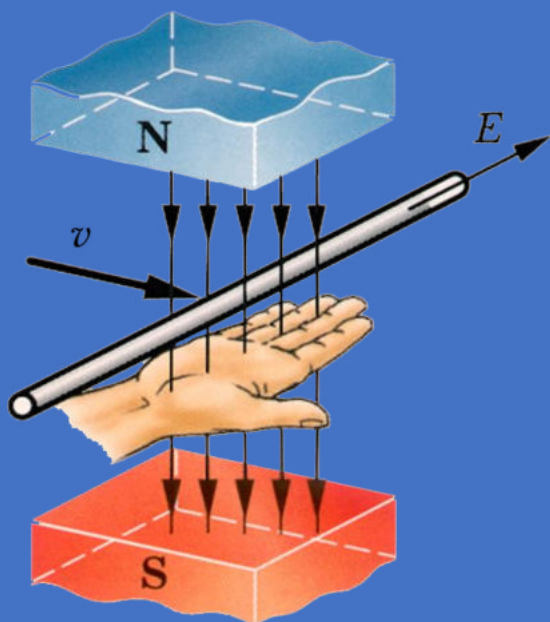


Стукало Ю.М.

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ



Навчальний посібник «Електричні машини» укладений на основі навчальної програми дисципліни «Електричні машини» з урахуванням вимог освітньо-професійних програм спеціальностей 5.05070103 «Електропостачання» та 5.07010501 «Технічне обслуговування, ремонт та експлуатація тягового рухомого складу»

Навчальний посібник обговорено та схвалено до використання в навчальному процесі на засіданнях циклових комісій навчальних дисциплін професійної та практичної підготовки спеціальностей 5.05070103 «Електропостачання» та 5.07010501 «Технічне обслуговування, ремонт та експлуатація тягового рухомого складу» (протокол від 11.12.2013 №5) та Методичної ради ДВНЗ «Київський електромеханічний коледж» (протокол від 21.01.2014 №6).

Рецензенти :

Н.П. Карпенко к.т.н., доцент УкрДАЗТ м. Харків

Ю.В. Черняк к.т.н., доцент ДЕТУТ м. Київ

Рекомендовано до видання та використання в
навчальному процесі.

Стукало Ю. М. Електричні машини: Навчальний
посібник для студентів коледжів. - К.: КЕМК, 2014. –
304 с.

В посібнику висвітлюються загальні
принципи електромеханічного перетворення енергії
електричних машин і трансформаторів, їх будова,
принцип дії, характеристики, навантажувальна
здатність та техніко-економічні показники.

Посібник призначено для студентів коледжів
електромеханічних спеціальностей і може бути
корисно фахівцям, що працюють в області
виробництва та експлуатації електричних машин.

ВСТУП

В. 1 Історія розвитку та роль електричних машин

Розвиток суспільства неможливо уявити без використання електричної енергії. Рівень розвитку матеріальної культури людського суспільства в першу чергу визначається створенням і використанням джерел енергії. Використання електрики зробило технічну революцію в промисловості і вплинуло на розвиток соціальних відносин.

Початком історії розвитку електричних машин можна вважати відкриття *англійським фізиком М. Фарадеєм закону електромагнітної індукції в 1831р.*, який і дав поштовх у створенні електричних машин.

Вже у 1834 Б.С. Якобі створив першу електричну машину, що працювала в режимі двигуна та була застосована на катері.

Треба також відмітити таких видатних вчених як М. Тесла, М.О. Доліво-Добровольський, П.М. Яблочков, І.Ф.Усагін, вони були першими винахідниками електричних машин і трансформаторів та дали напрям розвитку в електромашинобудуванні.

Сьогодні в галузі нараховується значна кількість великих заводів і науково-виробничих об'єднань. Найбільшими науково-виробничими об'єднаннями, що мають міжнародну популярність, в Україні є «Запоріжтрансформатор» місто Запоріжжя, «ДЕМЗ» місто Дніпропетровськ, «Електротяжмаш» місто Харків.

Майже вся електрична енергія виробляється електричними машинами, які можуть працювати не тільки в

генераторному режимі, але й у режимі двигуна, перетворюючи електричну енергію в механічну. Володіючи високими енергетичними показниками і меншими, в порівнянні з іншими перетворювачами енергії, витратами матеріалів на одиницю потужності, екологічно чисті електромеханічні перетворювачі мають величезне значення.

Електричні машини працюють у космосі і глибоко під землею, в океані й активній зоні атомних реакторів, у тваринницьких приміщеннях і медичних кабінетах. Без перебільшення можна сказати, що електромеханіка визначає технічний прогрес у більшості основних галузей промисловості.

Електротехнічна промисловість повинна забезпечити виготовлення електричних машин та іншого устаткування для енергетики й інших галузей народного господарства.

Для передачі й розподілу електроенергії потрібні трансформатори, автотрансформатори і реактори. На основі досягнень радянських електротехніків у Запорозжі були розроблені та виготовлені трансформатори для передачі величезних енергетичних потужностей на великі відстані при напругах 1150 кВ змінного струму і 1500 кВ постійного струму.

Унікальними установками є трансформатори, призначені для роботи на електростанціях в якості підвищувальних у блоці з турбогенераторами 1000 МВт і 800 МВт. Трансформаторні заводи країни випускають реактори, спеціальні трансформатори, комплектні трансформаторні підстанції й інші пристрої, що забезпечують надійну роботу енергосистем і електропостачання споживачів електроенергії.

Більше двох третин електроенергії, що виробляється на електростанціях, перетворюється різними електроприводами в механічну енергію. Електричні двигуни постійного й змінного струму будуються на потужності від часток вата до десятків тисяч кіловат, на напруги від декількох вольт до десятків кіловольт. Частоти обертання охоплюють діапазон від одного оберту на добу до 500000 об/хв. Випускаються двигуни, що забезпечують точні кутові і лінійні переміщення, двигуни, що працюють при різних температурах, в агресивних середовищах, у вакуумі та при високих тисках. Електродвигуни мають незліченні конструктивні виконання.

При створенні електродвигунів вдається вирішити майже всі проблеми, що ставляться промисловістю. Так, у 70-х роках двадцятого століття електротехнічна промисловість розробила електродвигуни вибухо- захищеного виконання на 1140 В, що дозволило в $1,5 \div 2$ рази збільшити середньодобовий видобуток вугілля. Створені різні електродвигуни, що забезпечують надійну роботу агропромислового комплексу.

Для побутового застосування випускається велика гама електричних машин, що забезпечує роботу холодильників, пирососів, пральних і інших побутових машин. Електричні двигуни широко використовуються в медичній техніці.

Особлива роль приділяється електричним машинам на залізничному транспорті, у космічній, авіаційній і морській техніці. Ці машини повинні мати обмежені габарити при високих енергетичних показниках і високій надійності.

Окрему галузь електромеханіки складають електричні машини систем автоматичного керування, де електричні машини використовуються в якості датчиків швидкості,

положення кута і є основними елементами найскладніших навігаційних систем.

Неможливо для кожного замовника випускати окрему машину, тому електричні машини випускаються серіями. У нашій країні масовою серією електричних машин є загальнопромислова серія асинхронних машин 4А. Серія складається з машин потужністю від 0,06 кВт до 400 кВт і виконана на 17 стандартних висотах осі обертання. На кожну з висот обертання випускаються двигуни двох потужностей, що відрізняються по довжині. На базі єдиної серії випускаються різні модифікації двигунів, що забезпечують технічні вимоги більшості споживачів. Великими серіями випускаються синхронні машини, машини постійного струму, мікромашини та трансформатори. Серійне виготовлення машин дозволяє модифікувати окремі вузли й деталі, застосовувати потокові автоматичні лінії та забезпечувати необхідний випуск електричних машин при мінімальних витратах.

Незважаючи на нескінченну різноманітність електричних машин, вони поєднуються єдиною теорією електромеханічного перетворення енергії.

До основної проблеми в галузі електромеханіки варто віднести створення електричних машин, що використовують нові нетрадиційні джерела енергії. Сьогодні близько 80% електроенергії виробляється на теплових електростанціях за рахунок спалювання органічного палива. Запаси нафти, газу і вугілля обмежені, тому необхідно в найближчі роки значно зменшити частку органічного палива в паливному балансі країни. Електромеханічне перетворення енергії й у майбутньому буде основним в

енергетиці, тому створення електрогенераторів, що використовують нові джерела енергії, є особливою турботою електромеханіків.

Виготовлення нових електричних машин відбувається з урахуванням твердих вимог економії матеріалів, електроенергії і трудових ресурсів. Створення більш економічних, менш металоємних і більш технологічних електричних машин є першочерговим завданням сучасного електромашинобудування.

В.2 Класифікація електричних машин

Електричні машини класифікуються за потужністю, частототою обертання, призначенням, родом струму та принципом дії. За призначенням електричні машини оділяють на такі види.

Електромашині *генератори* - *перетворюють механічну енергію в електричну*. Їх встановлюють на електричних станціях і різних транспортних установках: автомобілях, літаках, тепловозах, кораблях, пересувних електростанціях. В ряді випадків генератори використовують як джерела живлення в установках зв'язку, пристроях автоматики та вимірювальної техніки.

Електричні *двигуни* - *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 побуті.

Електромашинні *перетворювачі* - *перетворюють змінний струм у постійний і, навпаки, змінюють значення напруги,*

змінного й постійного струму, частоту або число фаз. Останнім часом роль електромашинних перетворювачів істотно зменшилася внаслідок застосування статичних напівпровідникових перетворювачів.

Електромашинні компенсатори - здійснюють генерування реактивної потужності в електричних установках для поліпшення енергетичних показників, джерел і приймачів електричної енергії.

Електромашинні підсилювачі - використовують для керування об'єктами великої потужності за допомогою електричних сигналів малої потужності, що подають на їх обмотки керування.

Електричні машини невеликої потужності до 500 Вт називають - мікромашинами, їх широко застосовують в автоматичних пристроях і в електропобутових приладах.

Електричні машини за родом струму поділяють на машини змінного і постійного струму.

Машини змінного струму в залежності від принципу дії та особливостей електромагнітної системи підрозділяють на асинхронні, синхронні і колекторні машини.

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

Синхронні машини застосовують як генератори змінного струму промислової частоти на електричних станціях, а також як генератори підвищеної частоти в автономних

джерелах живлення. В електричних приводах великої потужності використовують синхронні електродвигуни. У пристроях автоматики широко застосовують різні синхронні машини малої потужності.

Колекторні машини змінного струму використовують порівняно рідко, – головним чином, як електродвигуни. Вони мають складну конструкцію та вимагають ретельного догляду. В електропобутових приладах застосовують універсальні колекторні двигуни, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі.

Машини постійного струму застосовують головним чином як електродвигуни в пристроях електропривода, що вимагають регулювання частоти обертання в широких межах (залізничний і морський транспорт, прокатні стани, електротрансмісії великовантажних автомобілів, вантажопідйомні і землерийні машини, складні металообробні верстати), а також у випадках, коли джерелами електричної енергії для живлення електродвигунів служать акумуляторні батареї (стартерні двигуни, двигуни підводних човнів, космічних кораблів).

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

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

В.3 Номінальні дані електричних машин

Кожна електрична машина має паспортну табличку на корпусі. У цій табличці зазначено тип машини і її номінальні дані, що характеризують основні енергетичні показники й умови роботи, на які вона розрахована.

До енергетичних показників відносять: потужність, напругу, струм, частоту обертання, частоту змінного струму, коефіцієнт корисної дії (ККД), число фаз, коефіцієнт потужності та режим роботи. У паспортній табличці зазначено також назву заводу виробника, рік випуску, клас ізоляції та додаткові дані, необхідні для монтажу й експлуатації машини (маса, схема ввімкнення обмоток).

Номінальною потужністю електричної машини називають потужність, на яку розрахована дана машина за умовами нагрівання й безаварійної роботи на період установленого терміну служби. Для електричних двигунів під номінальною потужністю розуміють корисну механічну потужність на валу, виражену у ватах чи кіловатах, для генераторів постійного струму - корисну електричну потужність на затискачах машини (у ватах чи кіловатах), для генераторів змінного струму - повну електричну потужність на затискачах (у вольт-амперах чи кіловольт-амперах). Номінальні потужності усіх видів електричних машин і трансформаторів стандартизовані, також стандартизовані номінальні частоти обертання електричних машин.

Електричні машини можуть працювати і при неномінальних умовах, однак при роботі в цих умовах енергетичні показники машини відрізняються від паспортних даних. При менших навантаженнях ККД і коефіцієнт

потужності машини зменшуються. При навантаженнях, більших за номінальні значення, з'являється небезпека надмірного підвищення температури частин електричної машини, у першу чергу її обмоток, що може призвести до передчасного виходу з ладу ізоляції обмоток і, отже, усієї машини. Максимально припустима температура обмотки залежить від властивостей застосованої ізоляції (її класу) і терміну служби машини і складає від 105°C до 180°C . Гранично допустимі температури різних частин обмоток регламентуються стандартами (ДСТ), що мають силу законів.

Вимоги до напруги. Електричні машини випускають на стандартні напруги, погоджені зі стандартними напругами електричних мереж. Стандартні напруги генераторів приблизно на $5\div 10\%$ вище, ніж двигунів. Наприклад, якщо стандартна напруга двигуна 220 В, то стандартна напруга генератора – 230 В. Різниця в стандартних напругах двигунів і генераторів обумовлена втратами напруги в електричних мережах, до яких підключені генератори і двигуни. Машини змінного струму призначені, як правило, для роботи із синусоїдальною напругою, симетричною по фазах. Неминучі відхилення від цих умов регламентуються ДСТ. Так, наприклад, тривалі відхилення за значенням напруги в мережі, що живить силове устаткування, не повинні перевищувати - 5% і $+10\%$; коефіцієнт перекручування синусоїдальної кривої має бути не більше 5% .

В.4 Вимоги, що висуваються до електричних машин

Електричні машини мають бути надійними в роботі, мати гарні енергетичні показники, мінімальні габаритні розміри, масу і вартість. Вони повинні бути простими за конструкції, нескладними у виготовленні і зручними в обслуговуванні й експлуатації.

Кожна електрична машина розрахована на роботу в певних умовах експлуатації: режимі навантаження, допустимих перевантаженнях, напрузі, частоті змінного струму, частоті обертання, температурі навколишнього середовища, висоті над рівнем моря, вологості та ін. При цьому машина має розвивати номінальну потужність і працювати без аварій і ушкоджень протягом установленого часу.

Надійність роботи машини забезпечується за наявності точних розрахунків при проектуванні, застосування високоякісної технології виготовлення, правильної експлуатації і своєчасного виконання профілактичних ремонтів.

При проектуванні електричної машини шляхом оптимального вибору її основних параметрів і електромагнітних навантажень прагнуть одержати максимальні значення ККД і коефіцієнта потужності при номінальному навантаженні.

Розділ 1 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Частина 1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МПС

§ 1.1 Області застосування машин постійного струму

Незважаючи на переважне поширення електроенергії змінного струму, електричні машини постійного струму в нинішні часи широко застосовуються як двигуни і трохи менше – як генератори. Це пояснюється важливими перевагами двигунів постійного струму перед іншими електродвигунами, *вони допускають плавне регулювання частоти обертання простими способами і мають кращі пускові якості* – розвивають великий пусковий момент при відносно невеликому струмі. Тому їх широко використовують як тягові двигуни на електротранспорті. Електродвигуни постійного струму часто є виконавчими ланками систем автоматичного регулювання, а спеціальні генератори використовуються як підсилювачі електричних сигналів керування і як тахогенератори - датчики частоти обертання.

Генератори низької напруги ($6 \text{ В} \div 12 \text{ В}$) застосовують для живлення електролітичних ванн струмом до 10000 А , зарядки акумуляторних батарей, високоякісного зварювання при напрузі $20 \text{ В} \div 70 \text{ В}$.

Машини постійного струму входять до складу електроустаткування автомобілів, літаків, річкових та морських суден і дорожньобудівельних машин. Діапазон потужності машин постійного струму досить широкий – від

одиниць ватів до 9000 кВт .

При цілому ряді переваг машини постійного струму мають істотний недолік, пов'язаний з роботою так названого щітково-колекторного вузла. За деяких несприятливих умов щітки можуть іскрити, що знижує надійність роботи і вимагає постійного нагляду за машиною. Таку машину не можна використовувати у вибухонебезпечних середовищах. Колектор ускладнює її конструкцію й експлуатацію в порівнянні з безколекторною машиною змінного струму. Наприклад, двигун постійного струму потужністю близько 3 кВт у 3,5 рази дорожче асинхронного. Крім того, для живлення двигунів постійного струму потрібно додаткове устаткування – генератори постійного струму чи випрямлячі: основним видом електропостачання промисловості є електроенергія змінного струму.

§ 1.2 Принцип дії машини постійного струму

При переміщенні провідника в магнітному полі зовнішньою силою F , перпендикулярно ліній магнітної індукції, в ньому утворюється ЕРС. Напрямок ЕРС в провіднику визначають за *правилом правої руки* (рис. 1.1). Величина ЕРС залежить від добутку магнітної індукції у місці розташування провідника – B , активної довжини провідника розташованого у магнітному полі – l та лінійної швидкості руху провідника – v і визначається за формулою (1.1):

$$e = Blv, \quad (1.1)$$

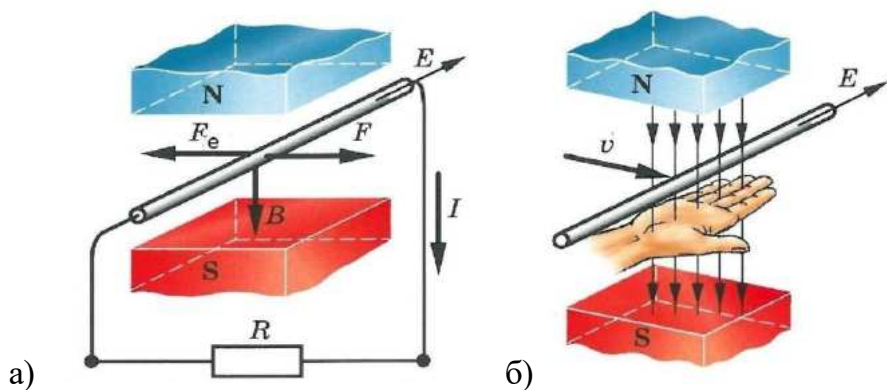


Рис. 1.1 - Утворення ЕРС в провіднику (а) та визначення її напрямку (б)

На рис. 1.2 представлена найпростіша модель машини постійного струму. Нерухома частина машини, яка називається індуктором (статором), складається з полюсів і сталюого (рідше чавунного) ярма у вигляді циліндра, до якого прикріплюються полюси. Призначенням індуктора є створення в машині основного магнітного потоку. Індуктор зображеної на рис. 1.2 найпростішої моделі машини має два полюси (ярмо індуктора на рис. 1.2 не показано). Обертова частина машини складається з укріплених на валу циліндричного якоря і колектора. Якір складається із осердя з електротехнічної сталі і обмотки, розміщеної на осерді якоря. Обмотка якоря в показаній на рис. 1.2 моделі машини має один виток. Кінці витка з'єднані з ізольованими від вала мідними пластинами колектора, число яких у розглянутому випадку дорівнює двом. До колектора під'єднані дві нерухомі щітки А; В, за допомогою яких обмотка якоря з'єднується із зовнішнім електричним колом.

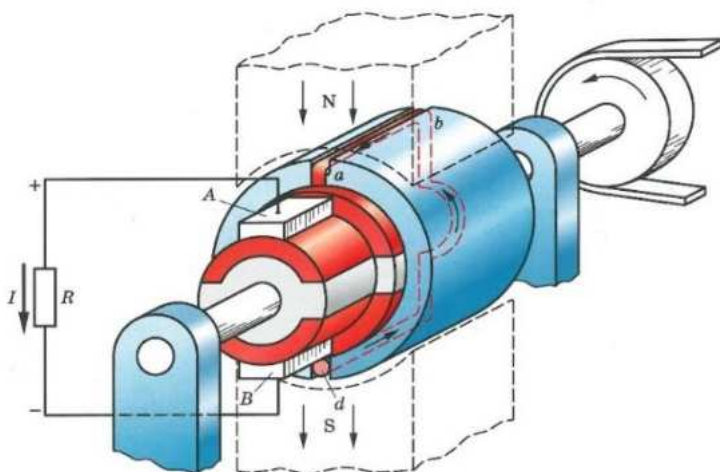


Рис. 1.2 - Найпростіша модель генератора постійного струму

Режим генератора. Розглянемо роботу машини в режимі генератора. Припустимо, що якір машини (див. рис. 1.2) приводиться в обертання проти годинникової стрілки. Тоді в провідниках обмотки якоря індукується ЕРС, напрямок якої може бути визначений за *правилом правої руки*. Оскільки потік полюсів передбачається незмінним, то ця ЕРС індукується тільки внаслідок обертання якоря і називається *ЕРС обертання*.

В обох провідниках внаслідок симетрії індукуються однакові ЕРС, які по контуру витка складаються, і тому повна ЕРС витка розглянутої машини визначається за формулою (1.2)

$$E_a = 2e_{np} = 2Blv. \quad (1.2)$$

ЕРС E_a є змінною за напрямком та величиною тому що, провідники обмотки якоря проходять поле перемінно під північним і південним полюсами. За формою крива ЕРС

провідника в залежності від часу t повторює криву розподілу індукції B уздовж повітряного зазору. Якщо обмотка якоря за допомогою щіток замкнута через зовнішнє електричне коло, то в цьому колі, а також в обмотці якоря виникає струм $I_{\text{я}}$.

В обмотці якоря цей струм буде змінним, і крива його форми аналогічна формі кривої ЕРС (рис.1.3), тому на них будуть діяти електромагнітні сили (див. рис.1.4, а).

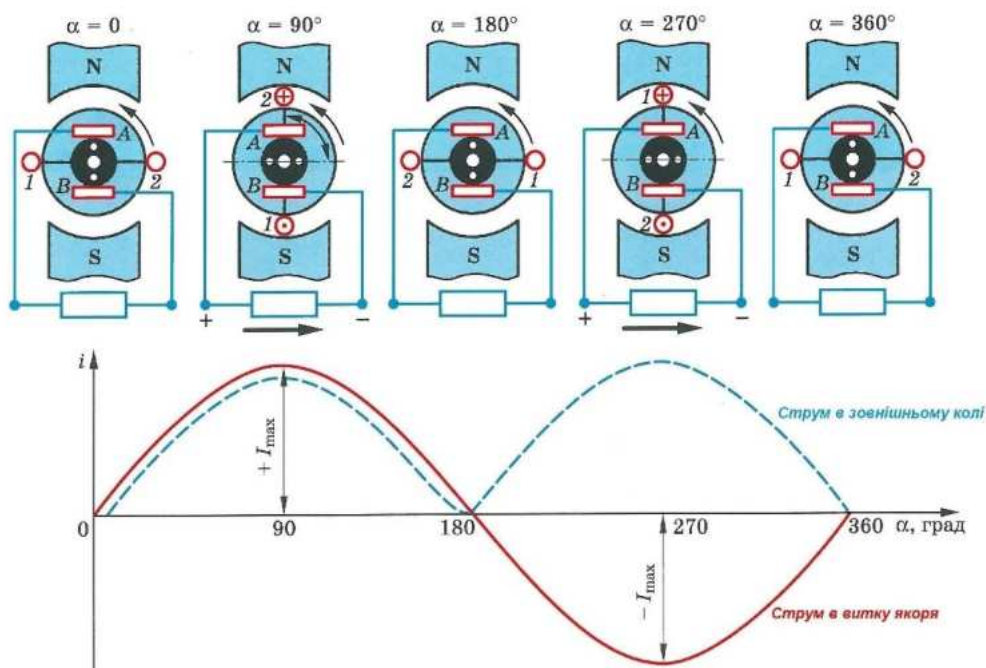


Рис. 1.3 – Випрямлення струму колектором

Однак, у зовнішньому колі напрямок струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. Дійсно, при повороті якоря і колектора (рис.1.2 та 1.3) на 180° і зміні напрямку ЕРС у провідниках одночасно відбувається також

зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок цього під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом.

У результаті цього полярність щіток і напрямок струму в зовнішньому колі залишаються незмінними.

Таким чином, колектор є механічним випрямлячем, що перетворює змінний струм обмотки якоря в постійний струм в зовнішньому електричному колі. Змінивши знак другого півперіоду кривої (рис.1.3), одержимо форму кривої струму і напруги зовнішнього кола.

Утворений у зовнішньому колі пульсуючий за величиною струм малопридатний для практичних цілей. Для одержання струму і напруги з малими пульсаціями застосовують більш складні за конструкцією обмотки якоря і колектор (див. § 1.3).

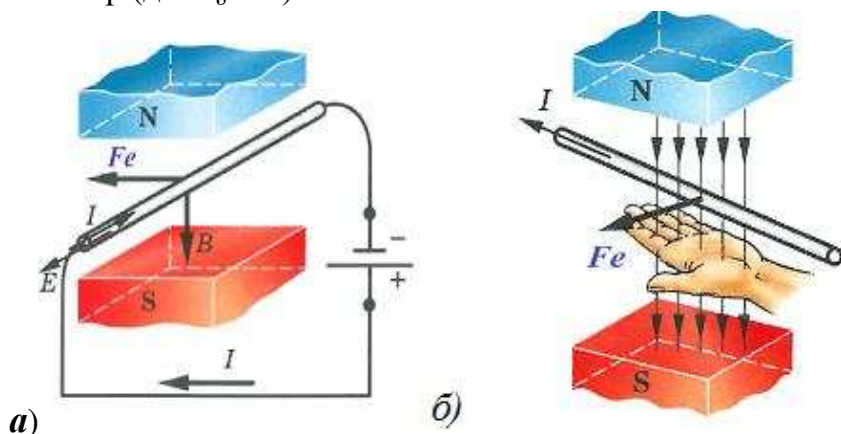


Рис. 1.4 – Провідник зі струмом в магнітному полі (а) та визначення напрямку сили (б)

Відповідно до закону Ампера, на провідники обмотки

якоря зі струмом I_a , які знаходяться в магнітному полі (рис.1.4,а та рис.1.5), діють електромагнітні сили. Напрямок сил визначається за правилом лівої руки (рис. 1.4,б).

Режим двигуна. Розглянута найпростіша модель машини може працювати також двигуном, якщо до обмотки її якоря підвести постійний струм від зовнішнього джерела (рис.1.5). При цьому на провідники обмотки якоря будуть діяти електромагнітні сили F_e .

$$F_e = B l i_a \quad (1.3)$$

Дві сили створюють механічний момент, який називається *електромагнітним* і у випадку (рис. 1.5) дорівнює:

$$M_e = F_e D_a = B l D_a I_a , \quad (1.4)$$

де D_a - діаметр якоря.

У режимі генератора цей момент діє проти напрямку обертання і є гальмуючим.

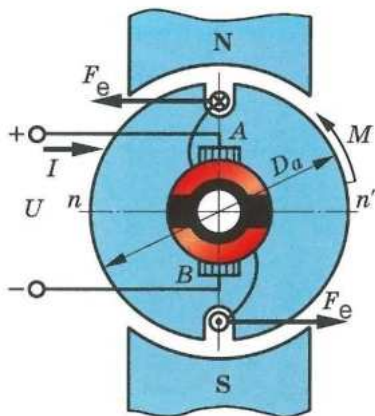


Рис. 1.5 – Принцип дії двигуна постійного струму

При достатній величині M_e якір машини прийде в обертання і буде розвивати механічну потужність. Момент M_e при цьому є рушійним і діє в напрямку обертання.

У випадку двигуна колектор перетворює споживаний із

зовнішнього кола постійний струм у змінний струм в обмотці якоря і працює, таким

чином, як механічний інвертор струму.

Провідники обмотки якоря двигуна також обертаються в магнітному полі і тому в обмотці якоря двигуна теж індукується ЕРС E_a , величина якої визначається рівністю (1.2). Напрямок цієї ЕРС у двигуні такий, як і в генераторі, таким чином, у двигуні ЕРС якоря E_a спрямована проти струму I_a та прикладеної до затискачів обмотки якоря напруги U . Тому ЕРС якоря двигуна називається також *проти-електрорушійною силою*.

§1.3 Будова машин постійного струму

Сьогодні електромашинобудівні заводи виготовляють електричні машини постійного струму, призначені для роботи в різних галузях промисловості, тому окремі вузли цих машин можуть відрізнятися за конструкцією, але загальна конструктивна схема машин однакова (рис.1.6). Нерухома частина машини постійного струму називається статором (індуктором), обертова частина – якорем (ротором), вони розділені повітряним зазором.

Статор складається зі станини, на внутрішній поверхні якої кріпляться головні й додаткові полюси з обмотками. Головні полюси служать для створення в машині основного магнітного потоку, а додаткові - для поліпшення умов комутації машини. Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Кінці вала знаходяться в підшипниках, розташованих у підшипникових щитах. Для кращого охолодження в більшості машин є вентилятор.

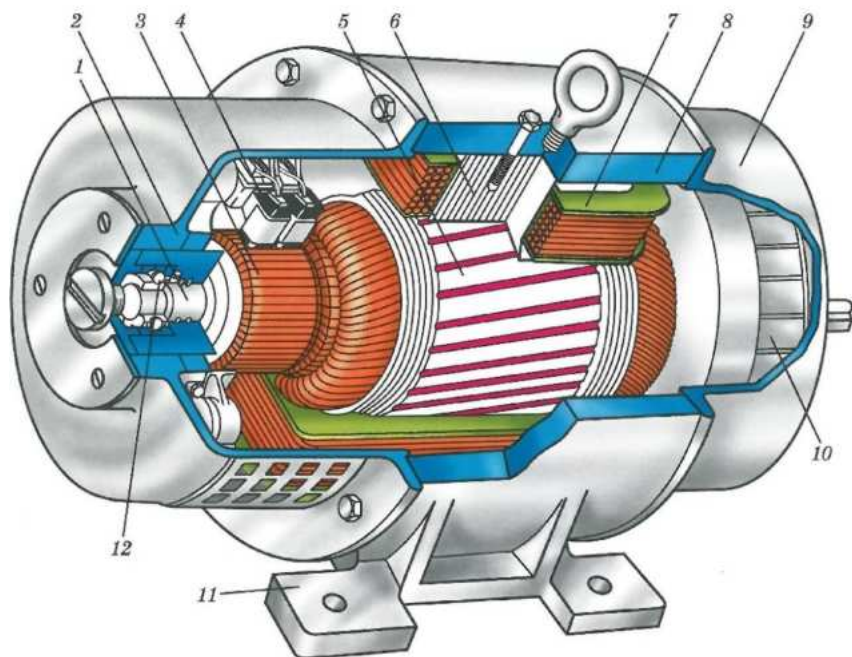


Рис. 1.6 – Будова машини постійного струму:

1 – вал; 2 – передній підшипниковий щит; 3 – колектор;
 4 – щіткотримач і щітки; 5 – осердя якоря; 6 – осердя полюса;
 7 – полюсна котушка; 8 – станина; 9 – задній підшипниковий щит;
 10 – вентилятор; 11 – лапи для кріплення; 12 – підшипники кочення

Станина машини постійного струму служить не тільки для кріплення полюсів і підшипникових щитів, вона є магнітопроводом, і через неї замикається основний магнітний потік машини. Станина виготовляється зі сталі – матеріалу, який має достатню механічну міцність і велику магнітну проникність. Для кріплення машини станина має відлиті чи приварені лапи з отворами для відповідних болтів. По краю станини розміщені отвори для кріплення головних і додаткових полюсів. У верхній частині станина має кільце (рим-болт), що служить для підйому машини при зборці й

монтажі. У машинах малої й середньої потужності станина виконується звичайно із сталевого прокату у вигляді цільної конструкції.

