n_2(s) = f(M_{em})$ (рис. 3.13).

На рисунках 3.12 та 3.13 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 призводить до зниження моменту двигуна, тому ця ділянка називається *ділянкою 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 $\lambda = 1,7 \dots 2,5$.

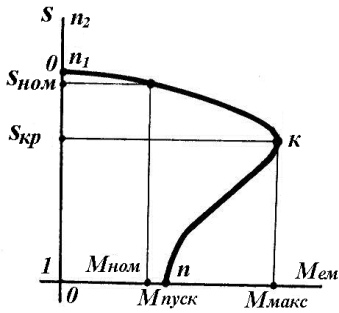


Рисунок 3.11 – Залежність частоти обертання (ковзання) від електромагнітного моменту асинхронного двигуна

Зазвичай номінальний момент машини менший від пускового, що дозволяє здійснити пуск двигуна з номінальним навантаженням. Цю властивість двигуна називають *пусковою здатністю* $\mu = M_{\text{пуск}}/M_{\text{ном}}$ (зазвичай $\mu = 1,1 \dots 2$).

Застосувати формулу (3.17) для розрахунків механічної характеристики асинхронних двигунів не завжди можна, тому що параметри схеми заміщення двигунів зазвичай не задаються у каталогах і довідниках, тому використовують спрощену формулу моменту. Ця формула базується на припущенні, що активний опір обмотки статора $R_1 \approx 0$; при цьому

$$M_{\text{ем}} \approx M_{\text{макс}} \frac{2}{s/s_{\text{кр}} + s_{\text{кр}}/s}, \quad (3.23)$$

а критичне ковзання

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} (\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \quad (3.24)$$

Аналізуючи (3.17), (3.19) та (3.22), 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 (3.18)) встановлюють, що критичне ковзання не залежить від напруги U_1 (значення U_1 відсутнє в формулі критичного ковзання). Це дає змогу побудувати механічні характеристики $M_{\text{ем}} = f(s)$ для різних значень напруги (рис. 3.12), 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. Зокрема, якщо напруга мережі U_1 знизиться на 30 %, тобто стала $U_1 = 0,7 U_{1\text{ном}}$, то максимальний і

пусковий момент знизиться більш ніж у два рази: $M'_{\max} = 0,7^2 M_{\max} = 0,49 M_{\max}$. На таку ж величину зменшується і пускова та перевантажувальна здатність, тому якщо при номінальній напрузі $\lambda = M_{\text{малс}} / M_{\text{ном}} = 2$, 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 $R_{2\text{пуск}} = R_2' + R_{\delta}'$, 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 (3.20) $s_{\text{кр}} = 1$:

$$s_{\text{кр}} = (R_2' + R_{\delta, \max}^{\epsilon}) / (X_1 + X_2') = 1,$$

де $R_{\delta, \max}^{\epsilon}$ – зведений до обмотки статора додатковий пусковий опір, при якому $M_{\text{пуск}} = M_{\max}$.

Таким чином,

$$R_{2\text{п.м}}' = R_2' + R_{\delta, \max}^{\epsilon} = X_1 + X_2', \quad (3.25)$$

де $R_{2\text{п.м}}'$ – опір кола ротора, при якому $M_{\text{пуск}} = M_{\max}$.

При $R_{2\text{п.м}}' > X_1 + X_2'$ пусковий момент зменшується.

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

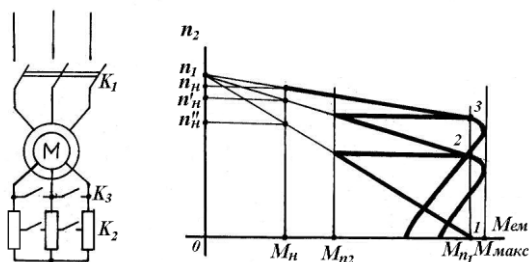


Рисунок 3.14 – Схема увімкнення додаткових опорів (а) і побудова пускових характеристик (б) асинхронного двигуна з фазним ротором

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

В цьому випадку пусковий момент буде дещо меншим від M_{\max} , але пусковий струм знизиться значно.

На рисунку 3.14 представлений 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 із 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 спричиняється необхідністю застосування додаткових опорів з невиробничими втратами електроенергії при їх нагріванні.

3.4 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. 3.15) показує, як відбувається процес перетворення електричної потужності в асинхронному двигуні та якими при цьому є втрати.