Головні полюси. Магнітне поле в машині постійного струму створюється магніторушійною силою обмотки збудження, що виконується у вигляді полюсних котушок, одягнутих на осердя головних полюсів (рис. 1.7).

З боку, зверненого до якоря, осердя закінчується полюсним наконечником, за допомогою якого забезпечується необхідний розподіл магнітного потоку на поверхні якоря. Осердя головних полюсів роблять шихтованими з листової конструкційної сталі товщиною 1 мм чи з тонколистової електротехнічної анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад, марки 3411. Штамповані пластини головних полюсів спеціально не ізолюють, тому що тонка плівка окису на їхній поверхні достатня для значного послаблення вихрових струмів, наведених у головних наконечниках пульсаціями магнітного потоку, викликаного зубчатістю осердя якоря. Анізотропна сталь має підвищену магнітну проникність уздовж прокату, що повинно враховуватися при штампуванні пластин і їхній зборці в пакет. Знижена магнітна проникність впоперек прокату сприяє ослабленню реакції якоря і зменшенню потоку розсіювання головних і додаткових полюсів.

У машинах постійного струму невеликої потужності полюсні котушки роблять безкаркасними – намотуванням мідного обмотувального проводу безпосередньо на осердя полюса, попередньо наклавши на нього ізоляційну прокладку (рис. 1.7, а).

У більшості машин нижні полюсні котушки, роблять каркасними. Обмотувальний провід обмотують на каркас, а потім надягають каркас з обмоткою на осердя полюса (рис.1.7, б).

У деяких конструкціях машин полюсну котушку для більш інтенсивного охолодження розділяють по висоті на частини, між якими залишають вентиляційні канали.

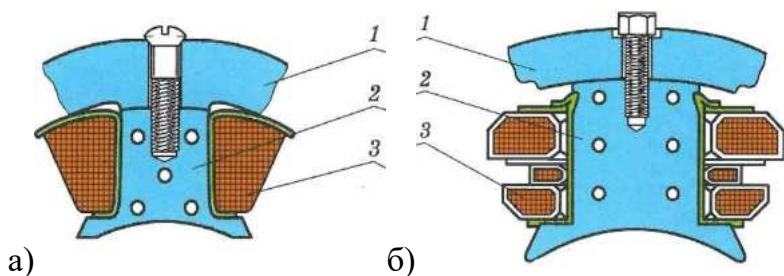


Рис. 1.7 – Будова головних полюсів з безкаркасною (а) та каркасною(б) полюсними котушками

Додаткові полюси застосовують у машинах потужністю понад 1 кВт з метою зменшення іскріння на щітках. Додатковий полюс складається із осердя й котушки виконаної з мідного ізолюваного проводу з перетином, розрахованим на робочий струм машини. Котушки додаткових полюсів завжди включаються послідовно з обмоткою якоря. Осердя додаткового полюса виготовляють зі сталі, вони мають звичайно монолітну конструкцію та через малу величину магнітної індукції в осерді додаткових полюсів у них практично не індукуються вихрові струми. Додаткові полюси встановлюють посередині між головними полюсами й кріплять до станини болтами.

Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки й колектора.

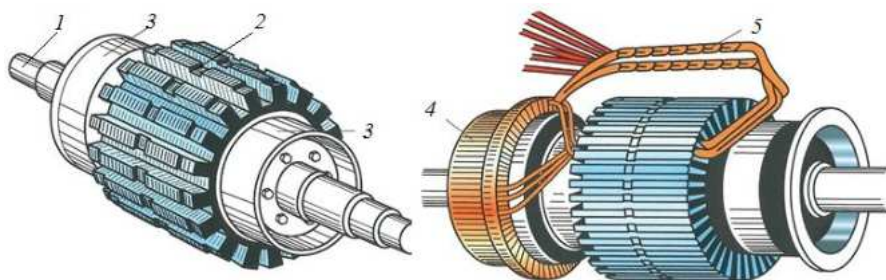


Рис. 1.8 – Основні складові будови якоря: 1- вал; 2 – осердя;
3 – нажимні шайби; 4 – колектор; 5 – обмотка якоря

Осердя якоря (рис.1.8) являє собою циліндр, набраний зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 чи 0,5 мм. Така конструкція осердя якоря дозволяє значно послабити в ньому вихрові струми, що виникають у результаті його перемагнічування в процесі обертання в магнітному полі. Листи покривають ізоляційним лаком, збирають у пакет і запікають. У машин малої потужності пакет сталі якоря надягають на вал, а у великих машинах – на хрестовину. У великих машинах пакет осердя якоря може набиратися не з суцільних листів, а з окремих сегментів. Для поліпшення охолодження машини в пакеті сталі якоря можуть виконуватися вентиляційні канали в осьовому й радіальному напрямках.

На зовнішній поверхні осердя якоря є подовжні пази, в які укладають обмотку якоря. Обмотку якоря виконують з мідного проводу круглого чи прямокутного перетину й розташовують у пазах осердя якоря, де вона ретельно

ізолюється від осердя. Пази осердя якоря можуть бути відкритими (рис.1.9,а) чи напівзакритими(рис.1.9,б).

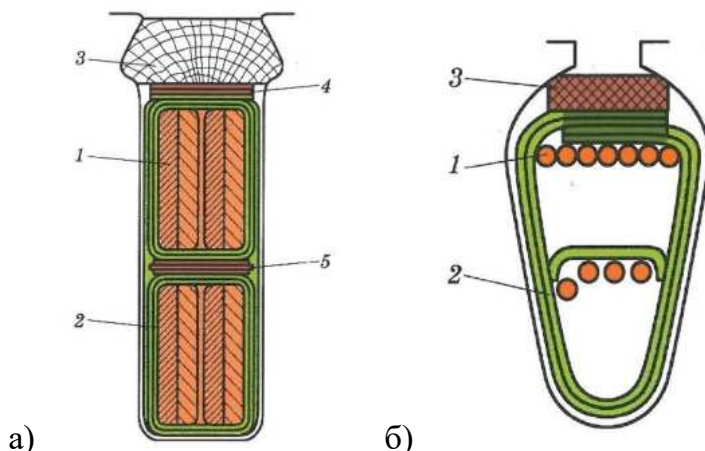


Рис. 1.9 – Пази якоря: 1- провідник; 2 – ізоляція шару; 3- клин; 4 – пазова ізоляція; 5 – міжшарова ізоляція

Відкриті пази застосовують у машинах середньої і великої потужності, а напівзакриті – у машинах малої потужності.

Обмотка якоря складається із секцій, кінці яких припаюють до пластин колектора. Для міцного закріплення проводів обмотки якоря в пазах застосовуються гетинаксові чи текстолітові клини. У машинах малої потужності пази не заклинюють, а закріплюються зверху бандажем. Для того, щоб бандаж не виступав за межі якоря, місце під бандаж роблять трохи меншого діаметра. Бандаж виконується зі сталевого чи бронзового дроту, намотуваного безпосередньо на сталь якоря поверх обмотки. Лобові частини обмотки кріпляться також за допомогою ізоляційного бандажа.

Колектор. Колектори електричних машин (рис.1.10) виконують з пластин холоднокатаної міді, які ізолюють прокладками з колекторного міканіту.

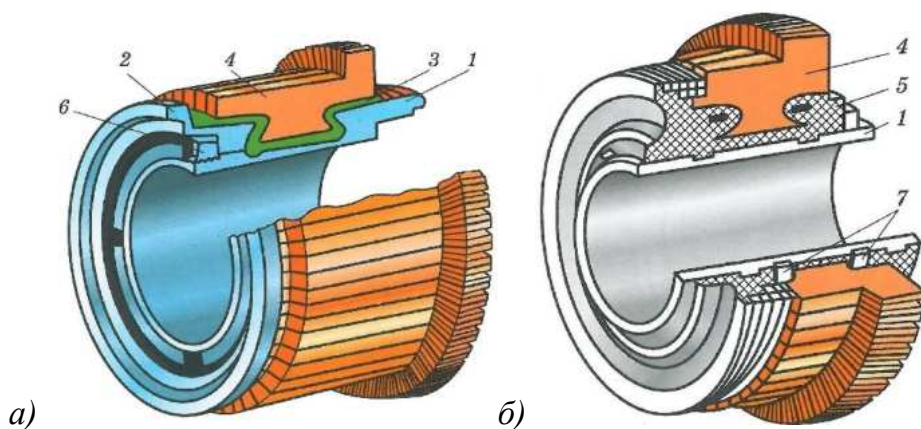


Рис. 1.10 - Будова колектора з конусними шайбами (а) та на пластмасовій основі (б): 1,2 - втулки з клиновидними виступами; 3- міканітові манжети; 4 – колекторна пластина; 5 – пластмаса; 6 – стопорне кільце; 7 – стальне кільце

Виступаючу частину колекторної пластини називають "півником", до неї припаюють проводи обмотки якоря. Нижні краї пластини мають форму "хвіст ластівки". Після збирання колектора такі краї є затиснутими між двома шайбами, ізольованими від колекторних пластин міканітовими конусами й циліндрами. Щоб міканітові прокладки при спрацьовуванні пластин колектора не виступали над пластинами, що викликало б вібрацію щіток, іскріння й передчасний знос щіток, їх фрезерують (роблять доріжки) на глибину до 1,5 мм. Колектори електричних машин малої потужності часто виконуються шляхом запресовування мідних пластин у пластмасу. Пластмаса в

цьому випадку є скріплюючим та ізолюючим матеріалом. Така конструкція колектора проста у виготовленні, але може застосовуватися лише при частотах обертання машини до 10000 об/хв.

Щітковий пристрій. Для одержання електричного контакту з поверхнею колектора в машині постійного струму застосовують щітки. Для установки щіток у машині служить щікотримач, що складається з пальців, обойми, прижимних пружин та курків (рис. 1.11).

В машинах малої потужності щікотримачі кріплять до підшипникового щита або станини. В машинах великої потужності щікотримачі кріплять на траверзу. Щіткова траверза звичайно кріпиться до станини. Між щітковою траверзою та щікотримачами є ізоляційні пальці. На кожен палець установлюють комплект щікотримачів. Число пальців звичайно дорівнює числу полюсів у машині. Щікотримач складається з обойми, в яку поміщають щітку, курка, яка представляє собою відкидну деталь, що передає тиск пружини на щітку. Кріплення щікотримача на пальці здійснюється за допомогою затискача. Для приєднання елементів електричного кола машини до щітки остання забезпечується гнучким тросиком, усі щікотримачі однієї полярності з'єднують між собою збірними шинами, приєднаними до виводів машини.

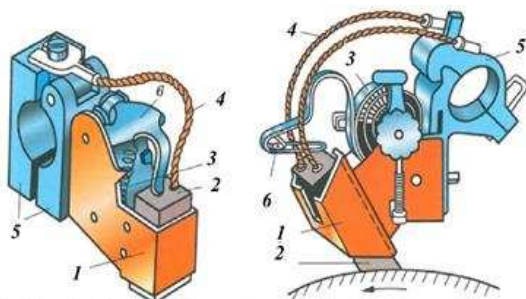


Рис. 1.11 – Будова щіткотримачів:

1 – обойма; 2 – електрична щітка; 3 – пружинна;
4 – гнучкий шунт; 5 – зажим; 6 – курок

Крім зазначених частин машина має два підшипникових щити: передній (з боку колектора) і задній. Щити за допомогою болтів кріпляться до станини, у центральній частині щита є розточення, де розташовується підшипник. Звичайно в машинах застосовуються кулькові чи частіше – роликові підшипники кочення, в деяких машинах з метою забезпечення безшумності в процесі роботи застосовуються підшипники ковзання.

Для приєднання обмоток машини до електричної мережі машина забезпечується коробкою виводів, де на ізоляційній панелі робляться виводи кінців обмоток. Звичайно панель з виводами розташовують на станині. Виводи обмоток машин постійного струму відповідно до ДСТУ 183-66 позначаються в такий спосіб:

- обмотка якоря..... Я1 та Я2
- обмотка додаткових полюсів..... Д1 та Д2
- обмотка збудження незалежна..... Н1 та Н2
- обмотка збудження паралельна... Ш1 та Ш2
- обмотка збудження послідовна С1 та С2

Цифрою 1 позначені початки обмоток, а цифрою 2 - кінці.

Обмотка якоря машини постійного струму являє собою замкнену систему провідників, певним чином покладених на осердя якоря й приєднаних до колектора.

Частина обмотки якоря, яка під'єднана до двох колекторних пластин, називається секцією. За конструктивним виконанням секції розділяють на петльові, хвильові й комбіновані. Схематично секції обмотки якоря представлені на рис. 1.12.

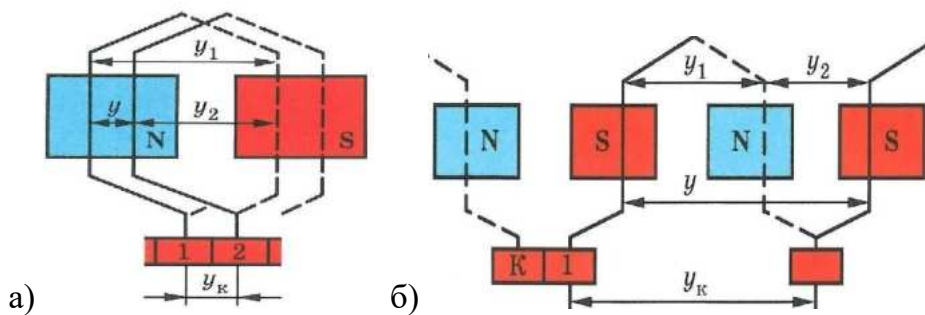


Рис. 1.12 – Вид секції петльової(а) та хвильової обмотки якоря(б)

Звичайно секції обмотки якоря є одновитковими, й тільки в машинах малої потужності вони можуть бути виконані багатовитковими.

В обмотці якоря секції з'єднуються між собою послідовно через загальну колекторну пластину.

Контрольні запитання

1. Чому виникає пульсація струму у зовнішньому колі і як її зменшити?
2. Що називають секцією?
3. Яке призначення станини?
4. Чому осердя якоря збирають з ізольованих листів електротехнічної сталі?
5. Для чого роблять продорожку колектора?

6. Призначення та будова щіткотримача? Які бувають типи конструкції щіток?

§ 1.4 Якірні обмотки машин постійного струму

Загальні положення. Сучасні електричні машини виконуються в основному із зубчастим якорем, у пази якого вкладають двошарову обмотку. Пази потужних машин роблять відкритими, в машинах менших потужностей, застосовують напіввідкриті та напівзакриті пази. Обмотка якоря складається з певної кількості секцій. Секція може складатися з одного, двох або декількох витків, має активні боки, які закладені в пази осердя якоря, та лобові частини, що з'єднують ці боки. Боки секції укладаються попарно в різні пази так, що один бік знаходиться у верхньому шарі, а другий лежить на дні паза. Таким чином, обмотка виготовляється двошаровою. При обертанні якоря в кожному активному боці наводиться ЕРС. У лобових частинах ЕРС не наводиться. Щоб ЕРС, які наводяться у боках секції, додавалися й їхня сума була максимальною, боки кожної секції розташовують під полюсами різної полярності на відстані, яка приблизно дорівнює полюсній поділці τ . При цьому якщо один бік секції знаходиться в нижній частині одного паза, то її другий бік розташований у верхній частині другого паза (на відстані, яка приблизно дорівнює τ). Верхній бік однієї секції та нижній бік іншої, що укладені в одному пазі, створюють елементарний паз (рис.1.13,а).

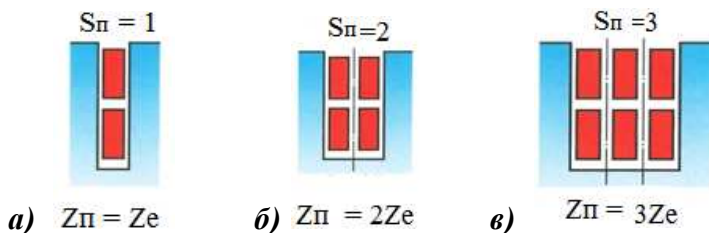


Рис. 1.13 – Елементарні пази якоря з обмоткою

Виготовлення якорів з великою кількістю пазів недоцільне, оскільки при цьому пази будуть вузькими, значна частина їхньої площі буде зайнята ізоляцією секцій від корпусу якоря, для провідників залишиться мало місця, в результаті буде програш у потужності машини при її заданих габаритних розмірах. Крім того, великі витрати ізоляційних матеріалів і збільшення обсягів робіт зі штамповки призведуть до подорожчання машини, а дрібні зубці будуть неміцними. Тому звичайно в кожному шарі розташовують поряд декілька ($S_{\pi}=2;3$) секційних боків (рис.1.13,б,в).

Групу секцій, які являють собою елемент обмотки до укладання в пази, називають катушкою якірної обмотки. Катушка складається з однієї або декількох секцій, які мають загальну корпусну ізоляцію. Кількість секцій в кожному боці катушки дорівнює кількості елементарних пазів у реальному пазі якоря. Кінці секцій з боку колектора припаюють до колекторних пластин. При цьому початок наступної секції приєднують до тієї ж колекторної пластини, що й кінець попередньої. Це забезпечує безперервність обмотки. Оскільки кожна секція має два кінці й до кожної колекторної пластини приєднують також два кінці секцій, то загальна кількість пластин

колектора дорівнює кількості секцій обмотки. Для більш зручного й наочного зображення схем якорних обмоток циліндричну поверхню якоря разом з обмоткою умовно розгортають на площині, й усі з'єднання провідників зображають на кресленні прямими лініями.

Проста петльова обмотка. На рис. 1.14 зображено принцип побудови так званої простої петльової обмотки, секції якої мають вигляд петель.

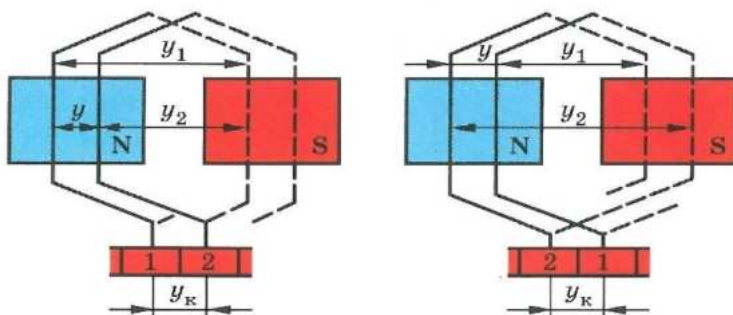


Рис. 1.14 – Елементи простої петльової обмотки

Відстань між початковим та кінцевим боками будь-якої секції називають першим частковим кроком y_1 . Кроки вимірюються в елементарних пазах. Невелика величина ε , додається або віднімається, тому що крок y_1 має дорівнювати цілому числу. На практиці застосовують обмотки тільки з укороченим кроком, які дають деяку економію міді. Ширина секції y_1 розраховується за формулою:

$$y_1 = Z_e / 2p \pm \varepsilon, \quad (1.4)$$

де Z_e – число елементарних пазів якоря;

p – число пар полюсів машини;

ε – правильний дріб, на який треба зменшити або

збільшити $Z_e/2p$, щоб y_1 виражався цілим числом.

Відстань між кінцевим боком якої-небудь секції й початковим боком наступної секції називають другим частковим кроком: $y_2 = y_1 - y$.

Причому у простій петльовій обмотці початкові боки секцій зсунуті один відносно одного на один елементарний паз: $y = y_k = \pm 1$.

Відстань між точками приєднання початків сусідніх секцій до колектора називають кроком по колектору y_k і вимірюють кількістю колекторних поділок. У простій петльовій обмотці початок і кінець кожної секції приєднані до сусідніх колекторних пластин, тобто для цієї обмотки $y_k=1$.

Колекторна поділка – це ширина колекторної пластини плюс ширина ізоляційної прокладки між пластинами. З'єднані між собою послідовно, секції створюють замкнене на себе коло (рис.1.15), по поверхні якого ковзають щітки.

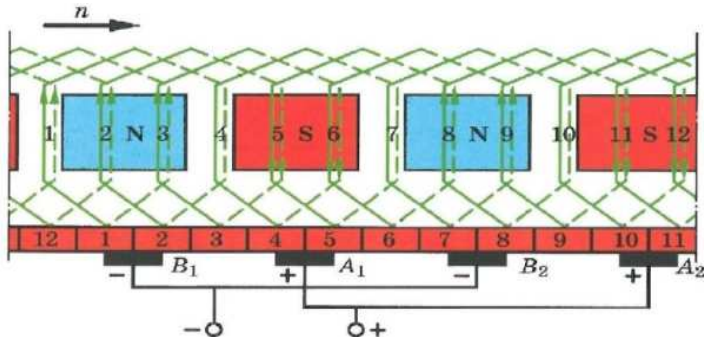


Рис. 1.15 – Розгорнена схема простої петльової обмотки

Кожне маленьке півколо відповідає реальній секції обмотки. У всіх провідниках, які рухаються під одноіменними полюсами, ЕРС мають однаковий напрям.

Під північним та південним полюсами напрями ЕРС протилежні. Сукупність секцій, з'єднаних між собою послідовно, в кожен момент часу ЕРС мають однаковий напрям, створюють паралельну гілку обмотки якоря рис.1.16.

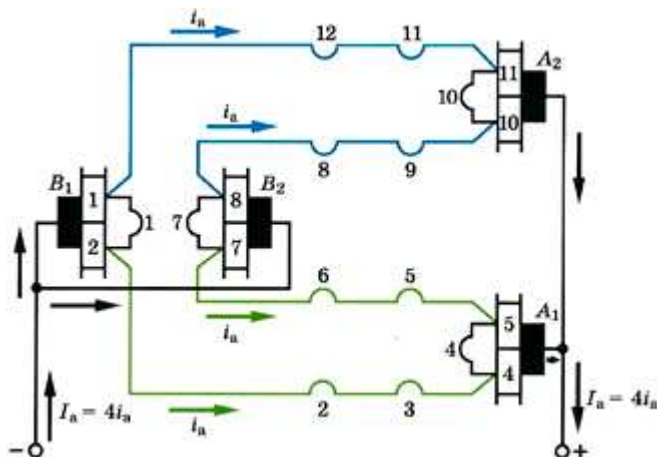


Рис. 1.16 – Паралельні гілки петльової обмотки

Місця установлення щіток на колекторі диктуються ефективністю використання обмотки. Ця ефективність найбільша в тому випадку, коли сума ЕРС у секціях паралельної вітки буде максимальною. Виходячи з цього, щітки доцільно встановлювати на тих пластинах колектора, до яких приєднані секції, що лежать на лініях геометричних нейтралей рис.1.17. Геометрична нейтраль – це твірна циліндра якоря, яка знаходиться посередині між сусідніми полюсами. На цій нейтралі індукція $B=0$, внаслідок чого ЕРС у секції (що знаходиться на нейтралі) $e = 0$. Тобто ЕРС у секції, яка при обертанні якоря проходить під щіткою, змінює свій знак, тому що вона (секція) переходить із зони дії одного полюса в зону дії

полюса протилежної полярності.

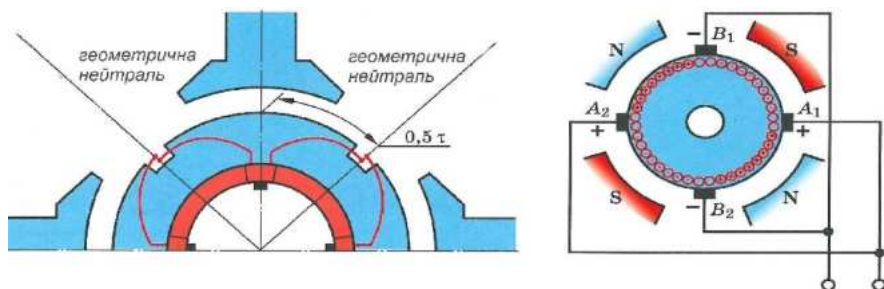


Рис. 1.17 - Встановлення електричних щіток

У простій петльовій обмотці ширина щітки $b_{щ}$ дорівнює ширині колекторної пластини. При обертанні якоря секція переходить із однієї паралельної гілки в іншу, замикаючись накоротко щіткою в момент переходу. У такій обмотці кожній парі полюсів відповідає пара щіток і пара паралельних гілок обмотки, тобто $a=p$; $2a=2p$, де a - кількість пар паралельних гілок.

У простій петльовій обмотці щітки є точками струмозподілу, вони ділять обмотку на $2p$ паралельних гілки, тому цю обмотку називають ще паралельною.

Щітки однакової полярності, які знаходяться проти однойменних полюсів, з'єднуються шинами, від яких роблять відводи до вихідних затискачів машини.

ЕРС якоря $E_{я}$ дорівнює сумі ЕРС усіх секцій будь-якої паралельної гілки. Внутрішній опір якірної обмотки дорівнює еквівалентному опору усіх паралельних гілок і зазвичай цей опір дуже малий (соті або десятки частки Ом).

Напрямок струмів у паралельних гілках однаковий, як при нерухомому, так і при обертаючому якорі.

Проста хвильова обмотка. Якщо секції, що знаходяться під різними парами полюсів, з'єднати послідовно, роблячи другий частковий крок у тому ж напрямі, що й перший, то отримаємо просту хвильову обмотку (рис. 1.18).

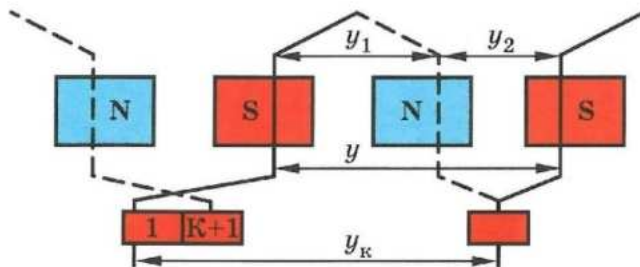


Рис. 1.18 - Елемент простої хвильової обмотки

Для цієї обмотки $y = y_K$.

Крок по колектору – y_K вираховується за формулою

$$y_K = K - 1 / p, \quad (1.5)$$

де K – число колекторних пластин;

p - число пар полюсів.

У простій петльовій і хвильовій обмотках $K = Z_e = S$,

де S - число секцій обмотки;

Z_e - число елементарних пазів якоря.

$$y = y_1 + y_2, \text{ звідси } y_2 = y - y_1.$$

Ширина секції y_1 розраховується за формулою (1.4) Кожен обхід по колу якоря включає N секцій та закінчується на колекторній пластині, яка є сусідньою для початкової пластини. Звичайно кінцева пластина знаходиться зліва від початкової. За один обхід відбувається переміщення

на $(K - 1)$ колекторних пластин та укладається p секцій.

Перший частковий крок, як і при петльовій обмотці, ціле число. Оскільки y_k - дробовим числом бути не може, то кількість колекторних пластин K повинна бути узгоджена з p . При хвильовій обмотці всі секції, які розташовані під північними полюсами, з'єднуються між собою послідовно, створюючи одну паралельну гілку, а всі секції, що розташовані під південними полюсами, також з'єднуються між собою послідовно, створюючи другу паралельну гілку.

Таким чином, *у простій хвильовій обмотці кількість паралельних гілок не залежить від кількості полюсів машини й дорівнює: $a = 1$.*

ЕРС якоря, як і при петльовій обмотці, визначається сумою ЕРС всіх секцій в одній паралельній вітці, а струм якоря $I_a = 2i_a$.

Відповідно одній парі паралельних гілок обмотки можна було б поставити тільки дві щітки на колекторі. Але на практиці встановлюють повний комплект щіток $(2p)$ і розташовують їх на однаковій відстані одна від одної (по осях полюсів). Це дозволяє зменшити значення струму, що припадає на кожну щітку, а отже, при одній і тій же його густині зменшити довжину щіток і відповідно довжину колектора (у простій хвильовій обмотці, як і в простій петльовій, ширина щітки $b_{щ}$ дорівнює ширині колекторної пластини b_k).

Крім того, з формули $y_k = (K - 1) / p$ випливає, що K - число завжди непарне при парній кількості пар полюсів p .

Тому в цьому випадку при двох щітках буде несиметрія паралельних гілок обмотки. В одній з гілок буде на одну секцію більше. При повному комплекті щіток частина секцій закорочується щітками накоротко таким чином, що в паралельних гілках залишається однакова кількість секцій, а через короткозамкнені щітки секції струм розподіляється в паралельні гілки.

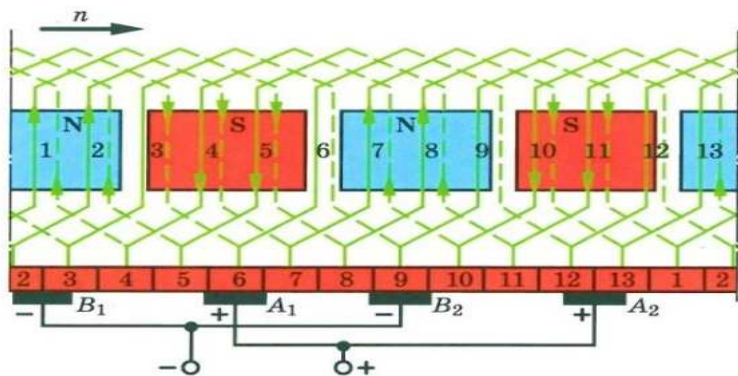


Рис. 1.19 - Проста хвильова обмотка якоря:

$$2p=4; \quad Z_c = K = S = 13; \quad y_1 = 3; \quad y_2 = 3$$

Складні обмотки. На якорі МПС можна укласти декілька замкнутих простих петльових обмоток, секції та колекторні пластини яких будуть чергуватися по колу одна з одною. Така обмотка називається складною петльовою. Складна петльова обмотка ($y=m$) складається з m простих. Для відведення струму з обмотки потрібно, щоб ширина щіток була не менше загальної ширини m колекторних пластин ($b_{щ} < m b_k$). Кількість паралельних віток складної петльової обмотки $2a \sim 2pm$. Кроки y_1 та y_2 , визначаються так, як і для простої петльової обмотки. Складні хвильові обмотки отримують шляхом

укладання на якорі m простих хвильових обмоток, що вмикаються на паралельну роботу з допомогою щіток. Кількість паралельних гілок такої обмотки відповідно в m разів більша кількості гілок простої хвильової обмотки:

$$2a = 2m.$$

Секції та колекторні пластини m ходів обмотки по колу чергуються. Тому після одного обходу послідовно з'єднаних секцій навколо якоря ми повинні вийти не на сусідню з початковою пластину колектора, як при простій хвильовій обмотці, а із зсувом на m колекторних поділок відносно початкової колекторної пластини (як правило, це зсув вліво).

§ 1.5 Вибір типу обмотки якоря

Вибраний тип обмотки повинен забезпечувати отримання потрібної ЕРС при визначеному струмі. При виборі типу обмотки потрібно забезпечити найкраще використання пазів осердя якоря, що визначається коефіцієнтом заповнення паза k_n . Якщо в пазі укладена велика кількість провідників, то значна частина площі паза буде зайнята ізоляцією цих провідників. Тому вибраний тип обмотки якоря повинен забезпечити якомога меншу кількість провідників. При заданих значеннях E_a , p , Φ_o та n кількість провідників у обмотці прямо пропорційна кількості пар паралельних гілок. Тому при виборі типу обмотки слід віддавати перевагу обмоткам з мінімальною кількістю паралельних гілок. Тобто найбільш бажаною є проста хвильова обмотка ($a=1$). Якщо цей тип обмотки застосувати неможливо

(наприклад, при струмах більших 350...500 А в одній паралельній гілці), переходять до іншого типу обмотки з більшою кількістю паралельних гілок, наприклад, до складної хвильової або простої петльової, в якій число паралельних гілок $2a = 2p$.