При підімкненні обмотки статора до мережі з останньої до статора машини надходить активна *електрична потужність*

$$P_1 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1. \quad (3.26)$$

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:

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 R_1. \quad (3.27)$$

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

$$P_{em} = m_1 E_1 I_1 \cos \psi_1 = m_2 E_2 I_2 \cos \psi_2 = M_{em} \omega_1 \quad (3.28)$$

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

$$P_{e2} = m_1 I_2^2 R_2' = m_1 I_2'^2 R_2'. \quad (3.29)$$

Якщо ці втрати відняти від електромагнітної потужності, то отримують повну механічну потужність двигуна (3.11) P_2' :

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

або

$$P_{em} = P_2' + P_{e2} = m_1 I_2'^2 R_2' (1-s)/s + m_1 I_2'^2 R_2' = m_1 I_2'^2 R_2' [(1-s)/s + 1] = P_{e2}/s. \quad (3.30)$$

Перетворивши (3.30), отримують ще одну формулу електричних втрат в обмотці ротора:

$$P_{e2} = P_{em} s. \quad (3.31)$$

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

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

$$P_{mex} = P_{тертя} + P_{вент} \quad (3.32)$$

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:

$$P_{\text{доо}} = 0,005 P_1 \quad (3.33)$$

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

$$P'_{\text{доо}} = \beta^2 P_{\text{доо}} \quad (3.34)$$

Сума усіх витрат асинхронного двигуна

$$\sum P = P_{e1} + P_{\text{маг}} + P_{e2} + P_{\text{мех}} + P_{\text{доо}} \quad (3.35)$$

Корисна потужність P_2 на валу машини є механічною потужністю, її визначають так:

$$P_2 = P_1 - \sum P = M_2 \omega_2 \quad (3.36)$$

де ω_2 – кутова частота обертання ротора.

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

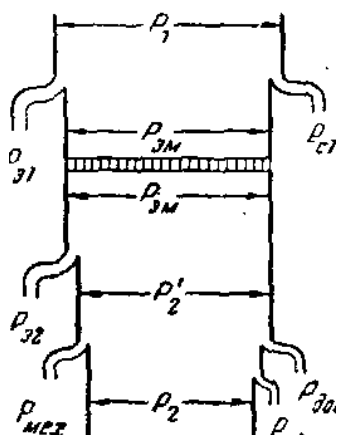


Рисунок 3.15 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Розглянемо послідовність побудови колової векторної діаграми.

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

Побудуємо колову векторну діаграму для струму статора, приймаючи що двигун має постійні параметри (рис. 3.16). До таких двигунів наближаються двигуни нормального виконання.

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

Задаємося масштабом струмів m_i і відкладаємо струм холостого ходу I_0 (відрізок OH під кутом $-\varphi_0$ до осі дійсних чисел) і струм короткого замикання (відрізок OK під кутом $-\varphi_k$).

Будуємо дугу кола для струму так: через середину хорди НК в точці М проводимо перпендикуляр через точку K до лінії проведеної через точку H паралельно осі абсцис отримуємо центр кола O_2 , проводимо коло з центром O_2 . Дуга НК цього кола (за годинниковою стрілкою) є геометричним місцем кінців

векторів струму в статорі під час роботи асинхронної машини в режимі двигуна. Для визначення $\cos \varphi$, на осі ординат від початку координат відкладаємо відрізок Of , який дорівнює 100 довільним одиницям і на ньому як на діаметрі будуємо коло Перетин цього кола з вектором струму I_1 . (або його продовженням) визначає відрізок Oh , який відносно діаметра кола дорівнює кількості сотих часток у значенні $\cos \varphi$, тобто $\cos \varphi = Oh/Of$.

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

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

Лінія електромагнітної потужності переходить через точки H і K_2 де точка K_2 визначається з умови $\frac{K_3K_2}{KK_3} = \frac{R_1}{R_K}$. Тоді електромагнітна потужність

$P_{em} = Dcm_p$. Відрізок K_2K_3 – відповідає втратам в обмотці статора, а відрізок KK_2 втратам в обмотці ротора під час короткого замикання.

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

Втрати холостого ходу визначаються відрізком HN_0 . В заданому режимі (при струмі I_1) втрати в обмотці статора визначаються відрізком cd , а втрати в обмотці ротора – відрізком bc . Масштабом для усіх цих втрат також є масштаб потужності. Щоб визначити з колової діаграми найбільший момент M_m , опускаємо з центра кола струмів O_2 перпендикуляр на лінію електромагнітної потужності і продовжуємо його до перетину з колом струмів в точці s .

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

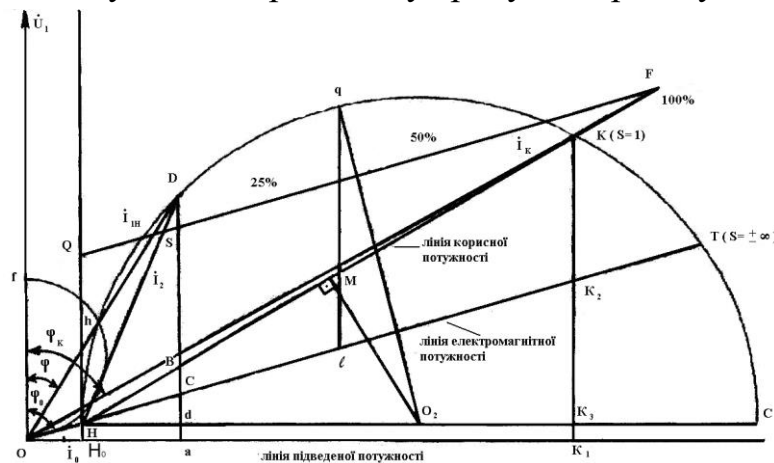
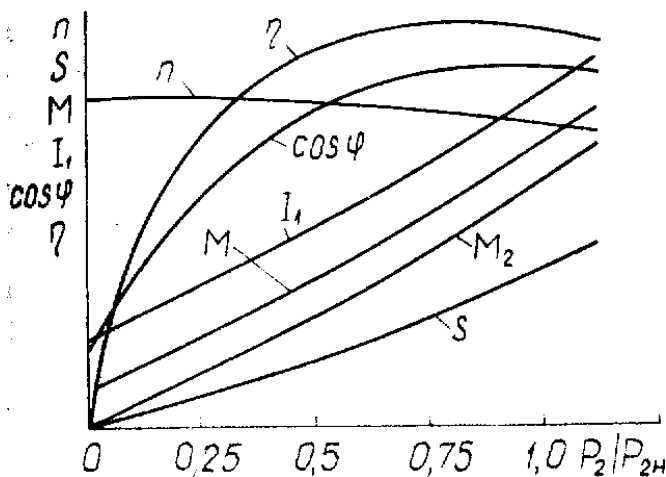


Рисунок 3.16 – Колова діаграма асинхронного двигуна

Тоді найбільший момент $M = qlm_M$ і коефіцієнт перевантажувальної здатності $K_{пр} = ql/Dc$. Точка s



визначається також дотичною до кола струмів, яка паралельна до лінії $P_{ем}$. Лінія QF – є шкалою ковзання. Точка Q визначає $s = 0$, а точка F – $s = 100\%$. Якщо відрізок QF розбити на 100 частин, то перетин лінії проведеної від точки Н через відповідну цій потужності точку на коловій діаграмі зі шкалою ковзання покаже значення ковзання. Шкала ковзання проводиться паралельно лінії електромагнітної потужності. Точка Q знаходиться на

Рисунок 3.17 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

перетині вертикалі проведеної через точку Н і шкали ковзання. Точка F знаходиться на перетині лінії корисної потужності і шкали ковзання. З колової діаграми будують робочі характеристики (рис. 3.17).

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

Частота обертання визначається за формулою

$$n = \frac{60f}{p} (1 - s) \quad (3.37)$$

Звідси випливає, що частота обертання може змінюватися відповідно до змінювання частоти мережі, ковзання та кількості пар полюсів. Виготовляються асинхронні двигуни з перемиканням кількості полюсів. Регулювання ковзання здійснюється на двигунах із фазними роторами шляхом введення в їх ланцюг активного опору. При цьому пусковий момент може дорівнювати максимальному при зменшеному пусковому струмі. Також ковзання можна регулювати зміною напруги мережі.

Пуск та регулювання частоти обертання асинхронних двигунів мають велике значення в сучасних електроприводах. Це обумовлюється насамперед тим, що маючи просту конструкцію та значну надійність під час експлуатації, ці двигуни становлять основну частину парку електродвигунів, що використовуються в усіх сферах виробництва. Простота й економічність пуску

та регулювання частоти обертання таких двигунів дозволили б суттєво знизити експлуатаційні втрати і підвищити ефективність виробництва.

Пуск асинхронного двигуна супроводжується перехідним процесом, зумовленим переходом ротора та механічно пов'язаних із ним частин робочого механізму із нерухомого стану в стан рівномірного обертання, коли обертовий момент двигуна урівноважується сумою гальмівних моментів, що подаються на ротор двигуна.