Контрольні запитання і задача

1. Що таке секція якоря? Як пов'язані між собою кількість секцій і колекторних пластин в машині постійного струму?
2. Якими параметрами характеризується обмотка якоря?
3. У чому полягає принципова відмінність між простими петлевими і хвильовими обмотками?
4. Якими міркуваннями слід керуватися при виборі типу обмотки?
5. У чотириполюсного генератора постійного струму з хвильовою обмоткою кількість пазів якоря $Z_c = 25$, кількість витків в секції $w_c = 4$, магнітний потік $\Phi = 0.65 \cdot 10^{-2}$ Вб, частота обертання $n = 1300$ об/хв.

Визначити ЕРС генератора.

§ 1.6 Магнітне коло машини постійного струму

Магнітне коло і методи його розрахунку однакові для будь-якої електричної машини постійного струму.

Магнітний потік в електричній машині протікає по магнітному колу так, як зображено на рис. 1.20. Скільки б не було б в машині полюсів, магнітне коло завжди вбирає в себе два полюси N-S (одну пару) різної полярності. Але не весь магнітний потік проходить через повітряний проміжок δ в якорі, частина його замикається в повітрі навколо обмотки збудження й носить назву потоку розсіювання Φ_p . Таким чином, весь потік полюса складається із двох

складових : $\Phi_n = \Phi_o + \Phi_p$.

З огляду на те, що будова машини симетрична й потоки всіх полюсів рівні, достатньо розглянути магнітне коло однієї пари полюсів рис.1.20,а. На даному рисунку пунктирною лінією показано магнітні лінії основного потоку Φ_o , довжини яких можна вважати середніми для усіх магнітних ліній. Основний потік Φ_o складає тільки частину потоку, який створюється полюсом, друга частина потоку, яка називається потоком розсіювання Φ_p , відгалужується в простір між полюсами, тобто не проходить в якір і не бере участі у створенні ЕРС.

МРС, що потрібна для створення основного магнітного потоку Φ_o , називають основною МРС.

При визначенні F_o магнітне коло розбивають на ділянки з таким розрахунком, щоб переріз, середня індукція по перерізу та магнітна проникність ділянки залишалися незмінними по усій її довжині.

За цих умов усе магнітне коло машини постійного струму можна розбити на *п'ять ділянок: повітряний проміжок; зубцевий шар; осердя якоря; осердя полюса; ярмо.*

Проектуючи машини, для визначення магнітної індукції застосовують метод приведення. Суть цього методу полягає в тому, що дійсну складну картину явища замінюють приведеною, що повинна, по-перше, мати якомога простіший вигляд і, по-друге, давати в розрахунку практично такі ж кількісні результати, що й дійсна картина.

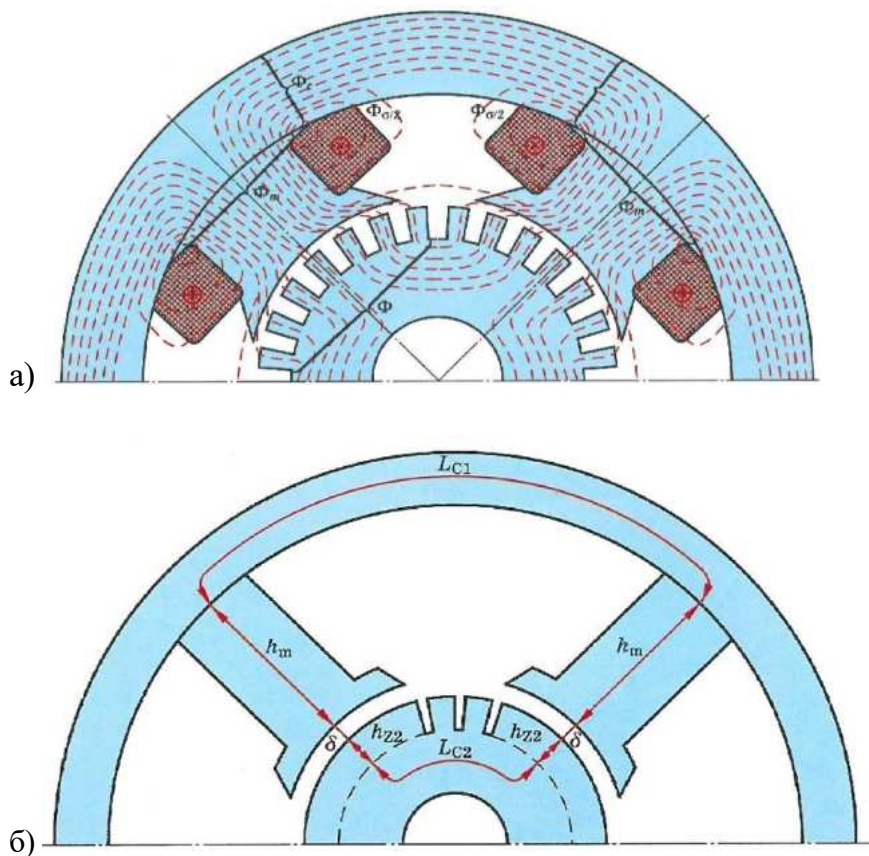


Рис. 1.20 - Магнітне поле машини : а) розподілення ліній магнітної індукції між полюсами; б) ділянки магнітного кола

§ 1.7 Магнітна характеристика й коефіцієнт насичення

Якщо виконаний розрахунок магнітного кола відповідає номінальному значенню Φ_0 , то, маючи певну кількість значень потоку в інтервалі $(0,4 \div 1,2)\Phi_0$, можна отримати, залежність

$\Phi_0 = f(F_0)$ або $\Phi_0 = f(I_3)$ що називається *магнітною характеристикою машини* (рис. 1.21, крива суцільна лінія -1). В початковій частині магнітна характеристика має практично прямолінійний характер, тому що при назначених значеннях потоку Φ_0 сталь машини не насичена, має малий магнітний опір: МРС витрачається в основному на подолання повітряного проміжку.

Продовжуючи прямолінійну ділянку кривої (штрих-пунктир -2), отримаємо залежність $\Phi_0 = f(F_\delta)$. Для номінального значення Φ_0 МРС F_δ визначається відрізком ab ; відповідно, відрізок bc відповідає частині основної МРС, необхідної для проходження потоку по інших ділянках кола. Ступінь насичення магнітного кола характеризується *коефіцієнтом насичення* і визначається за формулою (1.6)

$$k_{nc} = \frac{F_0}{F_\delta} = \frac{ac}{bc} = 1 + \frac{bc}{ab} \quad (1.6)$$

Коефіцієнт насичення є найважливішим параметром машини. За значенням k_{nc} можна робити висновки про деякі техніко-економічні показники і регульовальні властивості машини. Згідно з законом електромагнітної індукції величина ЕРС якорної обмотки визначається з виразу (1.7)

$$E = C_e \Phi n, \quad (1.7)$$

де C_e – конструктивна стала ЕРС ($C_e = pN/60a$);

n – швидкість обертів якоря;

Φ – величина магнітного потоку.

Перетворивши вираз (1.7) отримаємо $\Phi = E / C_e n$, звідки витікає що основний магнітний потік залежить від ЕРС, швидкості обертів та конструкційної сталої.

Отже, залежність $\Phi_o = f(I_3)$ є одночасно залежністю

$E/n = f(I_3)$. Значить, змінюючи струм збудження I_3 , можна змінювати ЕРС або частоту обертання. Якщо генератор має постійну частоту обертання n , то при зміні струму збудження зміниться ЕРС і напруга. Характер цієї зміни визначиться магнітною характеристикою (рис. 1.21).

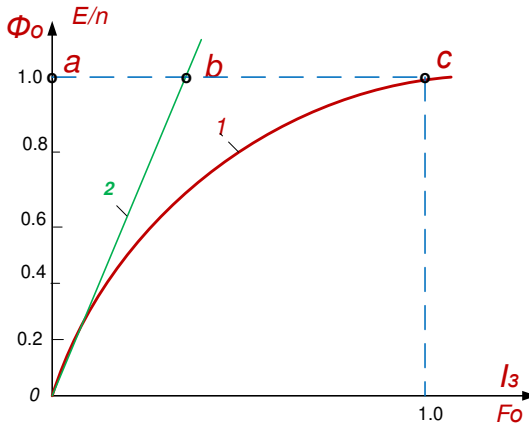


Рис. 1.21 - Магнітна характеристика машини

Слабо насичені машини мають кращі регульовальні властивості, ніж сильно насичені. Але машини зі слабо насиченим магнітним колом, маючи більші площі поперечного перерізу ділянок кола, більші за розміром, важчі й дорожчі.

Зменшити насичення магнітного кола машини можна за рахунок збільшення повітряного проміжку при збереженні високих індукцій у сталі. Але при цьому необхідно виготовити потужну обмотку збудження зі значними витратами міді.

В залежності від умов роботи, для яких призначена

машина, її магнітне коло може бути слабо насиченим ($<1,5$), середньо насиченим ($1,6 \div 1,8$) і сильно насиченим ($>1,9$). Для отримання таких значень коефіцієнтів насичення в машинах постійного струму індукції на окремих ділянках кола мають знаходитися в межах:

-повітряний зазор, Тл	0,8-1,1
-зубці якоря, Тл	2,1-2,4
-тіло якоря, Тл.	1,2-1,6
-тіло полюса, Тл.....	1,3-1,7
-тіло станини, Тл.....	1,1-1,4

§ 1.8 Реакція якоря машин постійного струму

У режимі холостого ходу магнітний потік у машині створюється МРС головних полюсів. При навантаженні з'являється струм в обмотці якоря, виникає відповідна МРС, якір стає електромагнітом, тобто джерелом власного магнітного поля. І хоча якір обертається, напрямок МРС обмотки якоря у просторі залишається незмінним, тому що він залежить тільки від положення щіток. Ці потоки створюють у машині єдине результуюче магнітне поле, що за своїм характером та величиною відрізняється від того, яке було в режимі холостого ходу.

Вплив МРС якоря на магнітне поле полюсів називається реакцією якоря.

На рис.1.22,а зображено поле, що створюється головними полюсами за відсутності струму в обмотці якоря ($I_a=0$). Магнітне поле під полюсами розподіляється рівномірно та симетрично відносно геометричної нейтралі.

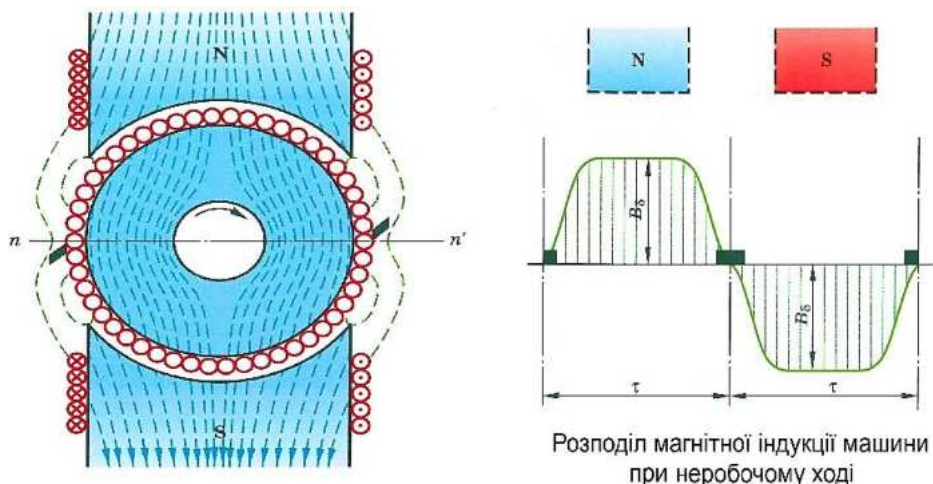


Рис. 1.22,а – Магнітне поле при холостому ході

Рис.1.22,б подає картину поля якоря за відсутності струму в обмотці збудження ($I_z=0$), коли якір живиться від стороннього джерела. Вісь поля якоря збігається з лінією розташування щіток. При установленні щіток під кутом 90° до осі полюсів (по геометричній нейтралі) магнітне поле якоря спрямоване перпендикулярно осі полюсів. На рис.1.22 для спрощення щітки зображують накладеними безпосередньо на провідники обмотки якоря, а не на з'єднані з ними колекторні пластини, які розташовуються під кутом 90° до відповідних провідників. При роботі під навантаженням спільна дія МРС обмотки збудження F_z та МРС якоря F_y створює результуюче поле, зображене на рис. 1.22, в. У генератора поперечне поле якоря підмагнічує край кожного полюса, з якого якір збігає та розмагнічує край кожного полюса, на який якір набігає. У двигуна навпаки – поперечне поле якоря розмагнічує край полюса, з якого якір збігає, та підмагнічує край полюса, на

який якір набігає.

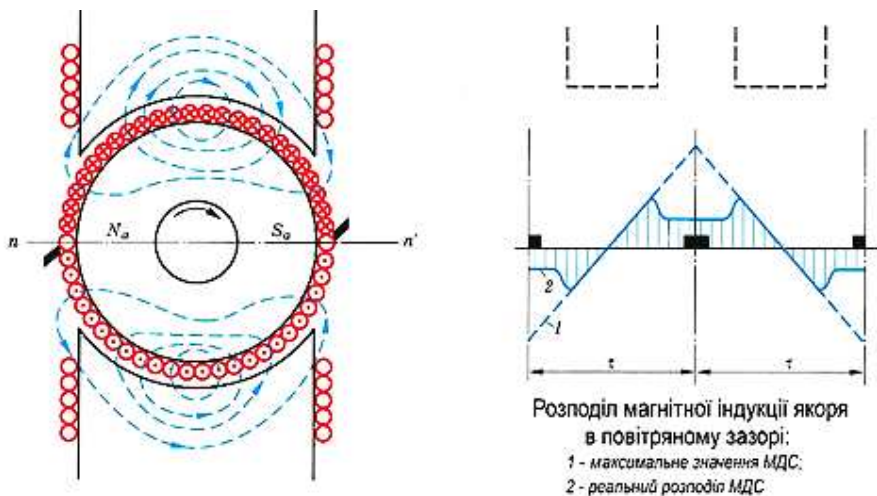


Рис. 1.22,б – Магнітне поле машини за відсутності струму в обмотці збудження ($I_f=0$)

Під впливом поперечної реакції якоря нейтральна лінія на поверхні якоря, де індукція $B = 0$, повертається з положення геометричної нейтралі на деякий кут α в положення фізичної нейтралі. У генераторі це повертання нейтральної лінії відбувається в бік обертання якоря, у двигуна – проти обертання якоря.

Положення щіток може не збігатися ні з фізичною, ні з геометричною нейтраллю. МРС якоря направлена по лінії, що з'єднує щітки, у сукупності з МРС обмотки збудження створюють МРС, яка створює результуюче поле машини.

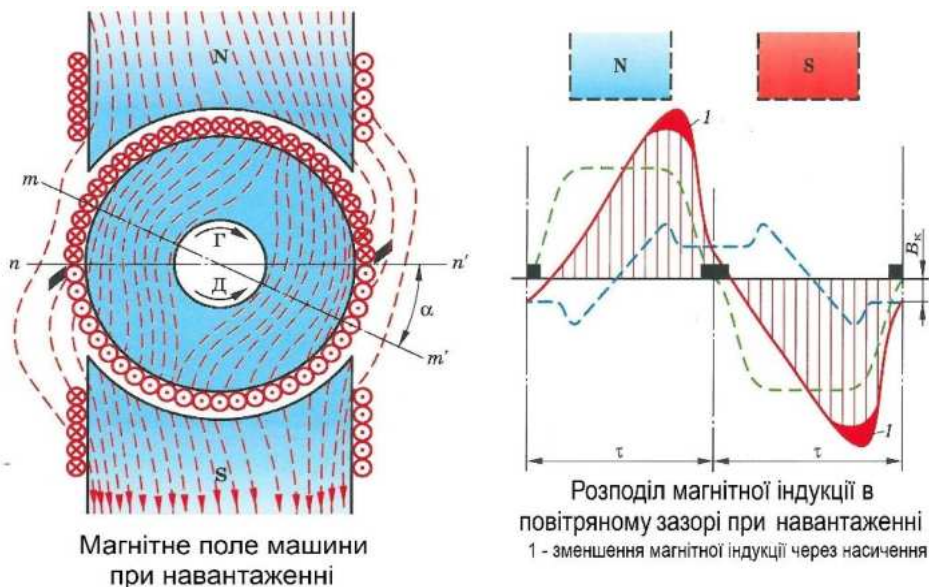


Рис. 1.22,в – Магнітне поле машини при навантаженні

На практиці поперечне поле треба враховувати тільки в межах полюсного наконечника, оскільки індукція цього поля в просторі між полюсами мала, бо велика довжина шляху магнітних ліній у повітрі. Вище було зазначено, що під впливом поперечного поля одна половина полюса відносно його поздовжньої осі підмагнічується, а друга розмагнічується.

Якщо згадати форму кривої намагнічування, то стає очевидним, що в результаті насичення потік половини полюса, яка підмагнічується, зростає в меншій мірі, ніж зменшується потік під половиною, яка розмагнічується, оскільки магнітне коло машини досить насичене.

Таким чином, під впливом поперечної реакції якоря індукція в повітряному зазорі машини перерозподіляється, а загальний магнітний потік зменшується.

Для збереження початкового значення потоку потрібно збільшити МРС F_o пари полюсів на деяку величину F_p .

Якщо щітки стоять на геометричній нейтралі, поздовжня розмагнічувальна МРС якоря відсутня, але розмагнічувальний вплив поперечної реакції якоря залишається. *Вплив поперечної реакції якоря приводить до збільшення напруги між сусідніми колекторними пластинами.* Якщо ця напруга буде більше певного значення, то за наявності забруднення між колекторними пластинами частками або пилом від щіток, можуть відбуватися вигорання цих «провідних містків», виникати спалахи, які за певних умов можуть розвинути й призвести до виникнення потужної дуги, що замикає накоротко більшу або меншу частину колектора, навіть за відсутності значного перевантаження машини в порівнянні з номінальним режимом. Допустима напруга між сусідніми колекторними пластинами – U_k у мікромашинах 25 – 30 В, у машин великої потужності – 16 В. Під дією поперечної реакції якоря напруга U_k у місцях максимальних індукцій може збільшуватися в порівнянні з її середнім значенням на 80...85%. Цю обставину потрібно враховувати в ході проектування електричних машин.

Найбільш радикальним способом боротьби з дією поперечної реакції якоря є застосування компенсаційної обмотки (КО). Ця обмотка виконується, по можливості, як дзеркальне відображення якірної обмотки, тобто компенсаційну обмотку розташовують якомога ближче й симетрично стосовно обмотки якоря, а напрям стуму в ній забезпечують протилежним напрямом струму в обмотці

якоря.

Конструктивно це здійснюється за рахунок того, що *КО* укладається в пази, що зроблені в наконечниках головних полюсів (рис.1.23). Оскільки *КО* в будь-якій точці повітряного зазору повинна компенсувати МРС поперечної реакції якоря $F_{\text{я}}$, то її лінійне струмове навантаження $A_{\text{я}}$ має бути таким, як і в обмотці якоря. Тому *КО* включається послідовно з обмоткою якоря. При цьому автоматично забезпечується компенсація МРС при будь-яких режимах роботи машини. Треба зауважити, що *КО* компенсує дію реакції якоря під полюсними наконечниками головних полюсів, у зоні ж між головними полюсами залишається не скомпенсованою частина реакції якоря.

Для компенсації цієї частини встановлюють додаткові полюси, про які йтиметься нижче у ході викладу матеріалу з комутації МПС.

За наявності *КО* магнітне поле машини при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження практично не змінюється. Компенсаційні обмотки широко застосовують у тягових двигунах електровозів.

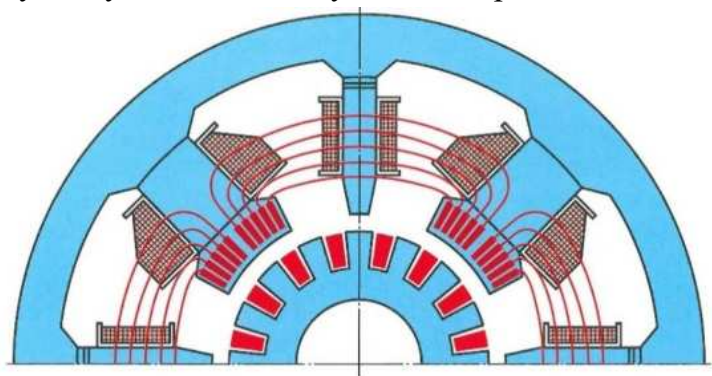


Рис. 1.23 - Розташування компенсаційної обмотки

Контрольні запитання

1. Що таке реакція якоря? Яка вона може бути?
2. Як розподіляється по довжині полюсної поділки МДС якоря, де вона максимальна?
5. Як впливає реакція якоря на роботу машини і як це проявляється?
6. Що таке середня напруга між колекторними пластинами?
7. Які можливі заходи по боротьбі із спотворюючою дією поперечної реакції якоря?

§ 1.9 Комутація машин постійного струму

При роботі машини щітка, і колектор утворюють ковзний контакт, під яким, спостерігається більш чи менш інтенсивне іскріння. Лише у деяких випадках іскріння відсутнє, а в електричних машинах, які працюють виключно у важких умовах, іскріння є практично завжди. Іскріння викликає ерозію колектора, підвищує спрацьовування щіток і може навіть, викликати їх пошкодження, а подальшу роботу машини зробити неможливою.

Необхідно відзначити, що вартість ремонту в експлуатації колекторних машин, пов'язана із заміною щіток, обточуванням і шліфуванням колекторів, дуже велика. Через це, усунення іскріння чи хоча б зменшення, його інтенсивності може дати істотний техніко-економічний ефект. У відповідності до ГОСТ 2582-81, що розповсюджується на всі електричні машини рейкового чи безрейкового транспорту, комутацію вважають *задовільною*, якщо в передбачених режимах випробувань не виникає залишкових деформацій або механічних пошкоджень колектора і щіткотримачів і вони придатні для подальшої роботи без очищення або якогось виправлення, а також, якщо ступінь іскріння не перевищує 1 ½ бали.

Причини іскріння на колекторі.

Іскріння - результат розриву струму. Які ж причини можуть його викликати? Ці причини можна умовно поділити на чотири основні групи:

а) *механічні* - через нерівності поверхні колектора, пластини, які виступають, чи міжламельну ізоляцію, вібрацію чи погане притирання щіток перекошування (заїдання) в гніздах щіткотримачів.

б) *комутаційні* - створюються фізичними процесами, що відбуваються в машині, при переході секції обмотки якоря з однієї паралельної гілки на іншу. При цьому має місце, розрив струму в секції, яка під'єднана до двох сусідніх колекторних пластин, по яких ковзає щітка;

в) *потенціальні*, викликані перевищенням допустимої напруги між сусідніми колекторними пластинами. Таке іскріння може перерости у *коловий вогонь*.

г) *фізико-хімічні*, викликані незадовільним станом контакту щітка - колектор. Для нормальної роботи цього контакту, який уявляють у вигляді зернят-контактів, які знаходяться у динамічній рівновазі і безперервно згорають і знову утворюються. При певних умовах (температура, вологість, наявність кисню) проходить процес електролізу. Дрібні частинки графіту, згораючи в кисні повітря, утворюють на поверхні колектора дуже тонкий шар оксидної плівки, горіхового кольору, - політури, що діє як мастило і запобігає швидкому зношуванню колектора і щіток. Якщо щітка ковзає по колектору при відсутності струму, то політура не утворюється і колектор і щітки швидко зношуються.

Всі ці причини, в кінцевому підсумку, пов'язані з обертанням якоря і колектора, під час якого секція перемикається з однієї паралельної гілки в іншу (див. рис. 1.24).

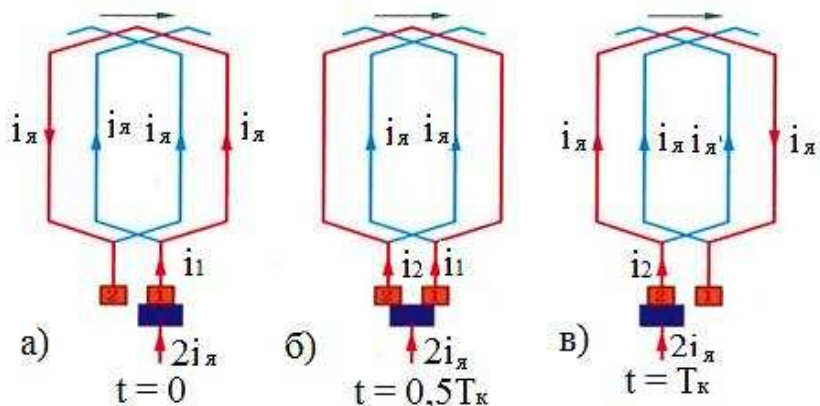


Рис. 1.24 - Процес комутації в секції обмотки якоря

Під час цього перемикання секція замикається щіткою на коротко (рис.1.24.б). А так як напрями струму в паралельних гілках по обидва боки від щітки протилежні, то струм в секції під час закорочування її щіткою змінює напрям на обернений. Цей процес називається *комутацією*, а секція називається *комутованою*. Однак в більш широкому розумінні слова під комутацією розуміють всі явища і процеси, що виникають під щітками.

Через це, не дивлячись на різні причини, що викликають іскріння на колекторі, кажуть, що комутація *добра*, якщо іскріння дуже слабе або його зовсім немає. Якщо ж іскріння інтенсивне, то говорять, що комутація *погана*.

Згідно ГОСТ 2582-81, якість комутації оцінюють *ступенем іскріння під збігаючим краєм щітки*, з-під якого виходять пластини колектора при його обертанні. Бали ступеня іскріння приведені у таблиці 1.1.

Процес комутації і ЕРС в комутованій секції

Розглянемо процес комутації в секції, що показана на рис. 1.24, вважаючи, що:

а) ширина щітки $b_{щ}$ дорівнює колекторній поділці β_k , тобто щіткове покриття $\gamma = b_{щ} / \gamma_k = 1$;

б) щітка, всією своєю поверхнею щільно пристає до колектора;

в) питомий опір контакту щітка - колектор не залежить від густини струму в ньому.

В початковий момент часу ($t = 0$), коли щітка контактує з пластиною 1 (рис. 1.24.а), струм в секції $i = +i_{я}$, струм в першому "півніковій" $i_1 = 2i_{я}$, а в другому - $i_2 = 0$. Через час $t = T_k$, який називається *періодом комутації*, щітка зійде з пластини 1 і встановиться на пластині 2 (рис. 1.24 в), при цьому $i = -i_{я}$, $i_1 = 0, i_2 = 2i_{я}$.

Таким чином, протягом періоду комутації $T_k = b_{щ} / v_k$ струм в секції змінюється від $+i_{я}$ до $-i_{я}$, тобто на $2i_{я}$.

Зміна струму комутації може відбуватися за різним характером (див. рис. 1.25). Секція, що лежить у пазах осердя якоря, володіє повною власною індуктивністю L_c . Значить в проміжку часу $0 < t < T_k$ в короткозамкненій секції індуктується ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L_c di / dt \quad (1.7)$$

Оскільки якірні обмотки є двошаровими, навіть при $u_n = 1$ в реальному пазові знаходяться дві сторони різних секцій. Якщо обмотка діаметральна ($y_1 = \tau$), то всі ці секції комутують одночасно, оскільки вони замкнені різними щітками. Крім того, якщо щітка перекриває кілька колекторних пластин ($b_{щ} > \beta_k$), а $u_n > 1$, то в одному реальному пазові будуть комутувати кілька секцій одночасно. В обох цих випадках інші комутовані секції призведуть до виникнення в секції, яку ми розглядаємо, ЕРС взаємоіндукції

$$e_M = - M di / dt , \quad (1.8)$$

де M - взаємна індуктивність.

Сума ЕРС самоіндукції і взаємоіндукції називається *реактивною ЕРС*:

$$e_p = e_L + e_M = -(L_c + M) di / dt = -L_p di / dt , \quad (1.9)$$

де L_p - еквівалентна індуктивність секції, що визначається кількістю її витків w_c і магнітною провідністю навколишнього середовища Λ . Тоді

$$L_p = w_c^2 \Lambda \quad (1.10)$$

Щітка закорочує секцію в тому випадку, коли остання знаходиться на лінії геометричної нейтралі машини; тому в секції індукується ЕРС обертання e_k від зовнішнього магнітного поля. Це зовнішнє поле є результируючим полем, яке створюється за рахунок реакції якоря і додатковими полюсами, що встановлюються для покращення процесу комутації. Таким чином, в комутованій секції виникають дві ЕРС: реактивна e_p і комутаційна e_k . Нехтуючи (як надто малими) опорами самої секції і "півників", складаємо рівняння для короткозамкненої секції, на основі закону Кірхгофа:

$$i_1 r_{щ1} - i_2 r_{щ2} = e_p + e_k , \quad (1.11)$$

де $r_{щ1}$ і $r_{щ2}$ - опори контакту щітка - колектор відповідно на пластинах 1 і 2.

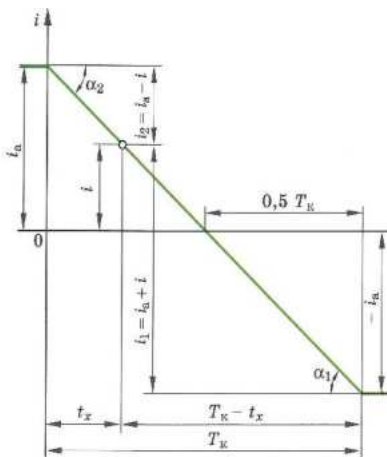
Це рівняння називають *основним рівнянням комутації*. Воно є нелінійним диференціальним рівнянням, оскільки реактивна ЕРС пропорційна di / dt , а комутаційна, як ЕРС

обертання, - індукції B_k , створюваної в зоні, де переміщуються комутовані секції. Розв'язок рівняння може бути отриманий при різних спрощуючих умовах.

Усі розглянуті ЕРС зумовлені струмом якоря, сповільнюють комутацію і тому є шкідливими. *Ці ЕРС пропорційні струму навантаження та швидкості обертання якоря.*

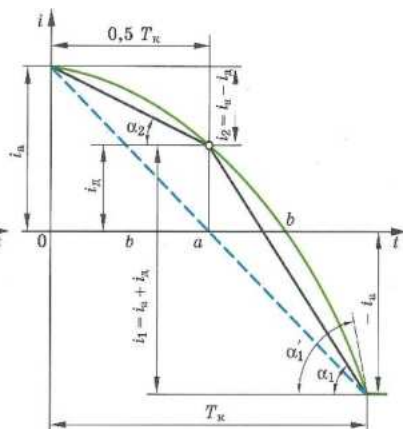
У загальному випадку в зоні комутованих секцій може бути магнітне поле, зовнішнє стосовно якоря, тобто поле, яке створюється індуктором. При обертанні сторін комутованої секції в цьому полі в ній наводиться ЕРС, яка може мати той чи інший знак залежно від напрямку зовнішнього поля. Природньо, що з допомогою цього поля намагаються компенсувати дію e_p у комутованій секції, оскільки вже в машинах потужністю біля 0,5 кВт ці ЕРС суттєво впливають на комутацію негативним чином.

Поле реакції якоря й зовнішнє поле, створене індуктором, діючи разом, створюють у зоні комутованих секцій результуюче, так зване комутуюче поле. Наведена цим полем у комутованій секції ЕРС e_k називається комутуючою (або ЕРС обертання). Таким чином, у кінцевому результаті в теорії комутації розглядають дві ЕРС – реактивну ЕРС секції e_p та комутуючу ЕРС e_k .



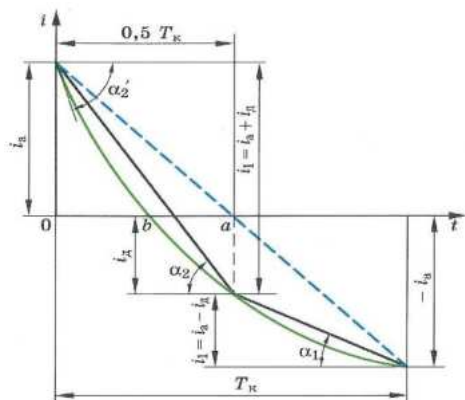
Графік прямолінійної комутації

а)



Графік криволінійної сповільненої комутації

б)



в) Криволінійна прискорена комутація

Рис. 1.25 – Графіки зміни комутуючого струму

Для досягнення найкращих умов комутації потрібно, щоб ці ЕРС мали протилежні напрями й були однакові за значенням (прямолінійна комутація) або щоб e_k була дещо більша за e_p (злегка прискорена комутація). Для цього комутуюче поле повинно мати напрям, протилежний напрямку поля реакції якоря.

Основні способи поліпшення комутації. Основною причиною незадовільної комутації в машинах постійного струму є додатковий струм комутації i_δ .

$$i_\delta = \Sigma e / R_{\text{щ}} \quad (1.12)$$

З виразу (1.12) випливає, що зменшити струм i_δ , а отже, поліпшити комутацію можна або збільшенням опору $R_{\text{щ}}$, або зменшенням сумарної ЕРС Σe в комутованій секції. Звідси випливає ряд способів поліпшення комутації, основні з яких розглянуті нижче.

Вибір щіток. З погляду забезпечення задовільної комутації доцільно застосовувати тверді щітки (вугільно-графітні, графітні й електро-графітові), тому що вони забезпечують найбільшу величину перехідного опору. Але допустима густина струму в щітковому контакті цих щіток невелика, через це їх застосування в МПС веде до необхідності збільшення площі щіткового контакту, що вимагає збільшення площі колектора за рахунок його довжини. Це призвело б до збільшення габаритів машини й додаткової витрати міді. Тому щітки з великим $R_{\text{щ}}$ застосовують переважно в машинах з відносно високою напругою, а отже, з невеликим робочим струмом. Найбільше застосування в МПС напругою 110...440 В мають електро-графітові щітки, а в машинах зниженої напруги (до 48 В) - мідно-графітові. Збільшенню перехідного опору щіткового контакту сприяє політура колектора - тонка оксидна плівка на поверхні колектора, яка має підвищений електричний опір.

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів – створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і

напрямку, щоб ЕРС, що наводиться цим полем в комутуючій секції компенсувала реактивну ЕРС, що виникає в процесі переходу щітки з однієї пластини на іншу.

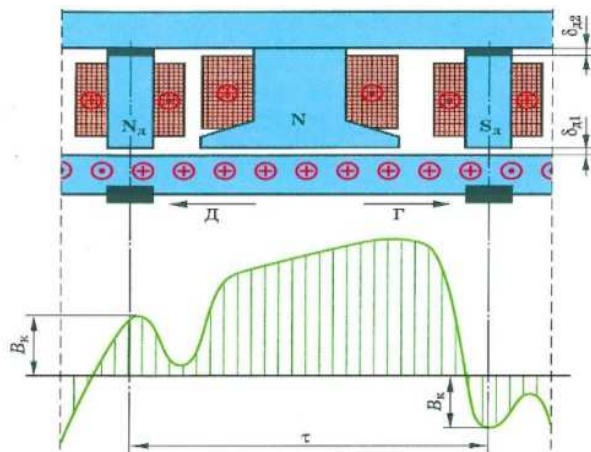


Рис.1.26 - Встановлення додаткових полюсів

Додаткові полюси розташовують між головними. При цьому щітки встановлюють на геометричній нейтралі (рис. 1.26).

Усі машини постійного струму потужністю понад 1кВт забезпечуються додатковими полюсами, число яких приймають рівним числу головних полюсів або удвічі меншим. Наявність додаткових полюсів дозволяє збільшити лінійне навантаження машини та при заданій потужності отримати машину меншої напруги.

Для забезпечення компенсації реактивної ЕРС при різному навантаженні обмотку додаткових полюсів включають послідовно з обмоткою якоря.

В цьому випадку МРС додаткових полюсів при різному навантаженні машини змінюється пропорційно струму

якоря, тобто пропорційно МРС якоря.

МРС додаткових полюсів $F_{\text{дп}}$ повинна бути спрямована проти МРС реакції якоря $F_{\text{ря}}$, щоб скомпенсувати її та створити крім того комутуюче поле $B_{\text{к}}$ для компенсації реактивної ЕРС e_p .

З урахуванням сказаного, на основі рис. 1.26 можна сформулювати правило: *за головним полюсом даної полярності в напрямі обертання якоря в режимі генератора повинен бути розташований додатковий полюс протилежної полярності, а у режимі двигуна - додатковий полюс тієї ж полярності.*

Оскільки значення $F_{\text{я}}$ та e_p пропорційні струму якоря, то для їх компенсації $F_{\text{дп}}$ та $B_{\text{к}}$ також повинні бути пропорційними струму якоря. Для виконання цієї умови обмотки додаткових полюсів вмикають послідовно з обмоткою якоря, а додаткові полюси виконують з ненасиченою магнітною системою.

При ненасиченій магнітній системі додаткових полюсів наведена ними комутуюча ЕРС:

$$e_{\text{к}} \sim B_{\text{к}} v_{\text{я}} \sim I_{\text{я}} v_{\text{я}}.$$

Тому виконання умови $e_{\text{к}} = e_p$ при зміні навантаження та швидкості обертання досягається автоматично.

Додаткові полюси забезпечують задовільну комутацію в машині тільки в межах номінального навантаження. При перевантаженні машини відбувається насичення магнітного кола додаткових полюсів. У цьому випадку e_p збільшується пропорційно струму навантаження, а зростання $e_{\text{к}}$ через насичення магнітного кола дещо затримується. Як наслідок з'являється не скомпенсована ЕРС, комутація стає сповільнено

криволінійною(див. рис.1.25,б). Насиченню осердь додаткових полюсів сприяє магнітний потік розсіяння, який замикається через осердя суміжних головних полюсів і ярмо. З метою зменшення Φ_d а отже, забезпечення більш лінійної залежності потоку додаткових полюсів від струму навантаження, обмотки додаткових полюсів розміщують ближче до якоря, а повітряний зазор ділять на дві частини шляхом створення другого немагнітного зазору між ярмом і осердям додаткового полюса за допомогою немагнітних прокладок із міді або дюралюмінію.

При проведенні кваліфікаційних випробувань, котрим згідно ГОСТ 2582-81 піддають машини нових типів, визначають галузь найближчої комутації, яка дозволяє оцінити комутаційні властивості машини і налагодити додаткові полюси шляхом зміни числа витків їх обмотки або розмірів повітряного проміжку. При цьому змінюється індукція B_k і комутаційна ЕРС, що дозволяє в максимальній степені наблизитися до умов без іскрової комутації $e_p = -e_d$.

Усі машини постійного струму потужністю понад 1 кВт забезпечуються додатковими полюсами. Звичайно кількість додаткових полюсів дорівнює кількості головних, але в машинах потужністю до 2...2,5 кВт іноді ставлять половинну кількість головних полюсів. Застосування додаткових полюсів дозволяє збільшити лінійне навантаження машини й тим самим зменшити її розміри та вартість.

Зсув щіток. У машинах потужністю декілька сотень ватів додаткові полюси не ставлять. Комутуюче поле створюють зсувом щіток з геометричної нейтралі, завдяки

чому в зоні комутації починає діяти поле головних полюсів (рис.1.27).

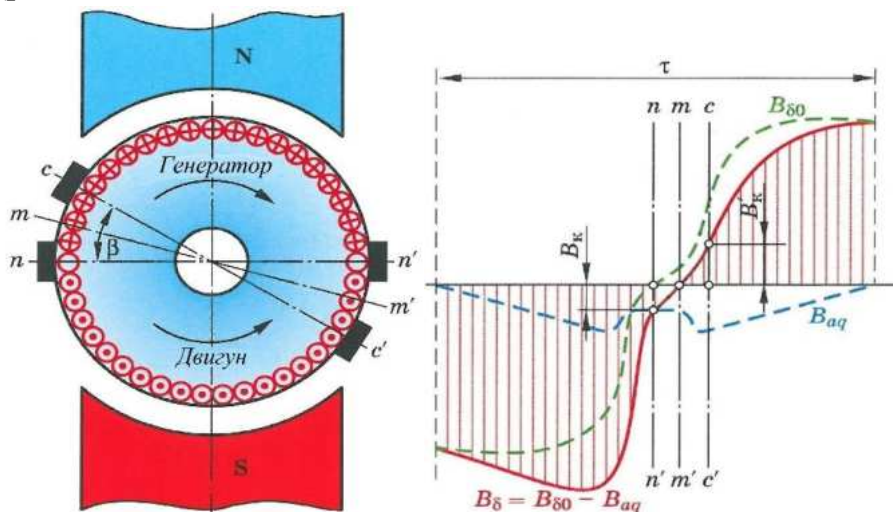


Рис.1.26 – Зсув щіток з геометричної нейтралі

Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то поле поперечної реакції якоря (у даному випадку це комутуюче поле) створює в зоні комутації індукцію B_{κ} . У результаті в комутуваних секціях наводиться комутуюча ЕРС e_{κ} (ЕРС обертання), спрямована узгоджено з реактивною ЕРС e_r , яка сприяє сповільненій комутації.

При зсуві щіток з геометричної нейтралі $n-n'$ на фізичну нейтраль $m-m'$ комутуюче поле з індукцією B_{κ} зникає, і ЕРС обертання стає мінімальною або зовсім зникає. При цьому в комутуваних секціях наводиться лише реактивна ЕРС e_r . Якщо ж щітки зсунути на певний кут α , тобто за фізичну нейтраль $m-m'$, то комутуюче поле з індукцією B_{κ} (створюване головними полюсами) змінить свій напрям відносно того, коли щітки

знаходилися на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутованих секціях ЕРС обертання e_k , рівну реактивній ЕРС e_p і протилежну їй за напрямом. Отже, реактивна ЕРС виявиться скомпенсованою, і комутація стає прямолінійною. Щоб e_k діяла проти e_p , поле головних полюсів у зоні комутації повинно бути спрямоване проти поля реакції якоря. Для цього в генераторі щітки потрібно зміщати в бік обертання, а в двигуні, навпаки, проти обертання (див. рис. 1.26).

Якщо потік головних полюсів Φ_δ змінюється пропорційно струму якоря (машини з послідовним збудженням), то при певному фіксованому положенні щіток можна досягнути гарних умов комутації в широкому діапазоні навантажень. Якщо ж $\Phi_\delta = const$, то найкращі умови комутації досягаються тільки при якомусь певному навантаженні.

Установлення щіток виконують візуально, спостерігаючи за їх іскрінням та оцінюючи це явище відповідно до шкали іскріння.

§ 1.10 Шкала іскріння та негативні наслідки комутації

Шкала іскріння. Іскріння щіток є небезпечним явищем, бо при виході за певні межі воно погіршує роботу машини й може остаточно вивести її з ладу. Іскріння на колекторі оцінюється ступенем іскріння під збіжним краєм щітки за шкалою іскріння (класами комутації).

Ступінь іскріння зазначається в стандартах або технічних умовах на окремі види машин. Стан колектора та щіток перевіряють візуально після певного часу роботи,

який регламентується державним стандартом залежно від режиму роботи машини. Тільки ступені іскріння 1, 1¼, 1½ відповідають таким умовам роботи, коли при тривалій роботі колектор і щітки залишаються в стані, придатному для подальшої роботи й при всіх режимах роботи. Є види іскріння, які взагалі недопустимі. Іскріння язичкового виду й дугове швидко руйнують колектор і щітки й призводять до різних тяжких аварій.

Водночас перевантаження машини супроводжується підсиленням реакції якоря, під впливом якої розподіл індукції в повітряному зазорі машини стає нерівномірним. У результаті збільшується напруга між сусідніми колекторними пластинами в зоні збільшення індукції. Ця напруга може перевищити допустимі граничні значення. З одного боку, це може привести до виникнення електричних дуг між сусідніми пластинами, а з іншого боку, поява високого потенціалу на окремих пластинах викликає різке підвищення напруги між щіткою та колекторними пластинами в міру їх віддалення від збіжного краю щітки. Таким чином, в умовах значного перевантаження в машині постійного струму з'являються комутаційні й потенційні причини для виникнення електричної дуги на колекторі. При цьому електричні дуги, що викликані комутаційними причинами, зливаються з дугами, які викликані потенційними причинами. Поширення вогню відбувається шляхом повторних запалювань дуги. Дуга, що з'являється під щіткою, розтягується електродинамічними силами та гасне, залишаючи за собою іонізований простір. Тому наступна дуга виникає в більш сприятливих умовах, вона

стає більш потужною і розтягується на більшу відстань по колектору. Нарешті дуга може розтягнутися до щіток протилежної полярності. Виникає так званий коловий вогонь, що являє собою коротке замикання кола якоря машини через електричну дугу на поверхні колектора (рис. 1.27, а).

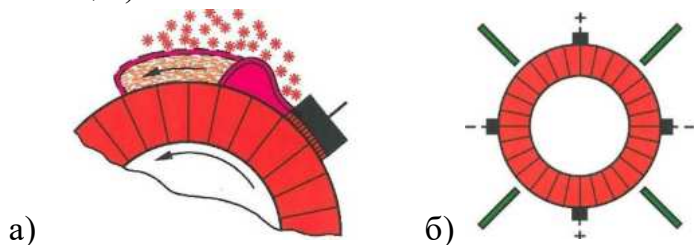


Рис.1.27 – Виникнення дуги (а) та спосіб її усунення (б)

Коловий вогонь викликає пошкодження поверхні колектора і щіток. В окремих випадках дуга може перекинутися й на корпус машини. Додаткові полюси та компенсаційна обмотка послаблюють загрозу виникнення колового вогню, але повністю її не усувають. Тому для захисту обмотки якоря від пошкодження електричною дугою у випадку виникнення колового вогню в електричних машинах, які працюють в умовах частих перевантажень, між колектором та обмоткою на якорі встановлюють ізолюючий екран(рис 1.27,б).

У деяких машинах застосовують повітряне дуття, яке здуває дугу в бік підшипника, захищеного теплостійкою ізоляційною перегородкою. Ефективним заходом проти пошкоджень від колового вогню є застосування швидкодіючих вимикачів, які відключають короткі замикання протягом 0,005...0,1 с. *Негативним наслідком*

комутації є виникнення радіоперешкод від роботи колекторних машин. Комутація створює електромагнітні коливання з частотою 1000...3000 Гц, що поширюються по електричній мережі, у яку ввімкнута машина. Ці коливання викликають радіоперешкоди, вони ускладнюють роботу радіоприймачів та іншої радіотехнічної апаратури.

При незадовільній комутації може статися так, що радіоприймання взагалі стає неможливим. Тому рівень індустриальних перешкод не повинен перевищувати значення, які визначені діючими нормами.

Радіоперешкоди поширюються двома шляхами: по ефіру (електромагнітне випромінювання) та через електромережу. Для заглушення перешкод, які поширюються по ефіру, електричні машини екранують. Як екран використовують заземлений корпус машини.

Якщо з боку колектора в машині є вікна, то їх необхідно закрити металевим ковпаком або сіткою, забезпечивши при цьому їх надійний контакт з корпусом машини. Для заглушення перешкод, які поширюються через мережу, застосовують симетрування обмоток та вмикання фільтрів.

Таблиця 1.1 - Визначення ступені іскріння

Ступінь іскріння	Характеристика ступеня іскріння	Стан колектора і щіток
1	Іскріння немає (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі й нагару на щітках
1 ¹ / ₄	Слабке іскріння під невеликою частиною щітки	Відсутність почорніння на колекторі й нагару на щітках.
1 ¹ / ₂	Іскріння приблизно на половині й більш поверхні щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, що усуваються легко протиранням поверхні колектора бензином, а також поява слідів нагару на щітках.
2	Іскріння під усім краєм щітки. Допускається тільки при короточасних поштовхах навантаження й перевантаження	Поява слідів почорніння на колекторі, не усувається протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.
3	Допускається тільки для моментів прямого (без реостатного) ввімкнення або реверсування машин, якщо при цьому колектор і щітки залишаються в стані, придатному для подальшої роботи.	Значне іскріння під усім краєм щітки з появою великих іскор, що вилітають, воно приводить до значного почорніння колектора, яке не усувається протиранням поверхні колектора бензином, і призводить до підгару й руйнування щіток.

Контрольні запитання

1. Які причини можуть викликати іскріння на колекторі?
2. Що таке комутація?
3. Як оцінюється ступінь іскріння і який бал вважається допустимим в електричних машинах?
4. Які ЕРС виникають в комутованій секції. Яка їх природа виникнення і відмінності?

5. Що таке прямолінійна комутація, чому її називають безіскровою?

6. Що таке сповільнена і прискорена комутація, чому для них характерне іскріння під щітками?

7. Чому доцільно зменшити реактивну ЕРС і як це можна зробити?

8. Що таке комутаційна ЕРС, чим вона, наводиться?

9. Навіщо необхідні додаткові полюси, які вимоги ставляться до їх магнітного кола?

10. Яку комутацію доцільно отримати при налагодженні додаткових полюсів? Як визначити полярність?

11. Що таке коловий вогонь; чому він може виникнути; як відвернути його появу?

12. Як можна налагодити додаткові полюси?

Частина 2 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

§ 2.1 Способи збудження електричних машин постійного струму

Робота й властивості електричних машин постійного струму (як генераторів, так і двигунів) в значній мірі залежать від способу збудження в них магнітного потоку. Дійсно, магнітний потік входить множником як у виразі ЕРС (2.1), так і у виразі електромагнітного моменту (2.3), тому необхідно знати, як створюється магнітний потік, від яких величин він залежить, як і з якою метою потрібно змінювати його значення.

Згідно з СТ РЕВ 169-75, за способом збудження машини постійного струму класифікують таким чином:

а) машини незалежного збудження, обмотка збудження яких живиться від стороннього джерела електричного струму;

б) машини паралельного збудження, обмотка збудження яких з'єднана паралельно з колом якоря;

в) машини послідовного збудження, обмотка збудження котрих з'єднана послідовно з колом якоря;

г) машини змішаного збудження, в яких є дві обмотки збудження, одна з яких з'єднана послідовно з колом якоря (інша може бути або незалежною, або, частіше, паралельною). Якщо МРС обмоток збудження мають один напрям, і таке їх ввімкнення називається узгодженим. Якщо ж МРС обмоток напрямлені в різні сторони, то ввімкнення називають зустрічним.

Струм, що протікає в обмотці збудження основних полюсів, створює основний магнітний потік Φ_0 . Властивості генераторів постійного струму визначаються в основному способом живлення їх обмоток збудження. В залежності від цього використовують декілька типів генераторів:

- з незалежним збудженням (рис. 2.1, а);
- з паралельним збудженням (рис. 2.1, б);
- зі змішаним збудженням (рис. 2.1, в);
- з послідовним збудженням (рис. 2.1, г)
- з постійними магнітами (рис. 2.1, д).

Розглянуті генератори мають подібну конструкцію і відрізняються лише виконанням обмотки збудження. Обмотки незалежного і паралельного збудження мають велике число витків і виготовляються з проводу малого перетину, а обмотки послідовного збудження мають мале число витків і виготовляються з проводу великого перетину. Усі вказані способи - це електромагнітне збудження, тому що магнітне поле створюється струмом, який проходить по обмотці полюсів.

Генератори малої потужності іноді виготовляють з постійними магнітами. Властивості таких генераторів близькі до властивостей генераторів з незалежним збудженням.

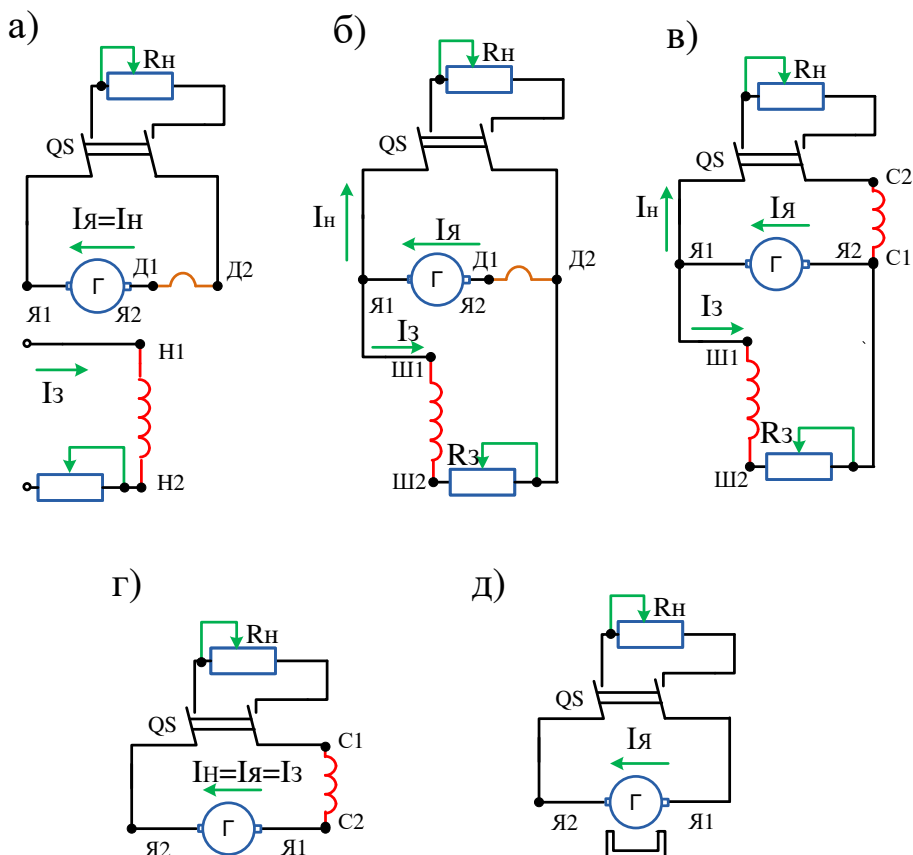


Рис. 2.1 – Електричні схеми генераторів: незалежного(а) паралельного(б) змішаного (в) послідовного (г) збудження та з постійним магнітом (д)

Основні рівняння. Рівняння ЕРС генератора. При обертанні якоря генератора в полі головних полюсів в його обмотці, відповідно до закону електромагнітної індукції, утворюється ЕРС:

$$E_я = C_e \Phi n , \quad (2.1)$$

де C_e - конструктивна стала машини ($C_e = pN/60a$);
 Φ - магнітний потік;
 n - швидкість обертів якоря.

Частина цієї ЕРС долає опір кола якоря і звичайно називається спадом напруги в колі якоря ($I_a R_a$), а та частина, що залишається, виводиться на затискачі генератора й називається напругою генератора U_g .

$$U_g = E_a - I_a \Sigma R_a, \quad (2.2)$$

де $\Sigma R_a = R_a + R_d + R_k + R_c + R_{sc}$,

R_a - опір обмотки якоря;

R_d - опір обмоток додаткових полюсів;

R_k - опір компенсаційної обмотки;

R_c - опір послідовної обмотки збудження;

R_{sc} - опір перехідного контакту між щіткою та колектором.

Залежно від конкретної схеми генератора частина опорів може бути відсутня. Струм якоря I_a зумовлений ЕРС E_a і завжди має з нею однаковий напрям.

Моменти генератора. До вала генератора прикладено момент первинного двигуна M_1 , під дією якого якор генератора обертається з частотою $n = \text{const}$. При цьому в обмотці якоря наводиться ЕРС, напрям якої визначаємо за правилом правої руки і в тому ж напрямі по провіднику протікає струм.

Електромагнітні сили (1.4), які утворюються відповідно до закону Ампера, створюють виникнення електромагніт- ного моменту, напрям якого буде

спрямований зустрічно відносно напрямку обертання якоря і діє зустрічно моменту первинного двигуна M_1 , тобто M_e є гальмівним.

$$M_e = C_m \Phi I_a, \quad (2.3)$$

де C_m – конструкційна стала моменту ($C_m = pN/2\pi a$)

На валу генератора діє також момент холостого ходу M_0 , що відповідає потужності, яку потрібно підвести до генератора в режимі холостого ходу, щоб скомпенсувати втрати в цьому режимі.

Рівняння потужностей генератора.

Добуток $U_a \times I_a = P_{em}$ - електромагнітна потужність, яка являє собою повну електричну потужність, що отримується в результаті перетворення механічної потужності. Частина цієї потужності витрачається в колі якоря на електричні втрати. У генераторах незалежного збудження ця потужність віддається в зовнішню мережу і є корисною потужністю генератора:

$$P_2 = U_a \times I_a \quad (2.4)$$

У генераторах паралельного та змішаного збудження корисна потужність, яка віддається в мережу, буде менша на значення втрат на збудження. До генератора від первинного двигуна підводиться механічна потужність. Більша частина цієї потужності перетворюється в електромагнітну, а друга частина витрачається в генераторі на покриття механічних втрат $p_{мех}$ (тертя в підшипниках, вентиляція), магнітних втрат у якорі $p_{ст}$ і додаткових втрат p_{δ} . Розглянуте перетворення потужності в генераторах постійного струму для наочності можна показати у вигляді енергетичної діаграми (рис. 2.2).

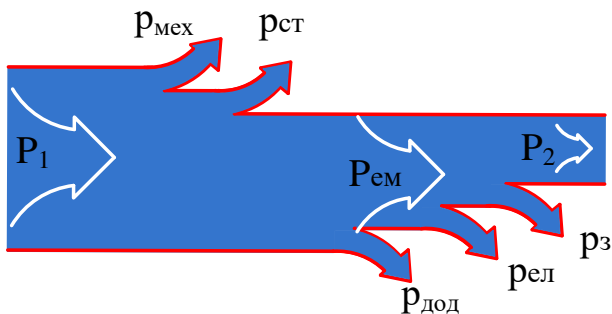


Рис. 2.2 – Енергетична діаграма генератора

Характеристики генераторів. Про властивості генераторів можна судити за їх характеристиками, які встановлюють залежності між основними величинами, що визначають роботу генераторів при експлуатації. Такими характеристиками для генераторів є:

- *характеристика холостого ходу* - залежність напруги на затискачах або ЕРС якоря від струму збудження за відсутності навантаження та сталій частоті обертання;

- *зовнішня* - залежність напруги на затискачах якоря від струму навантаження, коли струм збудження не регулюється;

- *регульовальна* - залежність струму збудження від струму навантаження при сталій нарузі на затискачах та сталій частоті обертання. Ця характеристика показує, як потрібно регулювати струм збудження, щоб при зміні навантаження напруга генератора не змінювалася;

- *навантажувальна* - залежність напруги на затискачах від струму збудження при сталому струмі навантаження та сталій частоті обертання.

Звернемо увагу, що всі характеристики знімаються при

незмінній швидкості обертів. Основним фактором, який визначає властивості генератора, є спосіб збудження.

§ 2.2 Особливості роботи генератора з незалежним збудженням

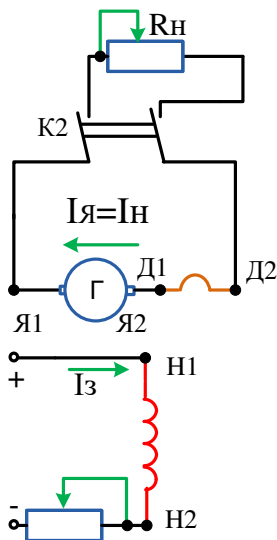


Рис. 2.3 - Електрична схема генератора з незалежним збудженням

Характеристику холостого ходу генератора знімають за схемою (рис.2.3) при вимкненому рубильнику К2. Зняття характеристики доцільно почати з мінімального значення струму збудження. При збільшенні та зменшенні струму збудження отримуємо дві дещо відмінних одна від одної кривих за рахунок явища гістерезису.

При знятті характеристики холостого ходу полярність напруги на обмотці збудження потрібно змінювати, щоб отримати повну гістерезисну петлю (рис.2.4, а).

За практичну характеристику холостого ходу приймають середню криву, ця характеристика в певному масштабі повторює магнітну характеристику машин і за нею можна визначити коефіцієнт насичення. Практичне значення характеристики холостого ходу полягає в тому,

що за нею можна судити про ступінь насичення магнітного кола машини при номінальному магнітному потоці. Крім того, ця характеристика є основою для дослідження експлуатаційних властивостей генератора. При $I_z=0$ в обмотці якоря потоком залишкового магнетизму наводиться залишкова ЕРС, яка становить $2\div4\%$.

Зовнішню характеристику (рис.2.4,б) ГПС знімають за схемою (рис.2.3) при увімкненому рубильнику К2.

Із збільшенням струму навантаження напруга на затискачах якоря дещо зменшується з двох причин: внаслідок збільшення падіння напруги в колі якоря $I_a \times R_a$ та зменшення ЕРС E_a в результаті зменшення магнітного потоку під впливом поперечної реакції якоря.

Зовнішню характеристику рекомендують знімати при максимальному збудженні. У цьому випадку при переході від холостого ходу до номінального режиму напруга спадає на цілком визначену величину, яка називається номінальною зміною напруги генератора.

Регулюючу характеристику (рис.2.4,в) знімають, змінюючи струм навантаження за допомогою реостата R_n (рис. 2.3) та одночасно регулюючи за допомогою реостата R_z струм збудження так, щоб напруга генератора не змінювалася. Із збільшенням струму навантаження струм збудження потрібно дещо збільшувати, щоб компенсувати вплив спаду напруги та розмагнічувальної дії реакції якоря. За виглядом навантажувальна характеристика схожа з характеристикою холостого ходу, але проходить нижче останньої внаслідок спаду напруги в колі якоря та впливу реакції якоря. Практичне значення

навантажувальної характеристики (рис. 2.4,г) полягає в тому, що вона дозволяє кількісно визначити розмагнічувальну дію реакції якоря та дослідити залежність її від насичення машини та струму якоря.