Пускові властивості двигуна визначаються, насамперед, значенням пускового струму або його кратністю: $i_{пуск} = I_{пуск} / I_{ном}$ та значенням пускового моменту чи пусковою здатністю. Двигун, що має хороші пускові властивості, розвиває значний пусковий момент при, порівняно, незначному пусковому струмі. На жаль, отримати таке сполучення пускових параметрів у асинхронному двигуні, практично, неможливо. Це обумовлюється тим, що згідно з (3.16)

$$M_{пуск} = k_m \Phi I_{2пуск} \cos \psi_2, \quad (3.38)$$

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

Оскільки в момент пуску ротор нерухомий і $f_2 = f_1$, струм ротора буде мати найбільше значення і перевищуватиме номінальне в 5...7 разів. Окрім того, індуктивний опір обмотки ротора при пуску досить значний порівняно з активним, а отже, $\cos \psi_2$ малий, тому кратність пускового моменту, як уже відзначалось, лише 1,1...2 рази. Якщо перевищення пускового моменту над номінальним виявляється достатнім для задовільного пуску, то 5...7 кратне перевищення пускового струму може призвести до небажаних наслідків.

Оскільки в початковий момент пуску ковзання $s = 1$, то, нехтуючи струмом холостого ходу, можна визначити пусковий струм обмотки статора із (3.14), підставивши $s = 1$:

$$I_{2пуск} = \frac{U_1}{\sqrt{(R_1 + R_2')^2 + (X_1 + X_2')^2}} \quad (3.39)$$

Із (3.39) випливає, що для зниження пускового струму потрібно або знижувати напругу, яка підводиться до обмотки статора, або підвищувати активний опір обмотки ротора R_2' . Останнє доцільніше, тому що дозволяє не лише знизити пусковий струм, але й, згідно з (3.22), підвищити пусковий момент. Що стосується зниження напруги U_1 , то пусковий струм буде

знижуватись пропорційно до зниження напруги, а пусковий момент – пропорційно до квадрата напруги, що дозволить провести пуск двигуна лише при відсутності навантаження на валу. Доцільність застосування того чи іншого способу покращення пускових властивостей визначається конкретними умовами експлуатації двигуна і вимогами, що висуваються до його пускових властивостей.

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

3.6 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 двоклітного двигуна дві обмотки. Ближче до циліндричної поверхні ротора розмішена пускова обмотка що має великий активний і малий індуктивний опори. Вона виготовляється із матеріалу з великим питомим опором (манганова латунь, бронза). Далі від поверхні ротора розмішена робоча обмотка, яка виготовляється із міді і має малий активний та порівняно більший індуктивний опір. У початковий момент пуску, коли ротор ще нерухомий і частота струму в роторі дорівнює частоті мережі, струм 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.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Яцун М. А. Електричні машини / М. А. Яцун. – Львів : Львівська політехніка, 2001. – 428 с.
2. Загірняк М. В. Електричні машини : підручник / М. В. Загірняк, Б. І. Невзлін. – Київ : Знання, 2009. – 399 с.
3. Електричні машини : підручник / Б. Т. Кононов, Г. І. Лагутін, О. Б. Котов та ін.; за заг. ред. Б.Т. Кононова. – Харків : ХУПС, 2015. – 493 с.
4. Мазуренко Л. І. Асинхронні генератори з вентильним та вентильно-ємнісним збудженням для автономних енергоустановок : автореф. дис. ... д-ра техн. наук : спец. 05.09.01 – електричні машини і апарати / Мазуренко Леонід Іванович. – Київ, 2001. – 31 с.
5. Плахтіна О. Г. Дослідження систем стабілізації напруги асинхронного генератора з самозбудженням та вибір раціонального варіанта / О. Г. Плахтіна, Б. Л. Копчак // Вісн. Харків. держ. політехн. ун-ту. – Вип. 84. – 2000. – 164 с.
6. Півняк Г. Г. Електричні машини : навч. посіб. / Г. Г. Півняк, Ф. П. Шкрабець, В. П. Довгань. – Дніпропетровськ : Національний гірничий університет, 2003. – 331 с.
7. Осташевський М. О. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / М. О. Осташевський, О. Ю. Юр'єва ; за ред. В. І. Мілих. – Київ : Каравела, 2018. – 452 с.

Електронне навчальне видання

ГЛЄБОВА Марина Леонідівна,
ЄГОРОВ Олексій Борисович,
ФОРКУН Яна Борисівна

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ
(Трансформатори. Асинхронні машини)

КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ

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

Відповідальний за випуск **О. Б. Єгоров**

За авторською редакцією

Комп'ютерний набір *М. Л. Глєбова*
Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2023, поз. 107Л

Підп. до друку 04.08.2023. Формат 60 × 84/16.

Ум. друк. арк. 5,6.

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