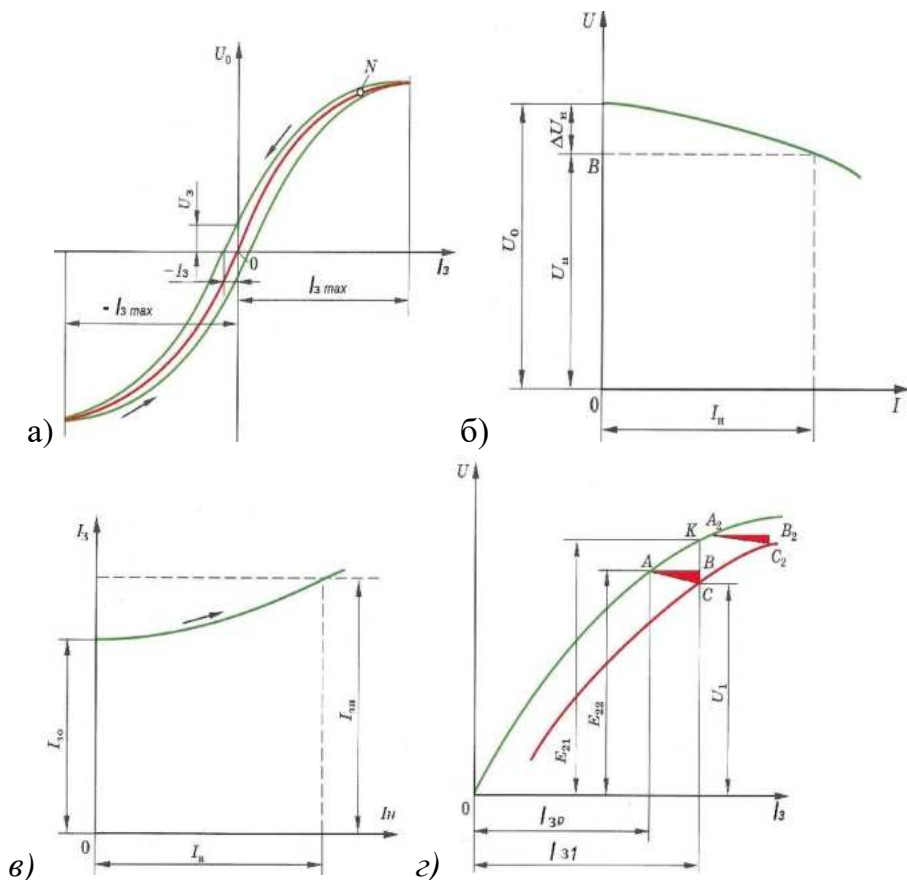


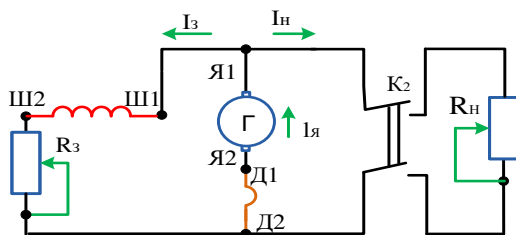
Рис.2.4 - Характеристики генератора незалежного збудження:
характеристика холостого ходу (а), зовнішня характеристика (б),
регулювальна характеристика(в) і навантажувальна (г)

§ 2.3 ГПС з паралельним збудженням

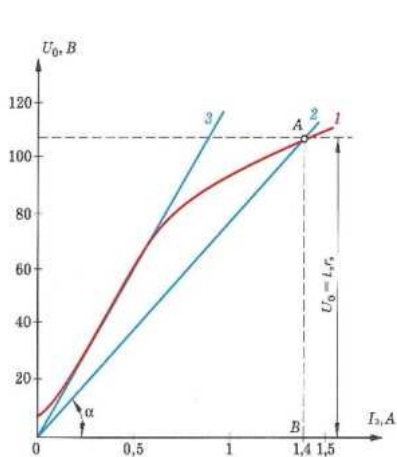
Самозбудження генератора. Генератор паралельного збудження працює за схемою (рис.2.5,а) із самозбудженням і не потребує для свого збудження стороннього джерела живлення. Обмотка збудження отримує живлення безпосередньо від самого генератора. Але самозбудження можливе лише при виконанні певних умов. Для виникнення цього процесу потрібно, щоб у генераторі був невеликий (2...3% від номінального) потік залишкового намагнічування $\Phi_{зал}$.

Якщо, замкнувши коло збудження, привести генератор в обертання з номінальною частотою обертання при $I_n = 0$, то на його затискачах з'явиться невелика напруга (приблизно 2...3% від U_n) і по колу збудження почне протікати невеликий струм, який створюватиме додатковий потік намагнічування $\Phi_{зал}$. Залежно від напрямку струму в обмотці збудження, потік Φ_I може бути спрямований або назустріч потоку $\Phi_{зал}$, або в одному напрямі з ним.

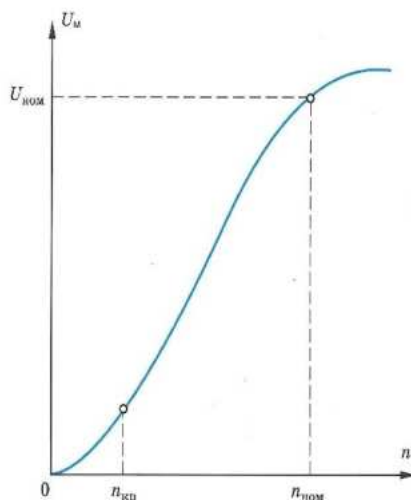
Дія магнітних потоків $\Phi_{зал}$ та Φ_I в одному напрямі – обов'язкова умова самозбудження. При узгодженому напрямі обох потоків результуючий потік збудження збільшується, що приводить до збільшення індукованої в якорі ЕРС, а це, в свою чергу, викликає подальше зростання струму I_z та потоку збудження і т. д. Тобто в точці А (рис.2.5,б) процес самозбудження закінчується, а в колі збудження встановлюється сталий струм, якому відповідає стала напруга на затискачах генератора.



а)



Процес самозбудження:
 1 – характеристика неробочого ходу;
 2 – падіння напруги в обмотці збудження $I_z R_z = f(I_z)$;
 3 – пряма $I_z R_z = f(I_z)$ – дотична до характеристики неробочого ходу



Характеристика самозбудження

б)

в)

Рис. 2.5 - Електрична схема (а) та характеристики самозбудження (б, в)

При збільшенні опору (тобто при збільшенні кута α) точка А буде ковзати по характеристиці холостого ходу у напрямі до точки 0. При деякому опорі, який називається критичним опором, пряма 2 буде дотичною до початкової частини характеристики холостого ходу (пряма -3 на рис.2.5,б). У цих умовах генератор практично не

збуджується.

Якщо в процесі роботи генератора збільшити опір кола збудження, то відбудеться розмагнічування машини і її ЕРС зменшиться. Отже, для самозбудження необхідно виконання таких умов і наявність залишкового магнітного потоку, опір в колі збудження менший критичного, а частота обертів якоря більша критичної.

Характеристики генератора з паралельним збудженням знімають за схемою (рис. 2.5,а). На відміну від генератора незалежного збудження в цього генератора струм якоря I_a не дорівнює струму навантаження I_n . При вимкненому навантаженні $I_n=0$, але $I_a=I_z$, тому характеристика холостого ходу генератора з паралельним збудженням по суті та ж сама, що й при незалежному рис.2.6,а.

Зовнішня характеристика генератора з паралельним збудженням (крива 1 на рис.2.6,б) суттєво відрізняється від характеристики при незалежному збудженні (рис.2.4,а) і розташовується нижче.

Пояснюється це тим, що в генераторі паралельного збудження крім двох причин, які викликають зменшення напруги із збільшенням навантаження (спад напруги в колі якоря та розмагнічувальна дія реакції якоря), існує ще третя причина – зменшення струму збудження при зменшенні U_z , в результаті перших двох причин.

При повністю введеному опорі R_n залишковий магнітний потік наводить в обмотці якоря невелику ЕРС, яка викличе відносно малий струм короткого замикання $I_{кр}$, звичайно менший, ніж номінальний струм генератора.

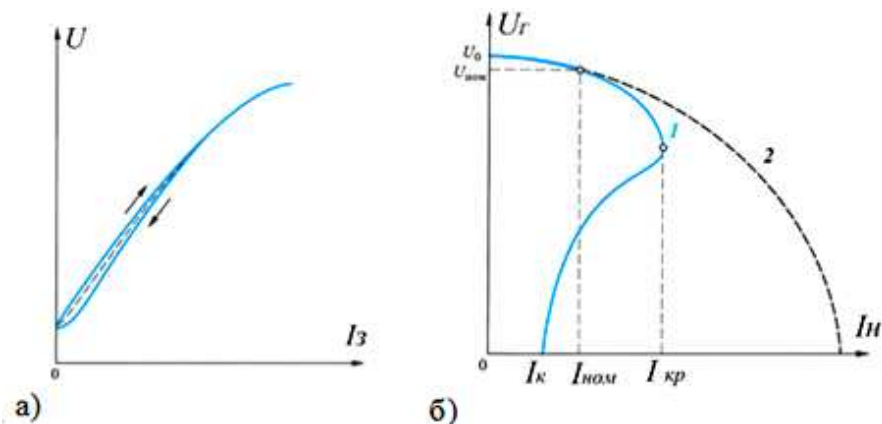


Рис. 2.6 - Характеристики генератора з паралельним збудженням: а) характеристика холостого ходу; б) зовнішня характеристика

Крива 1 відповідає роботі генератора при повільній зміні струмів і напруги. Але в реальних умовах можливе так зване раптове коротке замикання (крива -2 на рис.2.6,б), тобто відносно швидкий перехід до режиму КЗ. При цьому магнітний потік генератора не встигає миттєво змінитися і в перші моменти часу раптового КЗ він (потік) продовжує залишатися майже таким за значенням, які і до моменту КЗ. Відповідно значення ЕРС відносно велике, і струм раптового КЗ устигає досягнути за 0,1...0,2с значення у 8...12 разів більшого за номінальне значення струму якоря $I_{я}$, після чого він відносно швидко спадає. При такій різкій зміні струму якоря на валу генератора виникає значний гальмівний момент, а на колекторі з'являється сильне іскріння, яке може перейти в коловий вогонь.

Таким чином, раптове КЗ генераторів паралельного збудження є небезпечним, як і в інших електротехнічних

пристроях та електричних колах.

Регулювальна та навантажувальна характеристики ГПС паралельного збудження практично такі ж, як в генератора незалежного збудження, тому що спад напруги у колі якоря практично не впливає на напругу на затискачах генератора.

Як висновок зауважимо, що характеристики та властивості генераторів незалежного та паралельного збудження мало відрізняються між собою. Єдина суттєва відмінність полягає в тому, що зовнішні характеристики дещо розходяться.

§ 2.4 Генератори послідовного збудження

Самозбудження генератора відбувається, якщо опір навантаження буде менше критичного. На форму зовнішньої характеристики суттєво впливає умова, що $I_z = I_a$. При малих навантаженнях, коли струми I_a та I_z малі, машина ненасичена і її ЕРС змінюється пропорційно струму I_z . Спад напруги та розмагнічувальна дія реакції якоря практично також змінюються пропорційно струму. Тому напруга U_a ($U_a = C_e \Phi n - I_a \Sigma_{\Gamma a}$) зростає пропорційно струму I_a . Нагадаємо, що характеристики знімаються при $n = const$. При значних струмах відбувається насичення магнітного кола машини, внаслідок чого ЕРС буде змінюватися мало, тому й зростання напруги уповільнюється. При дуже великих струмах через зростання спаду напруги та розмагнічувальної дії реакції якоря напруга почне зменшуватися.

Внаслідок сильної залежності напруги від струму

навантаження на генератори послідовного збудження, за винятком окремих спеціальних випадків, не застосовуються.

§ 2.5 Генератор змішаного збудження

Характеристики можуть бути зняті за схемою (рис. 2.7,а).

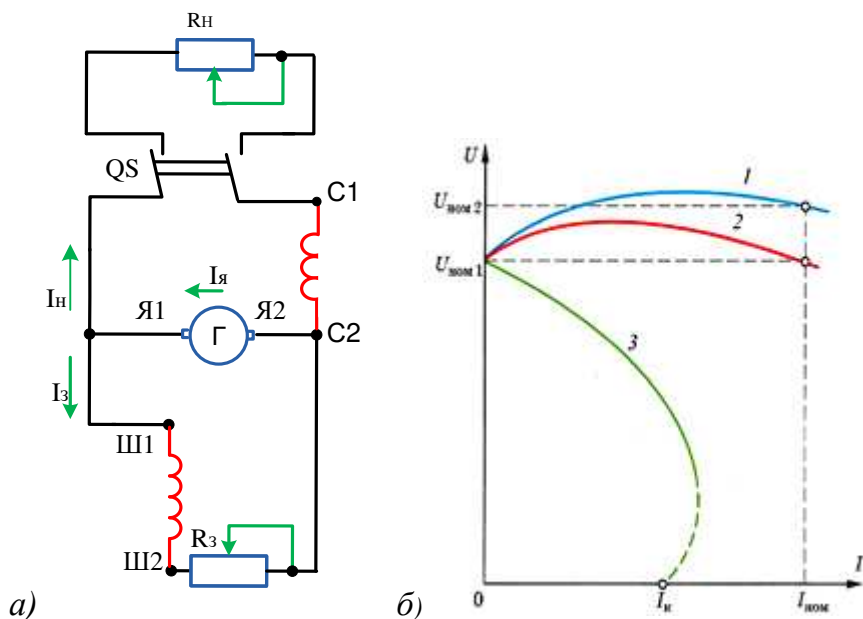


Рис. 2.7 - Електрична схема (а) та зовнішні характеристики (б) генератора зі змішаним збудженням при різних включеннях

Самозбудження генератора відбувається так, як і в генератора паралельного збудження.

Струм якоря $I_{\text{я}} = I_{\text{н}} + I_{\text{з}}$.

Найбільше практичне застосування мають генератори з узгодженим вмиканням обмоток збудження (магнітні потоки паралельної та послідовної обмоток збудження

діють в одному напрямі, тобто складаються).

Більшу частину МРС збудження машини створює паралельна обмотка. За рахунок підмагнічувальної дії послідовної обмотки напруга на затискачах при навантаженні (*крива-2* на рис.2.7,б) отримується дещо більшою, ніж у генератора з паралельним збудженням. Звичайно послідовну обмотку розраховують так, щоб напруга при номінальному навантаженні дорівнювала напрузі в режимі холостого ходу.

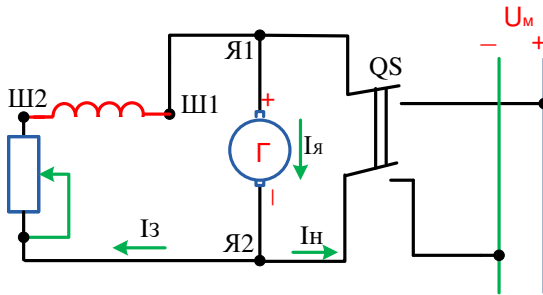
Збільшуючи кількість витків послідовної обмотки, можна отримати характеристику, при якій зовнішня характеристика розташовується вище (*крива-1* рис. 2.7,б) і генератор може компенсувати не тільки спад напруги в ньому самому, а й у лінії передачі, чим досягається сталість напруги на затискачах споживача.

При слабкій послідовній обмотці зовнішня характеристика має спадаючий характер. Зауважимо, що ефективність дії послідовної обмотки залежить від насичення магнітного кола машини. МРС послідовної обмотки при сильному насиченні буде давати невелике збільшення потоку та ЕРС, тому навіть при достатньо сильній обмотці або при великих навантаженнях напруга на затискачах машини буде зменшуватися із збільшенням струму I_n .

Якщо послідовну обмотку збудження увімкнути так, щоб її МРС була спрямована проти МРС паралельної обмотки, то зовнішня характеристика генератора при відповідній (досить значній) кількості витків послідовної обмотки буде круто спадаючою (*крива -3* на рис. 2.7,б). Зустрічне вмикання обмоток застосовують у зварювальних генераторах, та на інших спеціальних машинах, де потрібно мати круто спадаючу

Характеристики холостого ходу та навантажувальна генератора із змішаним збудженням мають такий же вигляд, як і для генератора паралельного збудження, але зауважимо, що при досить сильній послідовній обмотці навантажувальна характеристика може проходити й вище характеристики холостого ходу.

В експлуатаційних умовах виникає необхідність жити споживачів від двох або декількох генераторів, які при цьому працюють на загальну мережу. У цьому випадку в періоди малих навантажень можна частину генераторів відключити, чим досягається економія на експлуатаційних витратах.



Якщо є потреба забезпечити безперервне живлення споживачів за всіх умов, то потрібно мати резервний генератор. Необхідна потужність резервного генератора при спільній роботі декількох генераторів буде менша. Це дає можливість також виведення генераторів у плановий або аварійний ремонт без суттєвого порушення безперервного живлення споживачів.

Як правило, паралельне з'єднання генераторів застосовують, коли з одним проводом мережі з'єднуються затискачі однакової полярності всіх працюючих генераторів.

Послідовне з'єднання, коли з одним проводом мережі з'єднується один із затискачів генератора, а другий затискач з'єднується із затискачем протилежної полярності другого генератора, використовується дуже рідко.

Розглянемо паралельну роботу генератора з паралельним або незалежним збудженням з мережею нескінченно великої потужності, тобто за умови, що напруга мережі незмінна.

Для підключення генератора до мережі потрібно привести якір генератора в обертання з номінальною частотою, перевірити відповідність полярності щіток генератора та проводів мережі й встановити такий струм збудження, при якому напруга генератора дорівнює напрузі мережі. При забезпеченні цих умов вмикання генератора не буде супроводжуватися кидком струму.

Навантаження генератора. Щоб навантажити генератор, який підключений до мережі, необхідно підвищити його ЕРС у порівнянні з E_o . Це можна зробити шляхом збільшення частоти обертання якоря або струму збудження, але зручніше впливати на струм збудження. При випадковому збільшенні струму навантаження вище $I_{н2}$ напруга генератора $U_{яг}$ стає меншою за напругу мережі U_m , струм навантаження почне зменшуватися, наближаючись до сталого значення $I_{н2}$.

Контрольні запитання і задача

1. Як класифікують електричні машини постійного струму за способом збудження?
2. Як маркують виводи різних обмоток машин постійного струму?
3. Які характеристики визначають властивості генераторів постійного струму?
4. Що таке номінальна зміна напруги, чим вона викликана і чому у генератора паралельного збудження вона більша, ніж у генератора незалежного збудження?
5. Які умови необхідні для самозбудження генераторів постійного струму?
6. Як можуть вмикатися обмотки збудження генератора змішаного збудження і який вигляд в залежності від цього матимуть його зовнішні характеристики?
7. Генератор паралельного збудження має напругу $U_r = 230$ В при струмі навантаження $I = 220$ А. Визначити струм якоря I_a і корисну потужність, якщо опір обмотки збудження $R_{зб} = 23$ Ом.

§ 3.1 Основні рівняння та характеристики

Властивості двигунів. Теоретично будь-яка електрична машина енергетично зворотна, тобто може працювати як в режимі генератора, так і в режимі двигуна. Всі властивості двигуна можуть бути вивчені за допомогою трьох основних величин, пов'язаних такими виразами:

а) підведена напруга (зрівноважується проти-ЕРС в якорі і внутрішнім падінням напруги)

$$U = E + I_{\text{я}} \Sigma R \quad , \quad (3.1)$$

де $\Sigma R = R_{\text{я}} + R_{\text{Д.П}} + R_{\text{к.о.}}$ - сума опорів якоря, додаткових полюсів, компенсаційної обмотки;

б) проти-ЕРС E , що виникає в якорі, (в подальшому будемо називати її просто ЕРС, за законом Ленца вона спрямована проти струму якоря):

$$E = c_e n \Phi \quad (3.2)$$

в) електромагнітний обертальний момент:

$$M = c_M I_{\text{я}} \Phi \quad (3.3)$$

З рівняння (3.3) видно, що зміну напрямку обертального моменту (*реверсування двигуна*) можна виконати шляхом зміни напрямку струму або магнітного потоку. Практично це виконують перемиканням виводів обмотки якоря або полюсів, але не одночасно.

Перетворивши виразу (3.1) знаходимо величину струму:

$$I_{\text{я}} = (U - E) / \Sigma R \quad (3.4)$$

Різниця у значеннях напруги та ЕРС невелика, звичайно

вона становить $E=(0,92....0,96)U$, причому більша величина відноситься до машини більшої потужності.

Підставивши (3.2) у рівняння (3.1), розв'яжемо його відносно частоти обертання та отримаємо вираз:

$$n = \frac{U - I_{\Sigma} \sum R}{c_e \Phi} \quad (3.5)$$

Робота і властивості двигунів, які визначаються цими виразами, залежать від способу його збудження. Так, машини незалежного і паралельного збуджень, що підключені до мережі з постійною напругою, можуть переходити з генераторного режиму в режим двигуна і навпаки.

Дійсно, як впливає з виразу (3.4), якщо $E > U$ (збільшена частота обертання n), то струм змінить свій напрям (знак), тобто машина перейде в режим генератора. При цьому електромагнітний момент, згідно з (3.3), протилежний напрямку обертання, стане гальмівним. Таким чином, змінюючи значення E (більше чи менше), машину незалежного чи паралельного збудження можна переводити відповідно в режим двигуна, або генератора.

Рівновага моментів і потужностей. Взаємозворотне перетворення електричної і механічної енергії, згідно з законом збереження енергії, не може здійснюватися без втрат останньої. Втрати енергії, виділяються в машині у вигляді тепла і являють собою різницю між підведеною до двигуна електричною і механічною енергією, що віддається ним, їх співвідношення визначає коефіцієнт корисної дії (ККД).

При встановленому режимі роботи на двигун діють такі

моменти:

- 1) обертальний електромагнітний момент M ;
- 2) момент холостого ходу M_0 ;
- 3) корисний момент M_2 .

Момент M_0 існує при будь-якому режимі роботи і визначається тертям в підшипниках, щіток по колектору, частин, що обертаються в повітрі, а також втратами в сталі. В порівнянні з номінальним корисним моментом величина дуже мала.

Сума моментів холостого ходу і корисного має назву *статичного моменту* $M_{cm} = M_0 + M_2$.

Значить, при встановленому режимі роботи обертальний момент двигуна і статичний момент опору на його валі знаходяться у взаємній рівновазі:

$$M = M_0 + M_2 + M_{cm} \quad (3.6)$$

Якщо до двигуна підведена повна потужність, то створюються втрати в якірному колі (втратами в паралельній обмотці збудження, через їх незначну величину, нехтуємо), тоді з урахуванням виразу (3.1)

$$P_1 - I_{\text{я}}^2 \sum R = UI_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 \sum R = I_{\text{я}}(U - I_{\text{я}} \sum R) = EI_{\text{я}} = P_{\text{я}} \quad (3.7)$$

$$\text{отже } P_{\text{я}} = P_{\text{ем}}.$$

Відомо, що потужність - це добуток моменту на кутову швидкість $\Omega = 2\pi n$. Тому, помноживши всі члени рівняння (3.6) на Ω отримаємо:

$$M\Omega = M_0\Omega + M_2\Omega$$

$$\text{або } P_{\text{ем}} = p_0 + P_2 = P_{\text{я}}$$

Звідси корисна механічна потужність на валу двигуна:

$$P_2 = P_{\text{я}} - p_0 \quad (3.8)$$

тобто корисна механічна потужність менша електромагнітної (потужності якоря) на величину P_0 , необхідну для перекриття втрат на тертя і в сталі.

Позначивши потужність втрат в якірному колі $p_m = I_{\text{я}}^2 \sum R$ і прийнявши до уваги рівняння (3.7) і (3.8), запишемо новий баланс потужностей:

$$P_2 = P_1 - p_m - p_0 \quad (3.9)$$

тобто корисна потужність двигуна дорівнює підведений за виключенням потужності електричних втрат на тертя сталі.

Вираз (3.7) може бути записаний у такому вигляді:

$$P_1 = P_{\text{я}} - I_{\text{я}}^2 \sum R = P_{\text{ем}} + I_{\text{я}}^2 \sum R$$

$$\text{звідки} \quad UI_{\text{я}} = M\Omega + I_{\text{я}}^2 \sum R \quad (3.10)$$

$$\text{або} \quad (U - I_{\text{я}} \sum R)I_{\text{я}} = M\Omega \quad (3.10, \text{a})$$

Аналіз виразів (3.10) і (3.10,а) дозволяє зробити дуже важливі висновки, а саме: *зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту зростає потужність в колі якоря $UI_{\text{я}}$, тобто підведена потужність P_1 . Але якщо напруга $U = \text{const}$, то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму $I_{\text{я}}$. Це зростання струму, тобто збільшення підведеної електричної енергії, здійснюється автоматично, без будь-якого впливу ззовні. Електричний двигун сам "регулює" споживання з мережі такого струму,*

щоб зберігалася рівність (3.10) і (3.10,a). Цим він принципово відрізняється від двигунів внутрішнього згоряння.

Основні характеристики. Властивості двигунів визначаються їх характеристиками, котрі показують взаємозалежність між різними величинами у виразах (3.1) - (3.5). Таких робочих характеристик декілька, і всі вони мають одну загальну особливість, вони знімаються при незмінній, як правило, номінальній напрузі на виводах двигуна, тобто підведена напруга $U = const$, струм збудження при цьому також є незмінним і номінальним, тобто $I_z = I_{z,ном}$.

Згідно з ГОСТ 2582-81 основними робочими характеристиками електричних двигунів є:

- а) *швидкісна характеристика*-залежність частоти обертання від струму якоря;
- б) *моментна характеристика* – залежність обертового моменту від струму якоря;
- в) *механічна характеристика* - залежність між обертовим моментом і частотою обертання;
- г) *характеристика ККД* - залежність ККД на валу двигуна від корисної потужності.

Вигляд і особливості останньої характеристики однакові для всіх електричних машин і трансформаторів.

Інші характеристики мають похідне значення, не є настільки визначальними і можуть бути отримані з названих чотирьох.

На практиці дуже важливо вміти розрахувати обертовий момент двигуна:

$$M = P_{\text{я}} / \Omega = P_2 / 2\pi n .$$

Якщо потужність виражена у ватах, а кутова швидкість в рад/с (або частота обертання в об/с), то момент виразиться в ньютон-метрах (Н·м):

$$M = 0,159 P_2 / n \quad (3.11)$$

Коли частоту обертання виражають в об/хв, тоді отримаєм вираз: $M = 9,55 P_2 / n$ (3.11,а)

§ 3.2 Запуск двигунів в хід

Опір якорного кола машин середньої та великої потужності мають незначні величини, приблизно

$\Sigma R_{\text{я}} = 0,1 \dots 0,2$ Ом. При поданні номінальної напруги і застосуванні прямого запуску в хід, в момент включення пусковий струм визначається по формулі:

$$I_n = U / \Sigma R_{\text{я}}$$

В даному випадку він буде перевищувати номінальний в десятки разів. Такий струм викличе появу за надто великого обертового моменту (3.3) і реактивної ЕРС, що створює небезпеку пошкодження валу і призведе до потужного іскріння під щітками. В той же час номінальний струм цього двигуна, згідно з (3.4)

$$I_n = U - 0,96U / \Sigma R_{\text{я}}$$

З цієї причини прямий запуск двигуна неможливий. Вийнятки з правил складають мікромашини, в котрих відносно великий опір $\Sigma R_{\text{я}}$.

Зменшити струм запуску можна, застосувавши *реостатний запуск*, коли послідовно в коло якоря вмикають пусковий реостат (рис. 3.1).

В цьому випадку, згідно з (3.4)

$$I_{я.зан} = \frac{U}{\sum R + r_{n.p}} \quad (3.12)$$

Значення опору пускового реостату $r_{n.p}$ вибирають таким чином, щоб $I_{я.зан} = (1,8 \div 2,5) I_{я.ном}$, тобто

$$r_{n.p} = \frac{U}{(1,8 \div 2,5) I_{я.ном}} - \sum R$$

По мірі того, як двигун набере швидкість, разом з частотою обертання n зростає ЕРС E , струм якоря знижується і дорівнює

$$I_{я} = \frac{U - E}{\sum R + r_{n.p}} \quad (3.13)$$

Для того, щоб запуск двигуна не був затяжним, ЕРС має наростати якомога швидше, а для цього магнітний потік і струм збудження мають бути максимальними.

Перед запуском двигуна необхідно важіль P реостата поставити на неробочий контакт «О» (див. рис. 3.1). Потім вмикають рубильник, переводять важіль на перший проміжний контакт 1 і коло якоря двигуна стає ввімкненим в мережу через резистор з опором

$$r_{n.p} = r_1 + r_2 + r_3 + r_4$$

Одночасно через важіль P , планку Π і контакт III в мережу вмикається обмотка збудження, струм в якій впродовж всього періоду запуску не залежить від положення важеля P , бо опір планки Π в порівнянні з опором обмотки збудження такий малий, що ним нехтують.

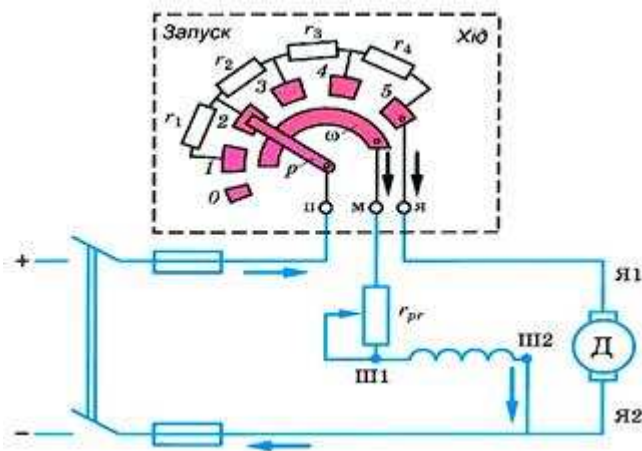


Рис. 3.1 - Схема запуску двигуна паралельного збудження

Послідовність запуску. Впевнившись, що важіль пускового реостату знаходиться в нульовому положенні, а важіль регулювального резистора в колі збудження – в положенні, при якому його опір мінімальний, потрібно замкнути вимикач і перевести важіль пускового реостату з нульового положення в перше, потім (по мірі зростання швидкості двигуна) переключати плавно в наступне положення до повного вимикання резистора (положення 5). Процес запуску завершений. Описаний запуск є неекономічний, особливо для двигунів середньої й великої потужності через великі розміри і дорожнечу пускових реостатів і, головне, через великі втрати енергії в них.

В сучасних пристроях, у тому числі й на електровозах, застосовують запуск шляхом плавного підвищення напруги на двигуні, починаючи від мінімального, що вибирається за значенням допустимого струму запуску. Таке підвищення напруги виконують за допомогою спеціальних перетворювальних (тиристорних) пристроїв рис. 3.2.

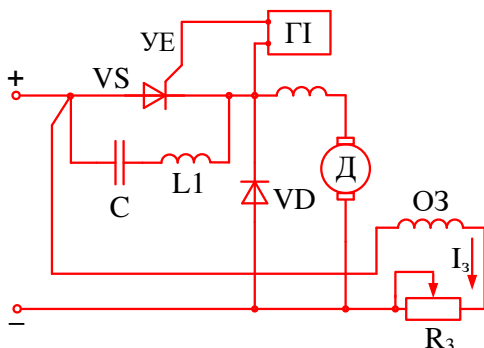


Рис. 3.2 -Тиристорний пуск двигуна постійного струму

§ 3.3 Двигун паралельного збудження

У цьому двигуні струм збудження не залежить від струму якоря, тому що обмотка збудження під'єднана паралельно з обмоткою якоря до мережі.

Швидкісна характеристика $n = f(I_{\text{я}})$. Її вигляд визначається рівнянням (3.5), яке в загальному випадку, коли в коло якоря ввімкнений резистор запуску опором r_{np} має вигляд кривої - 2 рис. 3.3, б.

$$n = \frac{U - I_{\text{я}}(\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi} \quad (3.14)$$

Нагадаємо, що при незмінному струмі збудження і нехтуванні розмагнічуючої дії реакції якоря, магнітний потік $\Phi = const$.

Розділимо почленно чисельник на знаменник рівняння (7.14), тоді отримаємо:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_{\text{я}} (\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n, \quad (3.15)$$

де $n_0 = U/(c_e \Phi) = \text{const}$ носить назву *ідеальної частоти обертання* при холостому ході, тому що відповідає струму якоря $I_{\text{я}} = 0$;

$$\Delta n = \frac{I_{\text{я}} (\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi} \quad - \text{ зменшення частоти обертання,}$$

зумовлене сумарним падінням напруги у всіх резисторах якірного кола.

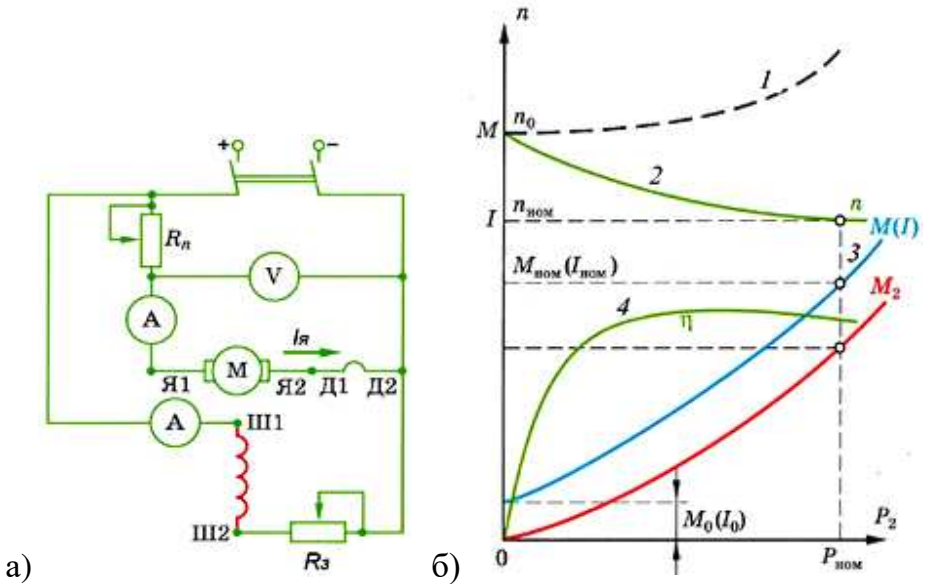


Рис. 3.3 - Електрична схема (а) двигуна паралельного збудження та робочі характеристики (б)

Величина Δn , тобто сума $(\sum R + r_{n.p})$, визначає нахил швидкісної характеристики, яка, як видно з рівняння (3.15), має лінійний вигляд. Якщо резистора в колі якоря немає, то характеристика носить назву *природньої* і має *жорсткий*

вигляд (характеристика 2 на рис. 3.3, б).

Зменшення частоти обертання за звичайною характеристикою можна виразити у відсотках:

$$\Delta n = \frac{n - n_{\text{поч}}}{n_{\text{ном}}} 100 ,$$

звичайно ця величина незначна і складає 3-5%.

Моментна характеристика $M = f(I_{\text{я}})$.

Ця характеристика може бути отримана з рівняння (3.3) при умові $\Phi = \text{const}$:

$$\text{тоді} \quad M = c_{\text{м}} I_{\text{я}} \Phi = c'_{\text{м}} I_{\text{я}} , \quad (3.16)$$

де $c'_{\text{м}} = c_{\text{м}} \Phi$ - конструктивна стала.

Як бачимо, вираз (3.16) - рівняння прямої лінії. Зі зростанням струму якоря обертальний момент лінійно зростає (див. рис.3.3, б) характеристика 3.

Механічна характеристика $n = f(M)$.

Для отримання її аналітичного виразу підставимо у рівняння (3.15) значення струму (3.3), тобто $I_{\text{я}} = M / (c_{\text{м}} \Phi)$;

$$\text{тоді} \quad n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{M(\sum R + r_{\text{н.р}})}{c_e c_{\text{м}} \Phi^2} = n_0 - \Delta n' , \quad (3.17)$$

де $\Delta n'$ - зменшення частоти обертання викликане зростанням навантаження на валу двигуна.

Як бачимо, рівняння (3.17) аналогічне (3.15), тому механічна характеристика (рис. 3.4, а) з вигляду аналогічна швидкісній також є природня (1) і сімейство штучних (2;3) характеристик, нахил яких залежить від значення $r_{\text{н.р}}$.

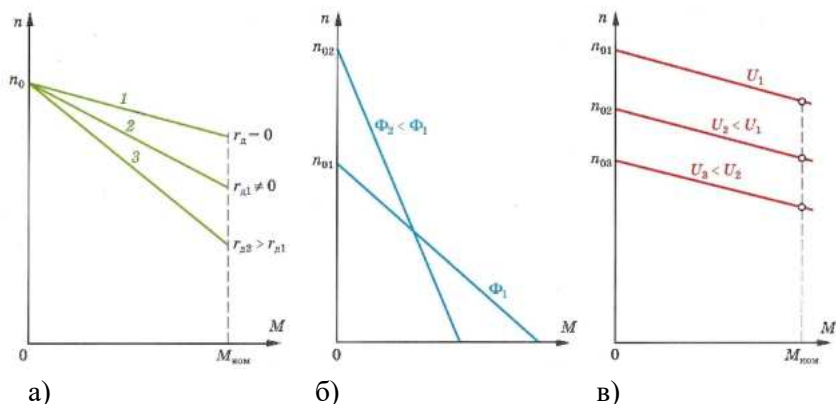


Рис. 3.4 - Механічні характеристики двигуна паралельного збудження: а) при зміні опору; б) при зміні магнітного поля; в) при зміні напруги

При наявності резистора в колі якоря характеристики називаються штучними, їх кут нахилу зростає (вони стають більш “м’якими”) зі зростанням значення $r_{r.n}$ (так, $r_{r.n} > r_{r.p2}$).

До цього часу ми розглядали характеристики без врахування розмагнічуючої дії реакції якоря, в результаті якого магнітний потік Φ_o зменшується. Звичайно це зменшення не дуже велике, але може виявитися, що зменшення знаменника у виразах (3.14) і (3.17) буде проходити швидше, ніж зменшення чисельника (це стосується звичайної характеристики, коли $r_{n.p} = 0$).

У цьому випадку виникає небажане для машини явище: зі зростанням навантаження (струму I_n і моменту M) частота обертання буде також зростати (штрихова лінія 1 на рис. 3.3,б). Очевидно, цей процес зупинитися не може, чим більша частота обертання, тим більший обертальний момент розвиває двигун, що призводить до зростання частоти

обертання і т.д. У цьому випадку кажуть, що двигун йде "в рознос".

Щоб забезпечити швидкісній і механічній характеристикам спадаючий характер, застосовують *стабілізуючу* обмотку збудження, яка має два-три витка і вмикається послідовно в коло якоря. Ця обмотка зі зростанням струму створює магнітний потік, що компенсує розмагнічуючу дію реакції якоря.

Аналіз характеристик на рис.3.3,б та рис. 3.4 дозволяє зробити висновок про те, що двигуни паралельного збудження потрібно застосовувати у тих електроприводах, в яких при зміні навантаження частота обертання повинна підтримуватися практично незмінною.

§ 3.4 Двигун незалежного збудження

У випадку, якщо обмотка якоря двигуна і обмотка збудження під'єднані до джерел живлення з різними напругами, його називають двигуном незалежного збудження (рис. 3.5).

Такі двигуни застосовуються в електроприводах, де вони живляться від генераторів чи напівпровідникових перетворювачів.

Механічні й робочі характеристики двигуна незалежного збудження аналогічні до характеристик двигуна паралельного збудження, тому що в них струм збудження I_3 також не залежить від струму якоря $I_я$.

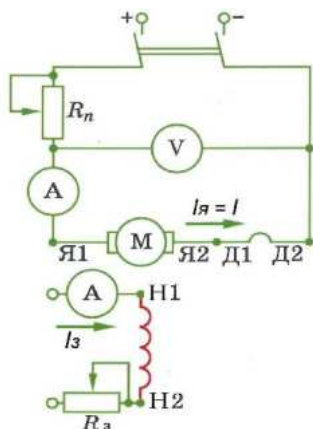


Рис. 3.5 - Електрична схема двигуна незалежного збудження

§ 3.5 Двигун послідовного збудження

У цьому двигуні обмотка збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря, тобто $I_з = I_я$, тому магнітний потік Φ є деякою функцією струму якоря (рис. 3.6,а). Для подальшого вивчення властивостей двигуна доцільно згадати магнітну характеристику (рис.1.21) і подати її у вигляді трьох ділянок:

а) у початковій "ненасичений" частині існує лінійна залежність $\Phi = f(I_я)$, тобто $\Phi = c_\Phi I_я$ при $I_я < (0,8 \div 0,9)I_{я.ном}$;

б) при дуже великих навантаженнях (правіше точки С) можна вважати, що магнітний потік залишається незмінним, тобто $\Phi = const$;

в) третя ділянка – перехід від лінійного "ненасиченого" до "насиченого", де між потоком Φ і струмом $I_я$ існує

складна нелінійна залежність.

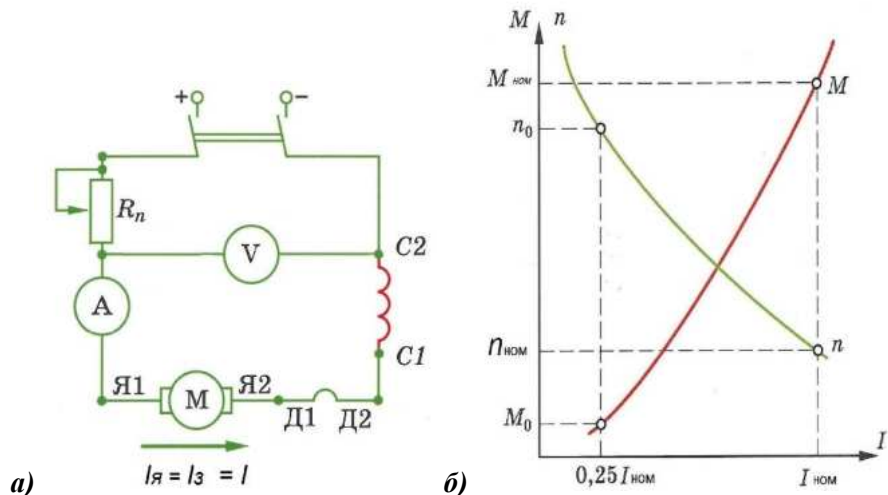


Рис. 3.6 - Електрична схема (а) двигуна послідовного збудження та робочі характеристики двигуна (б)

Швидкісна характеристика $n = f(I_{\text{я}})$. Будемо вважати, що магнітне поле двигуна ненасичене, або насичене дуже слабо, тобто $\Phi = c_{\phi} I_{\text{я}}$. Підставимо це значення магнітного потоку в рівняння швидкісної характеристики (3.5) і розділимо почленно чисельник та знаменник:

$$\text{тоді} \quad n = \frac{U}{c_e c_{\phi} I_{\text{я}}} - \frac{\sum R}{c_e c_{\phi} I_{\text{я}}} = c_1 \frac{U}{I_{\text{я}}} - c_2 \quad (3.18)$$

Як бачимо, частота обертання зворотно пропорційна струму навантаження, тобто вираз (3.18) є рівнянням гіперболи (крива 1 на рис. 3.7,а). Це звичайна швидкісна характеристика.

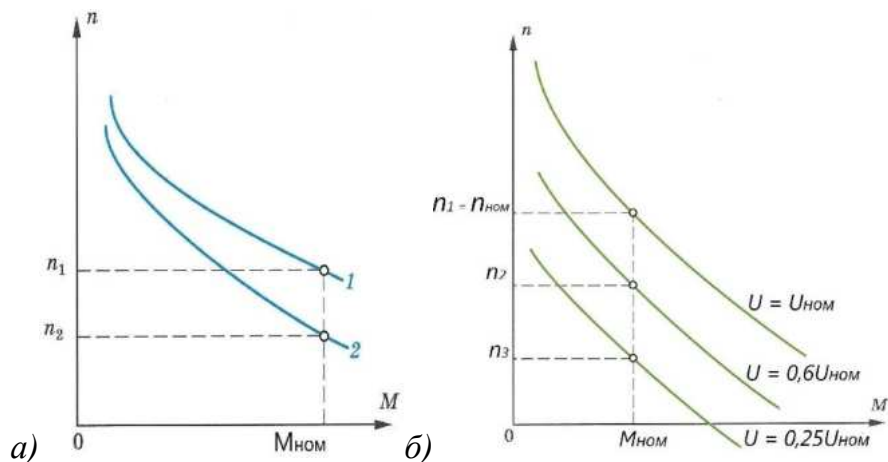


Рис. 3.7 - Швидкісні характеристики при зміні опору (а) та при зміні підведеної напруги (б)

При значних струмах, коли магнітне коло насичується й не існує прямої пропорційності між магнітним потоком і струмом якоря, характеристика трохи відхиляється від гіперболи і "випрямляється". Стала c_2 в рівнянні (3.18) може відрізнятися в залежності від того, чи ввімкнений у коло якоря резистор, і який його опір $r_{н.р}$. Чим більше значення $r_{н.р}$, тим нижче розміщені штучні швидкісні характеристики (крива -2 на рис.3.7,а).

Моментна характеристика $M=f(I_я)$.

Цю характеристику доцільно розділити на дві ділянки:

а) при малих струмах $I_я < (0,8 \div 0,9)I_{я.ном.}$, коли $\Phi = c_\Phi I_я$;

б) при великих струмах $I_я > I_{я.ном.}$, коли можна вважати $\Phi = const$.

На першій ділянці, згідно з рівнянням (3.3)

$$M = c_m c_\phi I_\gamma^2 \quad (3.19)$$

Обертальний момент пропорційний квадрату струму якоря, тобто моментна характеристика має форму параболи (див. крива - 2 рис.3.6, б). На другій ділянці справджується рівняння (3.16), тобто моментна характеристика стає лінійною. Між параболічною й лінійною частинами існує перехідна ділянка, що відповідає третій перехідній ділянці магнітної характеристики.

Механічна характеристика $n=f(M)$. При побудові цієї характеристики також треба мати на увазі допущений на початку цього параграфу розділ кривої намагнічування, поділений на три ділянки.

Для першого, "ненасиченого", згідно з (3.19), $I_\gamma = \sqrt{\frac{M}{c_m c_\phi}}$

Підставивши цей вираз у (3.18), отримаємо рівняння звичайної механічної характеристики:

$$n = c_1 \frac{U \sqrt{c_m c_\phi}}{\sqrt{M}} - c_2 = c_1' \frac{U}{\sqrt{M}} - c_2, \quad (3.20)$$

де $c_1' = c_1 \sqrt{c_m c_\phi}$.

Механічна характеристика має гіперболічний вигляд, як і швидкісна (рис. 3.7). При струмах $I_\gamma = I_{ном}$ залежність $n = f(M)$ наближається до лінійної.

Як і в рівнянні (3.18), значення сталої c_2 в (3.20) залежить від повного опору кола якоря: ввімкнений чи ні резистор, і який його опір. Чим опір більший, тим нижче розміщені штучні механічні характеристики (крива 2 на рис. 3.7,а).

З рис. 3.7 випливає, що швидкісні й механічні

характеристики двигуна послідовного збудження є "м'якими", частота обертання при зміні навантаження змінюється в широкому діапазоні.

З рівнянь (3.18) і (3.20) бачимо, що якщо навантаження спадає до нуля, то частота обертання прямує до нескінченості. При незначних навантаженнях вона досягає неприпустимо великого значення (двигун іде в "рознос"), що може викликати механічне пошкодження якоря.

Тому двигуни послідовного збудження не можна застосовувати в електроприводах, де можливе саморозвантаження чи холостий хід (верстати, конвеєри тощо). Щоб відвернути саморозвантаження, двигун з'єднують з привідним механізмом зубчатою передачею чи глухою муфтою.

В той же час здатність двигуна послідовного збудження розвивати момент $M \approx I_a^2$, тоді як у двигуна паралельного збудження $M \approx I_a$, це робить застосування першого бажаним при тяжких умовах запуску.

Згідно з рівняннями (3.16) і (3.19) для двигунів паралельного і послідовного збудження спостерігається така пропорційність:

$$I_{a.np} \approx M; \quad I_{a.nc} \approx \sqrt{M}$$

Корисна потужність двигуна $P_2 = M\Omega = M \cdot 2\pi n$.

При жорсткій механічній характеристиці ($n=const$) у двигуна паралельного збудження: $P_{2np} \approx M$.

У двигуна послідовного збудження, для якого згідно з (3.20)

$$n \approx 1/\sqrt{M}, \quad P_{2nc} \approx \sqrt{M}.$$

Таким чином, *у двигунів послідовного збудження при зміні в широких межах моменту навантаження M струм і потужність змінюються менше, ніж у двигунів паралельного збудження.*

Ця обставина надзвичайно позитивно впливає на систему електропостачання. Вона також означає, що *одну й ту ж роботу можна виконати двигуном послідовного збудження меншої потужності, ніж двигуном паралельного збудження.*

Ці властивості двигунів послідовного збудження дозволяють застосувати їх для тягового електроприводу (електровози, тепловози, метро тощо) і в підйомно-транспортних установках.

§ 3.6 Двигун змішаного збудження

У цьому двигуні магнітний потік створюється в результаті спільних дій послідовної й паралельної обмоток збудження, що вмикаються, як правило, узгоджено. Тому його швидкісна та механічна характеристика розміщується між характеристиками двигунів послідовного й паралельного збудження (крива 2 рис. 3.8, б).

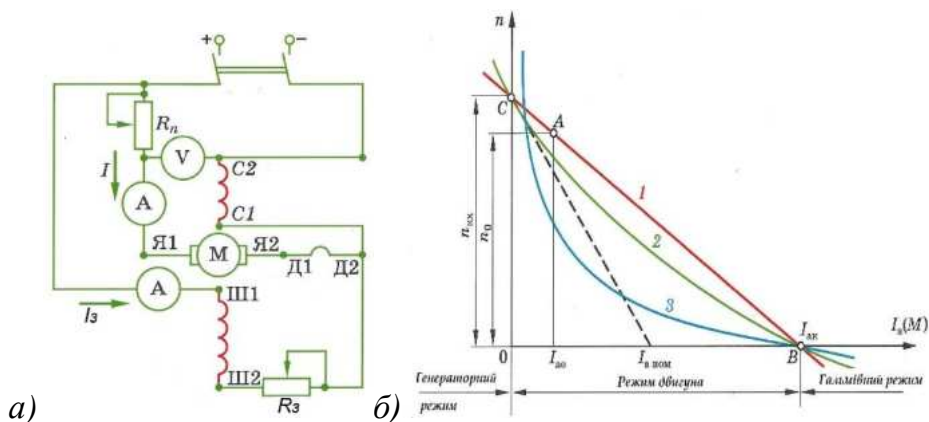


Рис. 3.8 - Електрична схема двигуна (а) та швидкісні характеристики двигунів (б): 1- паралельного збудження; 2 - змішаного збудження; 3 - послідовного збудження

Вона м'якша, ніж характеристика двигуна паралельного збудження, але жорсткіша, ніж характеристика двигуна послідовного збудження. В залежності від співвідношення МРС обох обмоток, характеристика може наближатися до характеристи-стики однієї машини або іншої. Тоді двигуну будуть більш-менш відповідати властивості двигуна паралельного чи послідовного збудження. Одним з плюсів цього двигуна є те, що він не йде "в рознос" і може працювати при без навантаження. Це одна з причин, через яку двигуни змішаного збудження застосовують на електрорухомому складі, наприклад, трамваях і тролейбусах.

§ 3.7 Регулювання частоти обертання ДПС

Робота двигуна на звичайній характеристиці не завжди може задовільняти всі вимоги експлуатації. Часто буває необхідно розширити робочий діапазон, що може бути виконане регулюванням частоти обертання. Таке регулювання, згідно з рівнянням (3.14), можна виконати трьома способами:

- 1) зміною напруги живлення U ;
- 2) зміною падіння напруги в колі якоря, тобто ввімкнення резистора в його коло;
- 3) зміною магнітного потоку Φ .

Всі ці три способи дають принципово однакові результати для двигунів будь-якого виду збудження, але кожний спосіб при цьому має свої характерні особливості.

Розглянемо принципові особливості, властиві цим способам регулювання, на прикладі двигуна послідовного збудження як такого, що має основне застосування у тяговому електроприводі.

Зміна напруги живлення. Звичайна швидкісна характеристика відповідає номінальній напрузі, тому зміна напруги живлення можлива лише донизу, що дасть сімейство швидкісних характеристик, аналогічних за формою звичайній, але розміщених нижче (рис. 3.7,б).

Зміну напруги живлення можна здійснювати за схемою Г-Д (генератор - двигун), коли до якоря двигуна, що регулюється, підводиться напруга від спеціального генератора. Таке регулювання має місце на тепловозах. На електровозах плавне регулювання здійснюється за допомогою тиристорного перетворювача, а також головного

трансформатора ступеневої зміни вихідної напруги.

Включення резистора в коло якоря. Цей спосіб дозволяє отримати сімейство швидкісних або механічних характеристик, що лежать нижче звичайних (крива 2 на рис.3.7,а). Кожна така характеристика відповідає, згідно з рівнянням (3.14), своєму значенню $r_{n.p}$. Спосіб регулювання, що розглядається має ряд недоліків:

- резистор, який має бути розрахований на довгострокове протікання струму, виявляється громіздким і дорогим;
- крім того, в резисторі втрачається більша частина енергії, що робить даний спосіб регулювання неекономним.

Зміна магнітного потоку може здійснюватися у бік його зменшення - *послаблення збудження*, або в бік його збільшення - *підсилення збудження*.

Послаблення збудження здійснюється шляхом шунтування обмотки збудження резистором (рис. 3.9,а). При включенні контактора КМ1(рис.3.9,а) підключається резистор $R_{ш}$, частина струму якоря, що визначається значенням опору $R_{ш}$, розгалужується в коло шунтувального резистора. При цьому струм збудження I_3 , а, значить, і магнітний потік Φ зменшуються, а частота обертання n , згідно з рівнянням (3.5), зростає. Чим менше значення $R_{ш}$, тим більша частина струму відгалужується в шунтувальний резистор, і тим більше зростає частота обертання. На рис. 3.9,б характеристики послабленого збудження ОП1 та ОП2 отримують при зміні величини введенного резистора, а коли значення опору шунтувального резистора відключити, отримаємо природню характеристику при повному полі збудження (ПП).

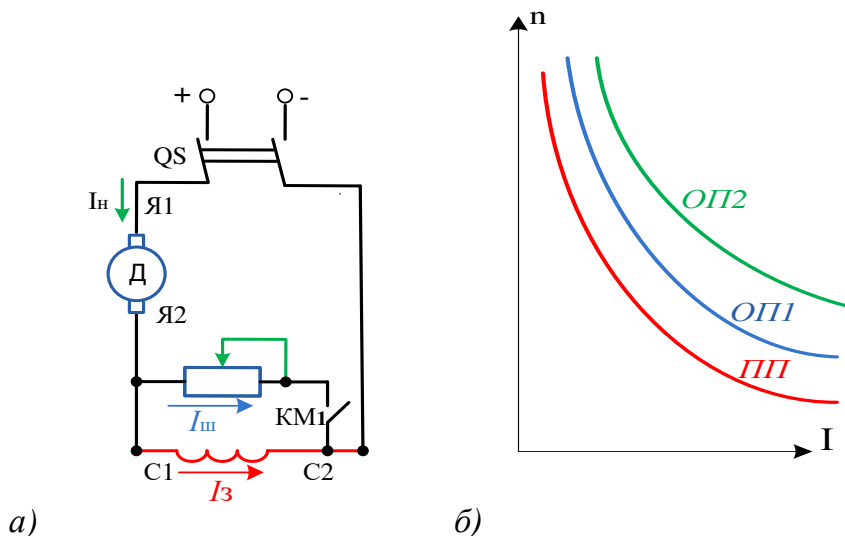


Рис. 3.9 - Схема послаблення збудження (а) та швидкісні характеристики (б) двигуна при ослабленні поля

Як правило, послідовно в шунтувальне коло включають індуктивність - індуктивний шунт. Його застосування сприяє рівномірному розподілу струмів $I_{я}$ і $I_{ш}$ в перехідних режимах.

Описаний спосіб регулювання дуже економічний, бо сумарні втрати на збудження навіть зменшуються.

Посилення збудження здійснюється за допомогою шунтування якоря, що викликає зростання струму збудження і магнітного потоку, а частота обертання падає. При цьому струм і обертальний момент зменшуються.

Шунтування якоря вимагає виконання резистора на повну напругу мережі, що робить його дуже громіздким і дорогим. Його опір має бути більшим, значить втрати енергії - значніші. Крім того, шунтування якоря ефективно лише тоді, коли магнітне коло двигуна не насичене, тому такий спосіб регулювання на практиці застосовується дуже рідко.

§ 3.8 Електричне гальмування двигунів постійного струму

В усіх виконавчих механізмах, де використовується електричний привід, з міркувань безпеки зазвичай застосовують механічний і електричний способи гальмування. Механічне гальмування базується на терті гальмівних частин об частини приводу, що обертаються, а електричне - на створенні в двигуні гальмівного електромагнітного моменту M протилежного напрямку обертання.

Існують три види електричного гальмування: рекуперативне, динамічне (реостатне) і гальмування протилежним ввімкненням.

Рекуперативне гальмування. Воно є найбільш економічним, бо засноване на переводі двигуна в генераторний режим з віддачею енергії в мережу.

Двигуни паралельного або змішаного збудження можуть автоматично переходити в режим рекуперативного гальмування при частоті обертання більше $n_0 = U / (c_e \Phi)$.

Автоматичний перехід двигуна змішаного збудження в рекуперативний режим і його порівняно "м'які" механічні характеристики обумовили його застосування з метою електричної тяги на трамваях і тролейбусах. Можна перевести машину в рекуперативний режим і примусово, зменшивши частоту обертання n_0 шляхом збільшення струму збудження або зниження напруги U , що підводиться.

Двигун послідовного збудження, таким чином, не може перейти в рекуперативний режим: його характеристика (рис. 3.9.б) не перетинає осі ординат, а ЕРС ніколи не може стати більше від напруги U . На електричному рухомому складі, в тягових двигунах послідовного збудження для переводу їх в рекуперативний режим їм змінюють схему на незалежне збудження.

Динамічне гальмування. Здійснюється шляхом від'єднання якірної обмотки від мережі й замикання її на гальмівний резистор (реостат) опором r_r . При цьому механічна енергія обертових мас перетворюється в електричну, котра витрачається на нагрівання гальмівного резистора й інших елементів кола якоря.

Обмотка збудження двигуна паралельного збудження залишається ввімкненою в мережу цієї ж полярності, а отже, струм збудження й магнітний потік залишаються незмінними. Коли якірна обмотка від'єднана від мережі, то струм, що споживає від мережі двигун, дорівнює нулеві, але якір двигуна за інерцією продовжує обертатися, внаслідок чого у ньому виникає ЕРС:

$$E = c_e n \Phi.$$

Гальмівний струм якоря визначаємо згідно з формулою (3.21)

$$I_{я.м} = \frac{0 - E}{\sum R + r_m} = - \frac{E}{\sum R + r_m} \quad (3.21)$$

Зміна знаку струму призводить до зміни знаку моменту, який з обертального стає гальмівним:

$$M_m = c_m I_{я.м} \Phi = c_m \left(- \frac{E}{\sum R + r_m} \right) \Phi = - c_e c_m \frac{n \Phi^2}{\sum R + r} \quad (3.22)$$

З виразу (3.22) бачимо, що при постійному магнітному потоці Φ гальмівний момент залежить від частоти обертання n , котра внаслідок гальмування зменшується і від опору гальмівного резистора r_m .

Для підтримання гальмівного моменту відносно постійним резистор виконують секціонованим. По мірі зменшення частоти обертання якоря виводять секції гальмівного резистора, зменшуючи його опір, і тим самим підтримують струм і гальмівний момент постійним.

У двигуна послідовного збудження при динамічному гальмуванні необхідно перемкнути виводи обмотки збудження для того, щоб напрям струму в ній, а, значить, і магнітного потоку залишався незмінним.

Гальмування протилежним ввімкненням здійснюється перемиканням виводів якірної обмотки або обмотки збудження, внаслідок чого змінюється напрямок струму в якорі або магнітного потоку і знак моменту, що з обертального стає гальмівним. Струм якоря після перемикання його обмотки дорівнює:

$$I_{я.м} = \frac{-U - E}{\sum R + r_m} = - \frac{U + E}{\sum R + r_m} \quad (3.23)$$

тобто він не тільки змінює свій знак, але й стрибком дуже збільшується, а з ним зростає і гальмівний момент. Такий стрибок струму й гальмівного моменту може видатися небезпечним для машини, якщо опір r_m невеликий.

Гальмування протилежним ввімкненням забезпечує швидку зупинку двигуна, але при гальмуванні цим способом двигун має бути своєчасно вимкнений з мережі

для уникнення обертання якоря в протилежному напрямі (реверсу). Цей спосіб гальмування застосовується в піднімально-транспортних механізмах при спусканні вантажів у інших випадках, наприклад, для попередження аварійних ситуацій, небезпечних для життя людей.

§ 3.9 Втрати потужності в електричних машинах

При перетворенні енергії частина її розсіюється в самій машині у вигляді втрат, що перетворюються в тепло. Визначення втрат важливо для оцінки ККД та перевищення температури окремих частин машини над температурою навколишнього середовища.

Втрати в ЕМ підрозділяють на дві групи: основні та додаткові.

Основні – це втрати, які виникають у машині в результаті перебігу в ній основних електромагнітних і механічних процесів. До цих втрат відносять електричні втрати в обмотках та в щітковому контакті, магнітні та механічні втрати.

Додаткові втрати з'являються в результаті вторинних процесів електромагнітного характеру, які відбуваються в машині. Додаткові електричні втрати в обмотках зумовлені полями розсіювання та комутаційними процесами, пульсаціями поля через зубчасту будову якоря, полями від вищих гармонік, спотворенням поля через поперечну реакцію та полями розсіювання.

Коефіцієнт корисної дії η являє собою відношення корисної потужності P_2 до споживаної P_1 .

$$\eta = (P_2 / P_1) 100 \% . \quad (2.5)$$

У двигуна споживаною потужністю є електрична потужність P_1 , яка забирається з мережі, а корисною – потужність на валу P_2 . У генератора корисною є електрична потужність, яка віддається ним у мережу, а споживаною – потужність, яка прикладена до його вала. Електричні машини мають досить високі значення ККД. У машин середньої та великої потужностей ці значення в межах 0,85...0,95 і тільки для мікромашин значення ККД дорівнює 0,25...0,3. ККД має тенденцію зростати з підвищенням номінальної потужності машини. Залежність ККД від корисної потужності P_2 , називається характеристикою ККД, характеристика $\eta = f(P_2)$ наведена на рис. 2.9.

При збільшенні навантаження (корисної потужності P_2) ККД швидко зростає в початковій частині кривої. Потім ККД досягає максимуму, а при великих навантаженнях зменшується під впливом збільшення електричних та додаткових втрат. Можна знайти умову, за якої ККД машини буде мати максимальне значення.

Для зручності аналізу сумарні втрати ділять на три групи. До першої належать втрати, що не залежать від навантаження. Сюди входять механічні та магнітні втрати, а також втрати в тих обмотках збудження, у яких струм не змінюється при навантаженні. Ці втрати називають сталими. До другої групи відносять втрати, що залежать від I_a^2 . Це електричні втрати в обмотках кола якоря та додаткові втрати.

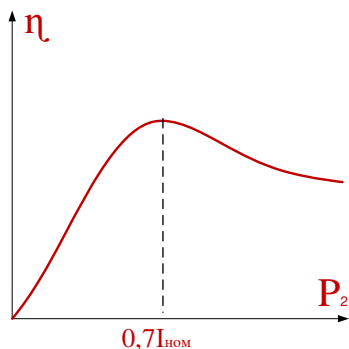


Рис. 2.9 - Характеристика ККД

До третьої групи відносять втрати, які пропорційні I_a . Це електричні втрати у щітковому контакті. Як показує практика, електричні машини найчастіше працюють з недовантаженням. Тому в сучасних машинах ККД має максимальне значення при навантаженнях 0,65...0,7 від номінального.

Контрольні запитання

1. Яким чином можна змінити напрям обертального моменту двигуна, тобто здійснити його реверсування?
2. З рівнянь рівноваги напруг виведіть рівняння для струму якоря; як можна змінити його напрям?
3. Які моменти діють на валі двигуна? Напишіть рівняння їх рівноваги.
4. Чому зростання навантаження на валі супроводжується зростанням струму в якорі?
5. Яке призначення пускового резистора і з яких міркувань вибирають його опір?

6. Чому при запуску двигунів паралельного збудження опір резистора в колі обмотки збудження має бути мінімальним?

7. Як змінюється частота обертання двигунів різних систем збудження при збільшенні навантаження на валі?

8. Чому двигуни послідовного збудження не можна вмикати в мережу без навантаження на валі? Завдяки яким властивостям ці двигуни застосовують в якості тягових і кранових?

9. Порівняйте, як змінюється споживання струму в мережі при зміні навантаження на валі двигунів паралельного і послідовного збудження.

10. Якими способами можна регулювати частоту обертання двигунів постійного струму?

Розділ 2 ТРАНСФОРМАТОРИ

Частина 4 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРАНСФОРМАТОРА

§ 4.1 Призначення області використання трансформаторів

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, який має дві або більше індуктивно з'єднаних обмоток і призначених для перетворення електричної енергії змінного струму з однієї величини в іншу. За допомогою трансформаторів підвищують або знижують напругу, змінюють кількість фаз і в деяких випадках перетворюють частоту змінного струму. Трансформатори широко використовують в різних сферах і з різною метою.

1. *Для передачі й розподілу електричної енергії.* Зазвичай на електростанціях генератори змінного струму виробляють електричну енергію з напругою 6-24 кВ, проте передавати енергію на далекі відстані вигідно при значно більших напругах (110, 220, 330, 400, 500 і 750 кВ). Тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, які здійснюють підвищення напруги.

Розподіл електричної енергії між промисловими підприємствами, населеними пунктами, в містах і сільських місцевостях, а також всередині промислових підприємств здійснюється за допомогою повітряних і кабельних ліній під напругою 220, 110, 35, 20 і 6 кВ. Отже, в усіх вузлах розподільчих мереж повинні бути встановлені трансформатори, які знижують напругу. Понижувальні трансформатори потрібно також встановлювати в пунктах споживання електроенергії, тому що більшість електричних споживачів змінного струму працює при напругах 220, 380 і 660 В.

Таким чином, електрична енергія при передачі від електричних станцій до споживачів зазнає в трансформаторах

багатократного перетворення (3-5 разів).

Трансформатори, що служать для перетворення електричної енергії в мережах енергосистем і електроспоживачів, називають *силовими*. Потужність силових трансформаторів досягає дуже великих значень (до 1 млн. кВА), а напруга - до 1150 В.

2. Для забезпечення потрібної схеми включення напівпровідникових перетворювачів, коли необхідне узгодження напруги на вході й виході. Такі трансформатори називають *перетворювальними*.

3. Для різних технологічних цілей: зварювання, живлення електротермічних пристроїв тощо.

4. Для живлення різних кіл теле- і радіоапаратури, пристроїв зв'язку й автоматики. Такі трансформатори можуть працювати на дуже великих частотах.

5. Для включення електровимірювальних приладів - *вимірювальні трансформатори*. Трансформатори можуть бути *однофазними* або *трифазними*, мати дві або більше обмоток.

§ 4.2 Принцип дії трансформатора

Як і у електричних машин, *принцип дії трансформаторів оснований на законі електромагнітної індукції*.

При поміщенні провідників в змінне магнітне поле, в них виникають ЕРС, які визначається рівняннями (4.1).

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; \quad e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (4.1)$$

Трансформатор складається з замкненого сталевого осердя, зібраного з листової електротехнічної сталі, яке називають *магнітопроводом*, і двох або більше обмоток, розташованих на осерді трансформатора (рис. 4.1).

Обмотка, до якої підводиться електрична енергія, називається *первинною*, вона має w_1 витків і приєднується до

джерела напруги U_1 змінного струму. Обмотка, від якої відводиться енергія, називається вторинною, в ній число витків w_2 відрізняється від числа витків первинної обмотки. До затискачів вторинної обмотки під'єднується навантаження, повний опір якого Z_n .

Прийнято позначати початки обмотки вищої напруги (ВН) великими літерами латинського алфавіту A, B , а їхні кінці - буквами X, Y ; відповідно початки й кінці обмотки нижчої напруги (НН) - маленькими літерами a, b і x, y . Таким чином, трансформатор, з одного боку, є споживачем енергії, оскільки первинна обмотка приєднана до джерела, а з іншого, - джерелом енергії, тому, що до вторинної обмотки приєднаний споживач енергії. Потужність трансформаторів, як і всіх джерел змінного струму, виражають у вольт-амперах (ВА) або кіловольтамперах (кВА). Виразити потужність джерел змінного струму у ватах або кіловатах не можна, тому що їхня потужність не постійна й залежить від коефіцієнта потужності споживача.

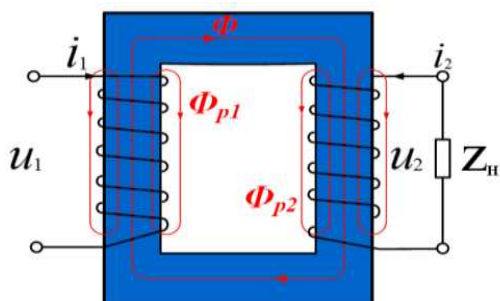


Рис.4.1 - Принципова схема трансформатора

При підключенні трансформатора до мережі в первинній обмотці протікає змінний струм, що призводить до появи змінного магнітного потоку, який замикається по магнітопроводу. Потік Φ перетинає обидві обмотки й створює в них змінні ЕРС самоіндукції E_1 та

взаємоіндукції E_2 .

Якщо підведена первинна напруга і струм синусоїдальні, то нехтуючи насиченням магнітопроводу, можна вважати синусоїдальним також магнітний потік і наведену ЕРС, тобто

$$\Phi = \Phi_m \sin wt, \quad (4.2)$$

де Φ_m - амплітудне значення потоку.

Підставивши у вираз (4.1) вираз (4.2), отримаємо

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (4.3)$$

$$e_2 = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \pi / 2) \quad (4.3.a)$$

З отриманих виразів видно, що e_1 і e_2 відстають по фазі від потоку Φ на кут $\pi/2$. Діючі значення обох ЕРС рівні відповідно:

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (4.4)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (4.4, a)$$

Якщо $w_1 > w_2$, то $E_1 > E_2$, і такий трансформатор називається *понижуючим*. При зворотному відношенні числа витків, а значить і ЕРС, трансформатор буде *підвищувальним*.

Відношення первинної E_1 до вторинної E_2 носить назву коефіцієнт трансформації, з урахуванням виразів (4.4), він дорівнює

$$K = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \quad (4.5)$$

Незалежно від того підвищуючий трансформатор чи понижуючий, для визначення коефіцієнту трансформації приймають відношення більшого числа витків до меншого, тобто завжди $k > 1$.

Для простоти в подальшому будемо розглядати понижувальний трансформатор, у якого обмотка ВН є первинною.

Якщо вторинна обмотка замкнена на навантаження, то разом з напругами в трансформаторі перетворюються і струми, а потужність залишається приблизно незмінною, так як втрати енергії в силових трансформаторах дуже малі і складають не

більше 0,5 – 2% потужності, тобто

$$U_1 I_1 \approx U_2 I_2$$

Отже, якщо не враховувати спад напруги, то коефіцієнт трансформації можна визначити з відношень:

$$K = I_2 / I_1 \approx U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \quad (4.6)$$

Таким чином, якщо при перетворенні енергії при трансформації підведена напруга зменшилась в K разів, то струм приблизно в K разів збільшився.

§ 4.3 Будова трансформаторів

Силові трансформатори можуть бути маслonaповнюваними або сухими, однофазними і трифазними, їх відповідне позначення включає букви M або C ; O або T .

Основними частинами трансформатора є магнітопровід, обмотки, бак, виводи, система охолодження тощо. Магнітопровід з насадженими на його стержні обмотками є *активною частиною*, а інші елементи - *допоміжними*.

В залежності від конфігурації магнітопроводу трансформатори поділяють на *стержневі*, *броньові* й *тороїдні*. Магнітопровід складається зі стержнів, на яких розміщують обмотки (рис. 4.2), частину магнітопроводу на якій немає обмоток, називають ярмом.

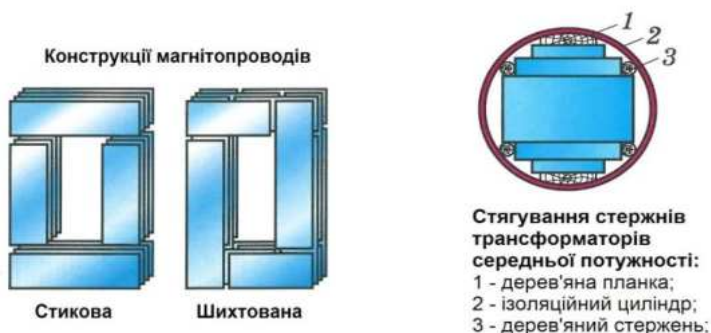
Обмотки BH і HN трансформаторів, для кращого магнітного зв'язку між ними, розміщують на одному й тому ж стержні; одну всередині другої - *концентричні* або *такі, що чергуються - дискові*, коли частини обмоток BH і HN позмінно ідуть одна за одною по висоті стержня. При концентричному виконанні обмоток у звичайних трансформа-торів обмотку HN розміщують ближче до стержня, тому що в цьому випадку

легше здійснити ізоляцію від стержня.

У силових трансформаторів обмотка *НН* має більше число виводів, тому її розміщують поверх обмотки *ВН*.

Розглянемо будову силового масляного трансформатора (рис.4.3), що їх використовують в системі електропередач. Магнітопроводи трансформаторів виконуються шихтованими з листів електротехнічної сталі товщиною $0,35$ мм. Осердя трансформатора виконано стержневого типу. Магнітопровід з обмотками встановлюють в бак.

Бак трансформатора *21* зварюють з листової сталі й закривають кришкою, яка прикріплюється до нього через ущільнювач з маслостійкої резини за допомогою болтів. Вище рівня кришки встановлюється розширювач з вказівником рівня масла 16. Масло є не тільки ізолюючим, але, й охолоджуючим середовищем. В розширювачі воно завжди холодніше, ніж в баці, а поверхня його дотику з повітрям дуже мала, що захищає масло від окислення та зволоження. Об'єм розширювача й рівень масла в ньому розраховуються так, щоб при всіх режимах роботи і коливаннях температури навколишнього середовища бак був заповнений маслом.



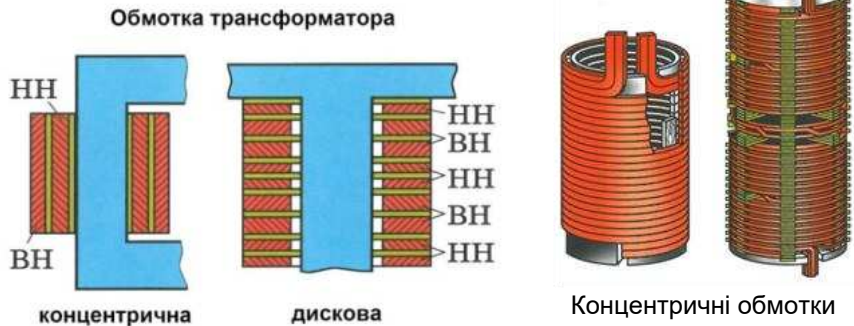


Рис. 4.2 - Основні елементи конструкції трансформатора

Обмотки (див. рис.4.2) намотуються мідним дротом прямокутного перерізу, ізолюваним кількома шарами кабельного паперу і шаром бавовняної пряжі. Вхід котушок високої напруга робиться посиленням по ізоляції. Розташовані концентрично обмотки, ізолюються одна від одної і від осердя бакелітовими циліндрами. В обмотках, а також між ними й ізоляційними циліндрами за допомогою рейок, склеєних бакелітовим лаком зі стрічок електротехнічного картону, виконуються осьові канали для охолодження обмоток маслом. Виводи ізольовані 11, 12 (див. рис.4.3) розміщуються на кришці трансформатора. Кожен вивід складається із струмоведучої частини й ізолятора, який відділяє струмоведучу частину від кришки. Один кінець ізолятора заходить всередину баку, а другий виступає над кришкою.

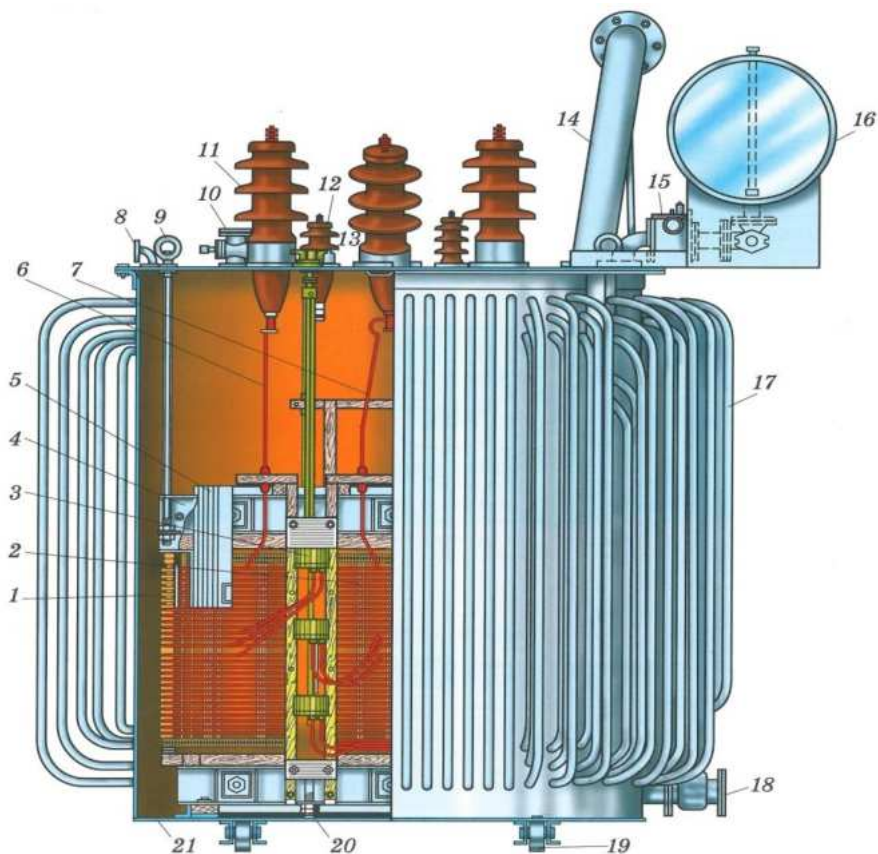


Рис. 4.3 - Будова масляного трансформатора:

1- обмотка ВН; 2- обмотка НН; 3 - перемикач регулюючих відводів обмотки ВН; 4 - стискаюча балка ярма; 5 - шихтований магнітопровід; 6, 7- відводи ВН та НН; 8 - патрубок для з'єднання;

9 - кільце для підйому виїмної частини; 10 - кран для заливання трансформаторного масла; 11, 12- виводи ВН та НН; 13 - привід перемикача; 14 - вихлопна труба; 15 - газове реле; 16 - розширювач;

17- радіатор; 18 - кран для зливу масла; 19 - транспортний ролик; 20 - вертикальна шпилька для стягування ярма; 21- бак

Навколо струмоведучого стержня виводу створюється більше магнітне поле, яке замикається по кришці трансформатора. Втрати від вихрових струмів і перема-

гнічування нагрівають кришку. Для зменшення цих втрат в одному отворі поміщають виводи початку й кінця даної обмотки. Так як струми в виводах рівні й протилежні за напрямком, їх результируючий магнітний потік практично дорівнює нулю.

Система охолодження (рис. 4.3) включає в себе радіатори 17, в яких трансформаторне масло охолоджується. На трубопроводах, що з'єднують бак, встановлюють спеціальні крани, які дозволяють заміну секції без зливу всього масла. Для заповнення баку маслом або його заміни в нижній частині є фланцевий вентиль. Бак трансформатора заземлюється.

§ 4.4 Рівняння ЕРС трансформатора

Струми I_1 і I_2 у первинній й вторинній обмотках утворюють магнітні потоки розсіювання $\Phi_{1роз}$ і $\Phi_{2роз}$, кожен з яких зчеплений по повітрю лише з витками власної обмотки. Ці змінні потоки індують у "своїх" обмотках ЕРС розсіювання:

$$e_{1роз} = -L_{1роз} di_1 / dt \quad \text{і} \quad e_{2роз} = -L_{2роз} di_2 / dt, \quad (4.6)$$

де $L_{1роз}$ і $L_{2роз}$ - індуктивності розсіювання, які можна вважати постійними.

Оскільки $i_1 = I_{1m} \sin \omega t$,

$$e_{1роз} = -L_{1роз} \frac{d(I_{1m} \sin \omega t)}{dt} = I_{1m} x_1 \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right)$$

Аналогічно $e_{2роз} = I_{2m} x_2 \sin (\omega t - \pi / 2)$,

де $x_1 = \omega L_{1роз}$ і $x_2 = \omega L_{2роз}$ - індуктивний опір

розсіювання первинної та вторинної обмоток відповідно.
Таким чином, діючи значення цих ЕРС

$$\dot{E}_{1роз} = -j\dot{I}_1 x_1 \quad (4.7)$$

$$\dot{E}_{2роз} = -j\dot{I}_2 x_2 \quad (4.7,а)$$

Крапка над індексом свідчить про те, що це комплексне діюче або амплітудне значення величини, яка є синусоїдальною функцією часу. Отож, в кожній з обмоток трансформатора індукується по дві ЕРС від основного потоку Φ і від потоку розсіювання $\Phi_{роз}$, тому для первинної обмотки трансформатора, згідно з другим законом Кірхгофа, можна записати рівняння:

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1роз} = \dot{I}_1 r_1, \quad (4.8)$$

де r_1 - активний опір первинної обмотки.

Підставивши у вираз (4.8) значення ЕРС розсіювання з (4.7), отримаємо:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (4.9)$$

Створена потоком, Φ ЕРС E_1 , являє собою ЕРС самоіндукції і тому знаходиться в протифазі з підведеною напругою U_1 .

Таким чином, згідно з (4.9), підведена до первинної обмотки напруга U_1 врівноважується ЕРС E_1 , а також падінням напруги в індуктивному і активному її опорах.

Перетворімо рівняння (4.9).

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (4.10)$$

де $\underline{Z}_1 = (r_1 + jx_1)$ - повний опір первинної обмотки.
 Рисочка під індексом показує, що це комплексна величина.

Для вторинної обмотки, замкнутої на навантаження з повним опором $\underline{Z}_n$, згідно з другим законом Кірхгофа,

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2_{\text{роз}}} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 \underline{Z}_n, \quad (4.11)$$

де r_2 - активний опір вторинної обмотки.

Сума наведених в другій обмотці ЕРС врівноважується сумою падіння напруги. Як видно з рис. 4.1, падіння напруги на навантаженні являє собою напругу на виводах вторинної обмотки, тобто

$$\dot{I}_2 \underline{Z}_n = \dot{U}_2 \quad (4.11.a)$$

З урахуванням цього, рівняння (8.11) отримає вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2_{\text{роз}}} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{U}_2 \quad (4.11.б)$$

Підставимо в (4.11,б) вираз (4.7,а); тоді вторинна напруга трансформатора становить:

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 \underline{Z}_2, \quad (4.12)$$

де $\underline{Z}_2 = (r_2 + jx_2)$ - повний опір вторинної обмотки.

Рівняння (4.10) і (4.12) дозволяють зробити висновок, що *трансформатор може працювати лише в колах змінного струму, його включення в коло постійного струму не допускається*. Дійсно, якщо включити первинну обмотку в коло постійного струму, то потече постійний струм і створиться постійний потік; значить, $E_2 \sim 0$, і енергія первинної сторони не буде передаватися до вторинної. Крім того, $E_1 = 0$, $E_{1_{\text{роз}}} = 0$, і струм первинної обмотки $I_1 = U_1 / r_1$ досягне дуже великого значення.

§ 4.5 Рівняння МРС трансформатора

Для вияснення суті фізичних процесів, що проходять в трансформаторі, ідеалізуємо його, тобто розглянемо трансформатор, у якого немає потоків розсіювання (весь магнітний потік замикається по магнітопроводу), в сталі відсутні втрати від вихрових струмів і гістерезису, а опір первинної обмотки $r_1 = 0$.

У такого ідеалізованого трансформатора рівняння (4.10) буде мати вигляд

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \text{ або } u_1 = e_1 \quad (4.13)$$

тобто прикладена до первинної обмотки напруга практично повністю врівноважується індукованою в цій обмотці ЕРС.

При холостому ході такого трансформатора (на рис 4.1 $\underline{Z}_n = \infty$) по первинній обмотці тече струм i_0 , а її ЕРС:

$$e_1 = -w_1 d\Phi_0 / dt, \quad (4.14)$$

де Φ_0 - магнітний потік при холостому ході, викликаний МРС холостого ходу $F_0 = i_0 w_1$.

Замкнемо вторинну обмотку на навантаження з опором $\underline{Z}_n$, тоді по ній потече струм i_2 , створюючи МРС $F_2 = i_2 w_2$. При цьому струм первинної обмотки i_1 створює МРС $F_1 = i_1 w_1$.

Обидві МРС викличуть появу відповідно двох магнітних потоків Φ_1 і Φ_2 , тоді рівняння (4.14) матиме вигляд:

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt} \quad (4.15)$$

Однак і в цих випадках (при навантаженні) прикладена

напруга u_1 незмінна, і умова (4.13) залишається попередньою.

Відповідно значення e_1 при холостому ході дорівнює йому ж при навантаженні. Але тоді можна порівняти праві частини рівнянь (4.14) і (4.15), і отримаємо:

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (4.16)$$

Рівняння (4.16) свідчить про незмінність магнітного потоку при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження. Це є найважливішою властивістю трансформатора. На основі рівняння (4.16) можна записати закон рівноваги МРС, що викликають проходження цих магнітних потоків:

$$\dot{F}_0 = \dot{F}_1 + \dot{F}_2 \text{ або } i_0 w_1 = i_1 w_1 + i_2 w_2$$

Звідки

$$i_1 w_1 = i_0 w_1 + (-i_2 w_2) \quad (4.17)$$

З рівняння (4.17) видно, що МРС первинної обмотки трансформатора при навантаженні складається з двох складових:

- $i_0 w_1$ що створює магнітний потік;
- $(-i_2 w_2)$ рівної за значенням і протилежної за напрямком МРС вторинної обмотки.

Цим і пояснюється незмінність магнітного потоку трансформатора.

Перейшовши до діючих значень струмів, отримаємо рівняння (4.17) в такому вигляді

$$I_1 w_1 = I_0 w_1 + (-I_2 w_2) \quad (4.18)$$

Слід підкреслити, що основні закономірності ідеалізованого

трансформатора справедливий й для реальних трансформаторів, зокрема рівняння МРС (4.18).

§ 4.6 Приведений трансформатор

Роботу трансформаторів зручно вивчати за допомогою векторних діаграм напруг і струмів. Але їх значення, які відповідають первинній і вторинній обмоткам, можуть дуже відрізнятися при великих коефіцієнтах трансформації. Наприклад, практично неможливо відкласти на одній діаграмі й в однаковому масштабі вектори первинної і вторинної напруги, які чисельно дорівнюють відповідно 25000В і 380В (силовий трансформатор). Навіть спільні обчислення в цьому випадку ускладнені.

Вказані ускладнення усуваються приведенням обох обмоток трансформатора до одного числа витків. Для цього перераховують вторинну обмотку з числом витків w_2 на еквівалентну їй обмотку з числом витків w_1 з тією умовою, що *операція приведення не вплине на режим роботи вторинного кола у енергетичних відношеннях*. Величини, які відносяться до приведеної вторинної обмотки, називаються *приведеними* і позначаються тими ж символами, але зі штрихом зверху: E'_2 , I'_2 , r'_2 тощо.

Таким чином, *приведений трансформатор - це такий еквівалентний трансформатор, у якого коефіцієнт трансформації $w_1 / w'_2 = 1$, оскільки $w'_2 = w_1$.*

Співвідношення між приведеними і реальними параметрами можуть бути отримані, виходячи з міркувань, викладених нижче.

Приведена вторинна ЕРС може бути визначена з виразу (4.5):

$$E_2 = E_1 w_2 / w_1 = E_1 / k ;$$

відповідно у приведеного трансформатора

$$E'_2 = E_1 w'_2 / w_1 = E_1 = k E_2 \quad (4.19)$$

Приведені вторинні струм і напругу визначають за умови незмінності енергетичних співвідношень, а саме: $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$ звідси з урахуванням (4.19)

$$I'_2 = I_2 E_2 / E'_2 = I_2 k \quad (4.20)$$

Аналогічно $U'_2 I'_2 = U_2 I_2$; звідси з урахуванням (4.20)

$$U'_2 = U_2 I_2 / I'_2 = k U_2 \quad (4.20.a)$$

Приведені опори вторинного кола знаходять з умови рівності активних та реактивних потужностей: $I'^2_2 r'_2 = I^2_2 r_2$, звідси з урахування (4.20)

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = k^2 r_2 \quad (4.21)$$

Аналогічно

$$I'^2_2 x'_2 = I^2_2 x_2 \quad x'_2 = k^2 x_2 \quad (4.21.a)$$

Повний опір

$$Z' = \sqrt{r'^2_2 + x'^2_2} = \sqrt{(k^2 r_2)^2 + (k^2 x_2)^2} = k^2 Z_2 \quad (4.21.б)$$

Аналогічно приводиться і повний опір навантаження:

$$Z'_n = k^2 Z_n \quad (4.21.в)$$

Рівняння МРС трансформатора (4.18) після приведення матиме вигляд $\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}'_2 w'_2)$, але оскільки $w'_2 = w_1$, то воно перетворюється в рівняння струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_2)$.

Це перетворення дозволяє зробити важливі висновки:

- *струм первинної обмотки трансформатора представляє собою суму двох складових*, одна з яких (I_0 - струм холостого ходу) необхідна для створення у матнітопроводі основного

магнітного потоку, а друга $(-I'_2)$ дорівнює за значенням і протилежна за напрямком струмові вторинної обмотки;

- *будь-яка зміна струму навантаження супроводжується зміною первинного струму.*

Оскільки магнітний потік є змінним, він викликає появу втрат від вихрових струмів і гістерезису, потужність яких еквівалентна активній складовій струму I_0 . Таким чином, цей струм має дві складові:

- реактивну I_{op} , яка представляє собою намагнічувальний струм, що співпадає по фазі з потоком Φ ;

- активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами, дуже малу за значенням, і випереджаючу реактивну складову на кут 90° .

$$\text{Відповідно} \quad I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{op}^2} \quad (4.22)$$

Викладене дозволяє записати три основних рівняння ЕРС і струмів, за допомогою яких можна записати всі фізичні процеси, що проходять у приведеному трансформаторі:

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \end{array} \right. \quad (4.23.a)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2 \end{array} \right. \quad (4.23.б)$$

$$\left\{ \begin{array}{l} I_I = I_0 + (-I'_2) \end{array} \right. \quad (4.23.в)$$

§ 4.7 Схема заміщення приведенного трансформатора

Приведення вторинної обмотки до первинної дозволяє не тільки полегшити й спростити розрахунки, але й побудувати просту електричну модель трансформатора, де магнітний зв'язок між первинною і вторинною частинами замінений електричним зв'язком рис. 4.5.б.

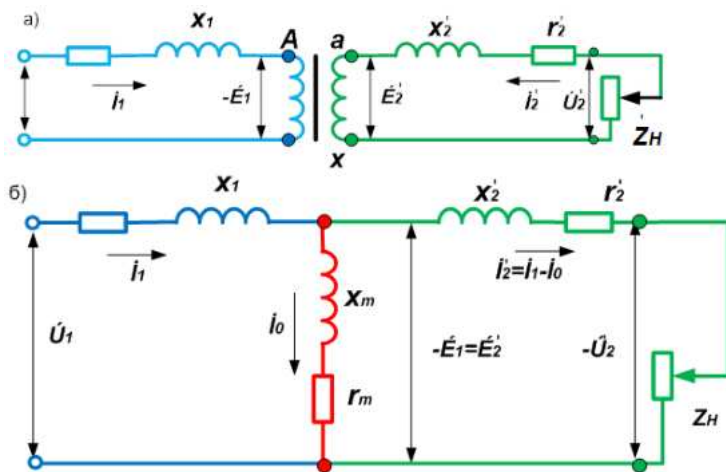


Рис. 4.5 - Елемент схеми (а) і повна схема заміщення (б) зведеного трансформатора

Для такої побудови виведемо ще два допоміжних рівняння, оскільки $\dot{E}_2' = E_1$, рівняння (4.23.б) можна записати так:

$$-\dot{E}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{I}_2' \underline{Z}_2') \quad (4.24)$$

а для приведенного трансформатора рівняння (4.11.а) дістане вигляд $\dot{U}_2' = \dot{I}_2' \underline{Z}_n'$.

Тоді
$$-\dot{E}_1 = \dot{I}_2' (\underline{Z}_2' + \underline{Z}_n') \quad (4.24.a)$$

До вузла струмів «а» (див. рис.4.5.а) протікає струм $\dot{I}_2'$ який направлений назустріч струму $\dot{I}_1$.

Величина $(-E_1)$ чисельно може бути представлена падінням напруги $I_0 Z_m$ в деякому повному опорі

$$Z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2} \quad (4.25)$$

Рівняння (4.24) описує електричне коло (рис.4.5.а) вторинної обмотки. Дійсно, якщо до електричного кола, що має

два послідовно з'єднані резистори, прикласти різницю потенціалів, рівну $(-E_1)$, то у вказаному напрямку потече струм I'_2 .

Так як, у приведенного трансформатора $E_1=E'_2$, то на схемі (рис. 4.5.а) в точках «А» і «а»; «Х» і «х» рівні потенціали, що дозволяє з'єднати точки, а магнітний зв'язок замінити на електричний і отримати повну схему заміщення зведеного трансформатора (рис. 4.5.б). Ця електрична схема повністю, як і трансформатор з магнітним зв'язком, характеризується рівнянням (4.23), отже, вона представляє модель трансформатора, зібравши й дослідивши яку можна вивчати всі явища, що проходять в трансформаторі при різних режимах. Через особливості графічного позначення схема отримала назву Т-подібної.

§ 4.8 Режим холостого ходу трансформатора

Режим холостого ходу - це режим роботи трансформатора при відсутності навантаження (рис. 4.5.в) $Z_H = \infty$ і, виходячи з цього, $I'_2 = 0$.

Основні рівняння трансформатора отримують вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{ll} \dot{U}_1 = -\dot{E}_0 + \dot{I}_1 Z_1 & (4.26.a) \\ \dot{U}'_{20} = \dot{E}'_2 & \text{або} \quad \dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (4.26.б) \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 & (4.26.в) \end{array} \right.$$

Схема заміщення холостого ходу (рис.4.6) фактично є елементом на рис. 4.5.а без струму I'_2 . Якщо до первинної обмотки підвести номінальну напругу $U_{ном}$, то вольтметр у вторинній обмотці виміряє напругу U_{20} , яка є *номінальною*

напругою вторинної обмотки і яка практично рівна вторинній ЕРС. Тоді, згідно з виразом 4.6, $k = U_{1ном} / U_{20}$.

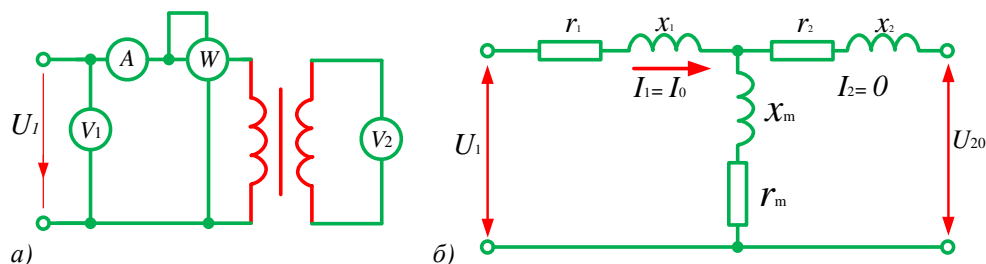


Рис. 4.6 - Електрична схема(а) та схема заміщення(б) трансформатора в режимі холостого ходу

Вимірявши амперметром потужність, яку споживає трансформатор P_0 , знаходять параметри схеми заміщення:

$$Z_1 + Z_m = U_{1ном} / I_0; \quad r_1 + r_m = P_0 / I_0^2$$

і

$$x_1 + x_m = \sqrt{(Z_1 + Z_m)^2 - (r_1 + r_m)^2} \quad (4.27)$$

Струм холостого ходу I_0 в порівнянні з номінальним дуже малий (2-5%), тому електричними втратами $I_0^2 r_1$ нехтують, вважаючи, що вся споживана потужність P_0 витрачається на компенсацію втрат в сталі p_c , тобто $p_c = P_0$. При цьому $P_0 = I_0^2 (r_1 + r_m) \approx I_0^2 r_m$ звідки

$$r_m = P_0 / I_0^2 \quad (4.27.a)$$

Аналогічно вважають, що $x_1 + x_m \approx x_m$ так $x_m \gg x_1$, оскільки x_m визначається основним потоком Φ (потокм взаємодукції), а x_1 - потоком розсіювання $\Phi_{1роз}$, який в багато разів менший основного. Виходячи з цього,

$$Z_m = U_{1ном} / I_0 \quad (4.27.6)$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \quad (4.27.в)$$

Тому ділянку схеми заміщення між точками « а і b » (рис.4.5), що визначається виразом (4.25), називають *колом намагнічування*.

Отже, дослід холостого ходу дозволяє дослідним шляхом визначити коефіцієнт трансформації, магнітні втрати в сталі і параметри частини схеми заміщення. Рівняння (4.26) дозволяє побудувати векторну діаграму при холостому ході (рис.4.7).

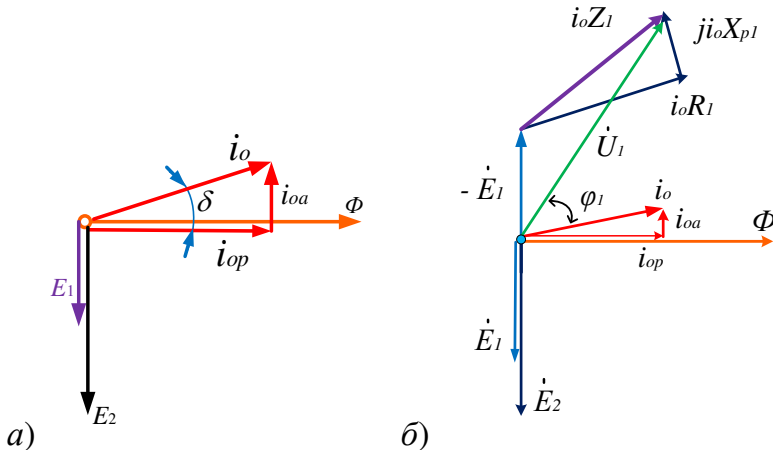


Рис. 4.7 – Спрощена (а) та повна (б) векторні діаграми трансформатора в режимі холостого ходу

§ 4.9 Режим короткого замикання трансформатора

Цей режим виникає при замкнених накоротко затискачах вторинної обмотки трансформатора, рис. 4.1 $Z_k = 0$, а на рис. 4.5,в $Z'_k = 0$ і $U'_2 = 0$. В експлуатації такий режим є аварійним і небезпечним для трансформатора. Але при проведенні дослідів до первинної обмотки трансформатора

підводять дуже малу напругу, яку поступово підвищують до тих пір, поки при деякому його значенні U_{1k} по обмотках потечуть номінальні струми. Напруга, як правило, складає 5-10% від номінальної, тому магнітний потік, значення якого залежить від напруги, також малий. Але магнітні втрати сталі, як відомо, пропорційні квадрату індукції, тобто квадратів магнітного потоку.

Наприклад, нехай при досліді короткого замикання $U_{1k} = 0.07U_{1ном}$; тоді $\Phi_k \approx 0.07\Phi_{ном}$ і магнітні втрати складуть $(\Phi_k / \Phi_{ном})^2 \cdot 100 = 0.07^2 \cdot 100 = 0.49\%$ магнітних втрат при номінальному режимі. В такому випадку втратами в сталі й струмом холостого ходу можна знехтувати. При цьому зі схеми заміщення виключається коло намагнічування, а сама схема отримає вигляд, представлений на рис.4.8, б. Згідно умови проведення режиму короткого замикання $\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 = \dot{I}_{1ном}$.

Повний опір схеми заміщення при короткому замиканні становить:

$$Z_k = Z_1 + Z'_2 = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = U_{1k} / I_{1ном} \quad (4.28)$$

Дослід короткого замикання проводять при замкненому вторинному колі (рис. 4.8.а) на амперметр A_2 який має внутрішній опір, близький до нуля. Приладами A_1 , V_1 , W , A_2 вимірюють відповідно I_{1k} , U_{1k} , P_1 , I_{2k} .

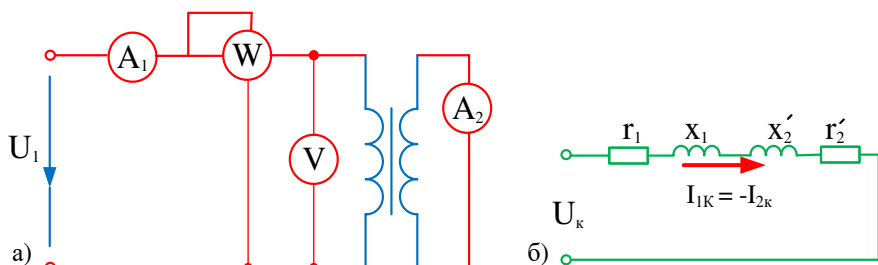


Рис. 4.8 - Електрична схема (а) та схема заміщення (б) при досліді короткого замикання

Струм короткого замикання звичайно у 20...30 разів більший за номінальний. Тому *дослід проводять при зниженій напрузі* U_1 , настільки, щоб у вторинному колі протікав струм, який дорівнює номінальному. Коефіцієнт трансформації визначають за вимірними струмами:

$$K_m = I_{2k} / I_{1k}$$

При проведенні досліді короткого замикання ватметром вимірюють споживану з мережі потужність P_k , тоді

$$r_k = r_1 + r_2' = P_k / I_{1ном}^2 \quad (4.28.a)$$

$$x_k = x_1 + x_2' = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} \quad (4.28.b)$$

Величини Z_k , r_k і x_k називаються *параметрами короткого замикання*.

Оскільки в режимі короткого замикання $p_c=0$ вся потужність P_k , яка витрачається на покриття електричних втрат в обох обмотках $I_{1ном}^2 r_k$ або, як часто говорять втрат в міді, тобто $p_{m1} + p_{m2} = P_k$.

Розділити Z_k (4.28) на складові дуже важко. Як правило, їх приймають однаковими, тобто $Z_1 = Z_2' = Z_k / 2$, що дуже близьке до дійсності.

Будуючи векторну діаграму режиму короткого замикання згідно (4.23.a) і схеми заміщення в цьому режимі, суміщають вектор струму $I_{1ном}$ з віссю ординат, тоді вектор активного падіння напруги $I_{1ном} r_k$ буде знаходитись з ним в фазі, а індуктивного $-j I_{1ном} x_k$ повернутий проти ходу годинникової стрілки на кут 90° .

Повне падіння напруги $I_{1ном} Z_k$ являє собою гіпотенузу

прямокутного трикутника, який називається трикутником короткого замикання. Визначимо, що всі його сторони пропорційні струму.

Напругу короткого замикання u_k , яку виражають у відсотках, визначають з відношення первинної напруги U_{1k} до номінальної $U_{1ном}$, коли в режимі короткого замикання по обмотках трансформатора течуть номінальні струми.

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{1ном}} \cdot 100 \% \quad (4.29)$$

Найчастіше u_k становить 5 - 10% від номінальної напруги в залежності від потужності трансформатора, причому більше значення відноситься до трансформаторів великої потужності.

Отже, дослід короткого замикання дозволяє визначити втрати в міді, напругу короткого замикання, параметри короткого замикання схеми заміщення й побудувати трикутник короткого замикання.

Найчастіше у трансформаторів $P_0 / P_k \approx 1/3$ і при номінальних струмах втрати в міді, тобто P_k складають 0,5-2% номінальної потужності трансформатора, причому більше значення відноситься до трансформаторів меншої потужності.

§ 4.10 Режим навантаження трансформатора

Цьому режиму відповідає схема заміщення (рис. 4.5в), а фізичні процеси в ньому описані рівняннями (4.23) за допомогою яких можна побудувати точну векторну діаграму й отримати наочне уявлення про співвідношення між всіма параметрами трансформатора. Однак для використання в практичних цілях ця векторна діаграма є досить складною, тому її потрібно спростити.

Оскільки струм холостого ходу в силових трансформаторах надзвичайно малий, то в багатьох випадках для практики цим

струмом можна знехтувати, тобто прийняти $I_0 = 0$, а, значить, $Z_m = \infty$ (рис.4.5.в). В такому випадку рівняння струмів (4.23.в) набуде вигляду

$$\dot{I}_1 = \dot{I}'_2 \quad (4.30)$$

а схема заміщення - як це зображено на рис. 4.9.а.

Для схеми на рис. 4.9.а замість двох рівнянь (4.23.а і 4.23.б), згідно з законом Ома, можна записати одне рівняння:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 \underline{Z}_k + (-\dot{I}'_2 \underline{Z}'_k) = -\dot{U}_2 + \dot{I}_1 \underline{Z}_k, \quad (4.31)$$

де $\underline{Z}_k$ визначається по (4.28)

З рівняння (4.31) бачимо, що при нехтуванні струмом I_0 трансформатор може бути заміщений параметром короткого замикання $\underline{Z}_k$. Навантаження трансформатора визначається як своєю величиною, так і характером, тобто воно може бути чисто активним (струм і напруга співпадають по фазі і кут між ними $\varphi_2 = 0$), активно-індуктивним (струм відстає від напруги і кут $\varphi_2 > 0$) і активно-ємнісним (струм випереджує напругу і кут $\varphi_2 < 0$).

Побудуємо векторну діаграму для схеми на рис. 4.9.б, вважаючи, що до трансформатора підведена номінальна напруга, він навантажений номінальним струмом $I_{1ном}$, а характер навантаження - активно-індуктивний визначається коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_2$ тобто дано кут φ_2 .

Зазначемо, що вторинна напруга при цих умовах з урахуванням (4.30) відповідає номінальному струмові:

$$-\dot{U}'_2 = \dot{I}_{1ном} \underline{Z}'_k = -\dot{I}_{2ном} \underline{Z}'_k$$

Для побудови векторної діаграми навантаженого трансформатора (рис. 4.9.а) необхідно використати основні

рівняння 4.23, записані відповідно до законів Кірхгофа для спрощеної схеми заміщення (рис. 4.9.б).

а)

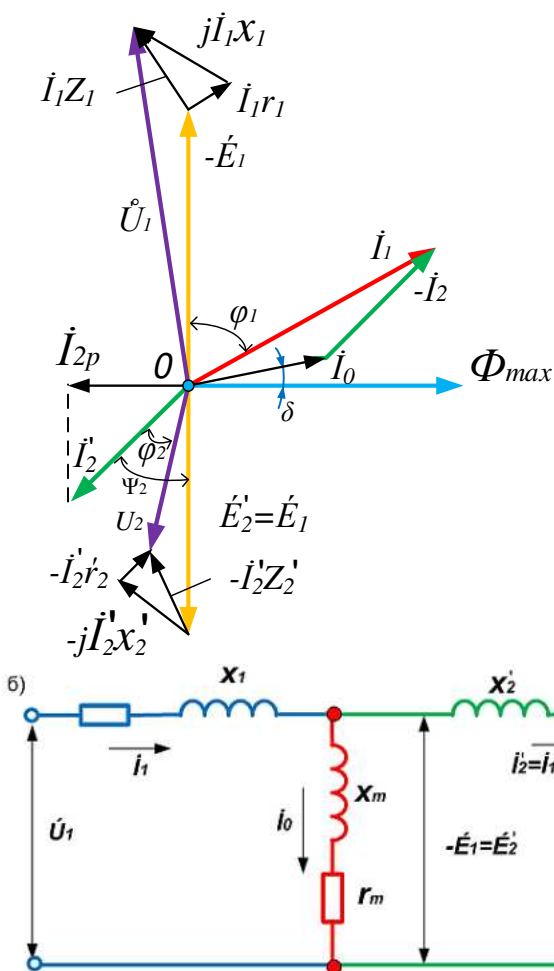


Рис. 4.9 – Векторна діаграма (а) і схема заміщення (б) трансформатора, що працює в режимі навантаження

Порядок побудови векторної діаграми такий:

- 1) першим будується вектор магнітного потоку Φ_0 ;
- 2) будують вектор струму холостого ходу який випереджає

вектор потоку на кут магнітного запізнення і розпадається на активну та реактивну складові:

$$I_0 = \sqrt{I_{0p}^2 + I_{0a}^2}$$

3) будуються вектори $\dot{E}_1$ та $\dot{E}_2$, що відстають від потоку на 90° ;

4) визначається зсув фаз між струмом $\dot{I}_2$ та ЕРС $\dot{E}_2$

$$\Psi_2 = \arctg \frac{X_{p2} + X_H}{R_2 + R_H} \text{ та будується вектор } \dot{I}_2;$$

5) за співвідношенням струмів $\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_2'$ будується вектор первинного струму $\dot{I}_1$;

6) за рівнянням напруги вторинного кола

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 X_{p2} - \dot{I}_2 R_2 \quad \text{будується вектор вторинної напруги } \dot{U}_2;$$

7) за рівнянням напруги первинного кола

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_2 X_{p1} \quad \text{будується вектор напруги}$$

первинного кола. Для побудови вектора напруги $\dot{U}'_{1ном}$ звернемося до рівняння (4.31). Виходячи з цього, для побудови вектора $\dot{U}_{1ном}$ необхідно до кінця вектора $(-E_1)$ добудувати вектори падіння напруги на первинній обмотці так, щоб вектор (активна складова) співпадав за напрямком з вектором струму $\dot{I}_1$, а вектор (реактивна складова) був йому перпендикулярний. Проводячи після того пряму, отримаємо вектор напруги $\dot{U}_{1ном}$, який випереджує струм на кут φ_1 .

8) визначаються зсуви фаз φ_1 та φ_2 між струмами та напругами.

Для побудови і визначення практичних можливостей векторної діаграми (рис.4.9) припускаємо, що значення Z_k відоме.

Струм, що відрізняється від номінального, знаходять з виразу:

$$I_l = \beta I_{1ном}, \quad (4.32)$$

де β - коефіцієнт навантаження.

При зміні навантаження при незмінному значенні первинної напруги відбувається зміна вторинної напруги, яка залежить від навантаження. Це перший важливий практичний висновок, отриманий за допомогою векторної діаграми.

При зміні характеру навантаження (кута φ_2 , а значить, і φ_1) також відбувається зміна вторинної напруги. Дійсно, модуль вектора $\dot{U}_{1ном}$ незмінний, але в залежності від значення кута φ_1 він може змінювати своє положення.

Таким чином, можна зробити другий висновок: вторинна напруга залежить від характеру навантаження при незмінній її величині (див. рис. 4.10).

§ 4.11 Зміна напруги і зовнішня характеристика трансформатора

Навантажений трансформатор описується рівняннями 4.23 (співвідношення струмів, рівняння напруг первинного та вторинного кіл):

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \\ \dot{U}'_2 = \dot{E}'_2 - \dot{I}'_2 \underline{Z}'_2 \\ \dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_0) \end{cases}$$

У режимі навантаження вторинна напруга U_2 незначною мірою залежить від струму навантаження. Ця залежність ($U_2 = f(I_2)$), наведена на рис.4.10, називається *зовнішньою характеристикою*, вона визначається при умові $U_2 = const$, $\cos \varphi_2 = const$.

У стандартах щодо трансформаторів нормується падіння напруги U_2 при номінальному струмі навантаження $I_2 = I_{2н}$.

На рис. 4.10 показані зовнішні характеристики при різних

характерах навантаження. В межах навантаження $0 < \beta < 1$, вони практично прямолінійні.

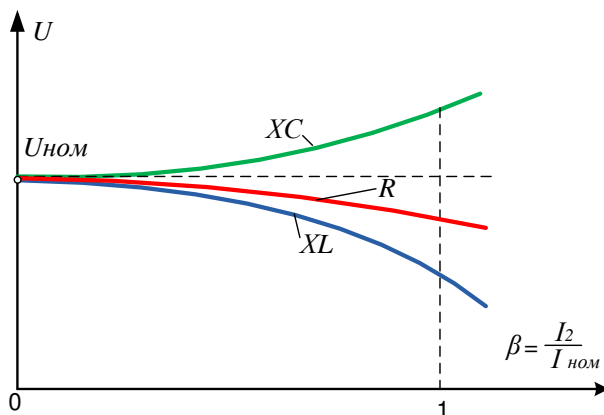


Рис. 4.10 – Зовнішня характеристика трансформатора при різних навантаженнях

Контрольні запитання

1. З якою метою використовують трансформатори?
2. На чому заснований принцип дії трансформатора; що таке коефіцієнт трансформації?
3. З яких елементів складається активна частина трансформаторів? Яке їх призначення?
4. Опишіть будову силового трансформатора; яке призначення трансформаторного масла і для чого використовується розширювач?
5. Як виводяться рівняння ЕРС трансформатора?
6. Чому трансформатор не можна вмикати в мережу постійного струму?
7. Що таке приведений трансформатор? Для чого і при яких умовах робиться приведення?
8. Чому зі збільшенням вторинного струму зростає первинний струм?
9. Що називають схемою заміщення трансформатора? Як

вона будується?

10. Що визначають при проведенні дослідів холостого ходу і короткого замикання трансформатора?

11. Що називають напругою короткого замикання трансформатора і в яких одиницях вона вимірюється?

12. Побудуйте спрощену схему заміщення трансформатора в режимі навантаження і відповідну їй векторну діаграму; покажіть, як буде змінюватись вторинна напруга при зміні величини і характеру навантаження?

13. Що називають номінальною зміною напруги трансформатора, покажіть її на зовнішніх характеристиках при різних характерах навантаження?

Частина 5 ТРИФАЗНІ І СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

§ 5.1 Призначення і принцип виконання трифазного трансформатора

Трифазний трансформатор служить для перетворення електричної енергії трифазного струму з одним співвідношенням лінійних напруг і струмів в електричну енергію трифазного струму з іншим співвідношенням цих же величин.

Як правило, трифазними створюються силові трансформатори, призначені для передачі й розподілу електричної енергії на трансформаторних підстанціях промислових підприємств.

В системах електропередачі, де потрібно перетворювати великі потужності (більше 80000 кВА), замість трифазних трансформаторів використовуються групи, що складаються з трьох однофазних трансформаторів. Пояснюється це великими габаритами трифазних трансформаторів великої потужності й складністю їх транспортування до місця призначення.

Обмотки трифазних силових трансформаторів, які складають трифазну групу, з'єднують між собою в зірку або в трикутник.

Магнітопровід трифазного трансформатора складається з трьох вертикальних стержнів, замкнутих між собою зверху і знизу ярами.

Принцип використання тристержневого трансформатора полягає в виконанні трифазної групи з трьох однофазних трансформаторів (рис. 5.1.а), по обмотках яких *A*, *B* і *C* течуть синусоїдальні струми, зсунуті в часі відносно один одного $2\pi/3$ рад.

Будемо вважати, що відповідні магнітні потоки також синусоїдальні, тобто

$$\begin{cases} \Phi_A = \Phi_m \sin \omega t, \\ \Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \\ \Phi_C = \Phi_m \sin(\omega t - 4\pi/3) \end{cases}$$

Об'єднаємо три стержні 1, 2 і 3 (див. рис. 5.1.а) в один загальний, тоді сумарний магнітний потік в ньому становить:

$$\Sigma \Phi = \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = 0 \quad (5.1)$$

Отже, загальний стержень можна викинути, отримавши симетричний трансформатор (рис. 5.1.б).

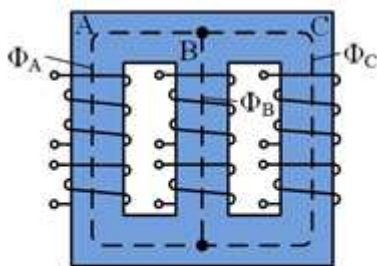


Рис. 5.1- Принципова схема трифазного трансформатора

Ще в 1889 році М.О. Доливо-Добровольський зазначив, що падіння магнітного потенціалу в ярмах трансформатора фази *B* невелике, і запропонував їх викинути, отримавши більш компактний трансформатор (рис.5.1.в), конструкція якого отримала загальне розповсюдження. Такий магнітопровід не повністю симетричний і, щоб зменшити несиметрію, переріз ярма виконують трохи більшим за переріз стержнів. Крім того, така магнітна несиметрія позначається лише на струмі холостого ходу. Але струм холостого ходу дуже мало впливає на робочі струми обмоток.

На кожен стержень трансформатора насаджують обмотку *BH* і *HH* (рис. 5.1.г), тому при симетричній напрузі живлення й рівномірному навантаженні всі фази знаходяться в однакових умовах. Виходячи з цього, виведені раніше формули й схеми заміщення для однофазного трансформатора справедливі також для трифазного трансформатора. Винятком є режим холостого ходу, на який впливає схема з'єднання обмотки.

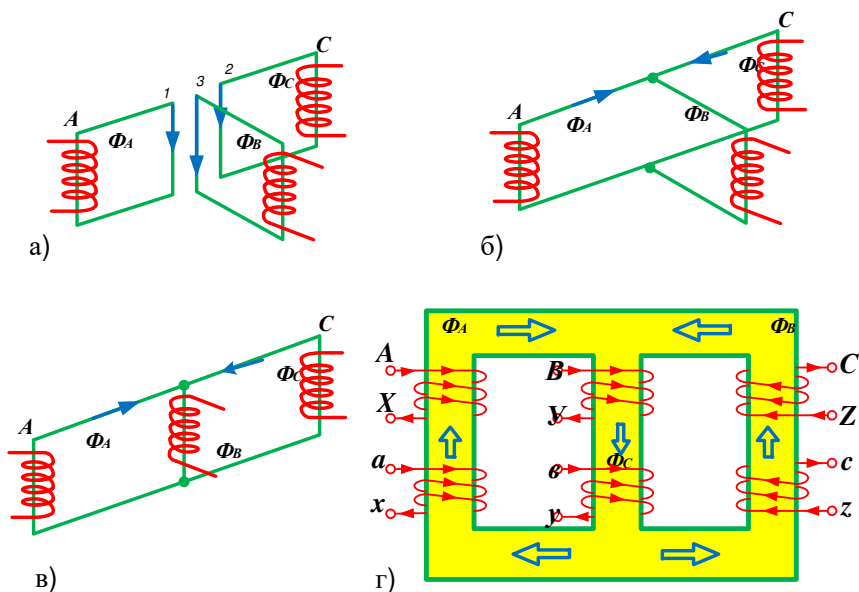


Рис. 5.1.а – Утворення тристержневого трансформатора (а,б,в) і його принципова схема (г)

Іншою особливістю трифазних трансформаторів є необхідність дотримання початків і кінців при з'єднанні як первинних, так і вторинних обмоток (фаз) трансформатора. Але, як правило, первинна і вторинна обмотки (фази) мають однаковий напрямок намотування на стержні трансформатора, тому напрямок їх магнітних потоків однаковий, так як з'єднання обмоток узгоджене. Якщо початки й кінці фаз переплутати, то з'єднання може бути зустрічним, що призведе до порушення нормальної роботи трансформатора.

На рис. 5.1.г показано позначення початків і кінців фаз первинних обмоток *ВН великими літерами* - A, B, C і X, Y, Z, і відповідно початки і кінці фаз вторинних обмоток *НН – малими літерами* a, b, c і x, y, z. Обмотки з'єднують "зіркою" (Y) або "трикутником" (Δ). З'єднання показують умовними позначеннями через дріб, в якого чисельник - обмотка *ВН*. Наприклад, якщо обмотки трансформатора з'єднані за схемою

"зірка-трикутник", то умовне позначення буде позначатися Y/Δ .

§ 5.2 Групи з'єднань трифазних трансформаторів

До цих пір при вивченні роботи трансформаторів ми твердили, що вектори ЕРС $\dot{E}_1$ і E_2 співпадають за фазою. Це справедливо лише при однаковому намотуванні й однойменному маркуванні виводів первинної і вторинної обмоток (рис. 5.2.а).

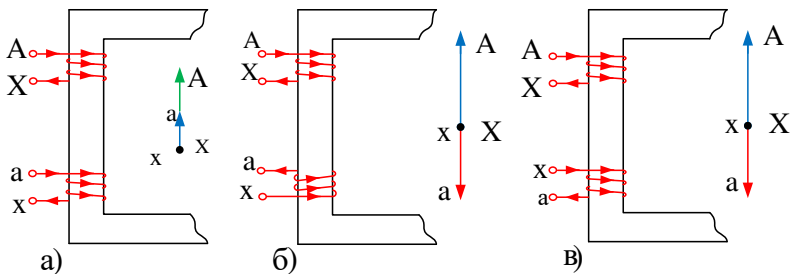


Рис. 5.2 - Групи з'єднань обмоток однофазного трансформатора

Якщо ж у трансформаторі змінити напрямок намотування обмотки HH (рис. 5.2.б) або при зберіганні намотування переставити позначення її виводів (рис. 5.2.в), то вектор $\dot{E}_2$ виявиться зсунутим за фазою відносно $\dot{E}_1$ на кут 180° . Аналогічні справи з зсувом первинної і вторинної напруг, оскільки для внутрішнього навантаження ЕРС і напруга мають однакову фазу.

У трифазних трансформаторах кут зміщення α залежить також і від схеми з'єднання первинної й вторинної обмоток, причому його значення може змінюватися від 0 до 360° , а кратність зсуву складає 30° . Отже група з'єднання обмоток трансформатора показує кут зміщення між векторами напруг первинної та вторинної обмотки. В залежності від значення кута α трансформатори розділяють на групи з'єднань, які

позначають цифрами годинникового циферблату 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 і 0.

Як видно з рис. 5.2, для однофазних трансформаторів можливі дві групи з'єднань: *нульова* (рис. 5.2.а) і *шоста* (рис.5.2.б.в). В Україні виготовляють однофазні трансформатори лише нульової групи (кут $\alpha = 0$), яка позначається 1/1-0.

Для визначення групи з'єднання обмоток трансформатора необхідно вектор первинної лінійної напруги підвести до цифри 12 годинникового циферблату, тоді вектор вторинної лінійної напруги покаже номер групи з'єднань, якщо вектори співпадають - група нульова. Можна також визначити групу, розділивши кут зміщення α цих векторів на 30° .

На рис.5.3 показана схема трансформатора для визначення групи з'єднання обмоток і відповідні векторні діаграми для шостої групи. Існують чотири основні групи з'єднання (0, 6, 11 і 5), із них шляхом колового перемаркування можна отримати і інші (*похідні*) групи.

Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі з'єднань Y/Δ та схемах Y/Y і Δ/Δ - парні, а при схемах Y/Δ і Δ/Y - непарні. Наприклад, якщо в трансформаторі з групою з'єднання $Y/Y-0$ виводи обмотки HH перемаркувати і замість послідовності abc прийняти послідовність cba , то вектор $\dot{U}_{ab}$ повернеться на кут $\alpha = 180^\circ$, утвориться група $Y/Y-4$, переставивши позначення виводів $Y/Y - 4$, отримаємо групу $Y/Y-10$.

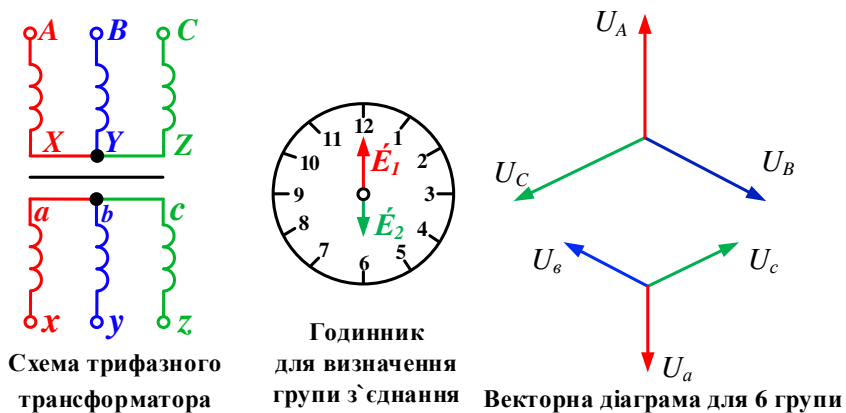


Рис.5.3 – Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі Y / Y

В Україні виготовляють трифазні силові трансформатори лише двох груп - нульової і одинадцятої, що полегшує їх включення на паралельну роботу.

§ 5.3 Паралельна робота трансформаторів

Для забезпечення безперебійної подачі електроенергії та регулювання ККД працюючих трансформаторів, їх необхідно включати на паралельну роботу.

Роздроблення загальної трансформаторної потужності на ряд паралельно працюючих трансформаторів дозволяє:

- краще вирішити проблему резервного електропостачання споживачів;
- відключити частину трансформаторів при зменшенні навантаження;
- спростити організацію профілактичного ремонту.

При цьому повинні бути збережені три умови ввімкнення на паралельну роботу:

- номінальні первинні й відповідно вторинні напруги, у трансформаторів які включають на паралельну роботу, повинні бути однакові;
- паралельно працюючі трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднань;
- паралельно працюючі трансформатори повинні мати однакові напруги короткого замикання.

Недотримання першої умови призводить до виникнення зрівнювального струму, між паралельно ввімкненими трансформаторами, що зумовлений різницею вторинних напруг. Цей зрівнювальний струм перевантажує трансформатор з більш високою напругою холостого ходу (з меншим коефіцієнтом трансформації). Трансформатор з великим коефіцієнтом трансформації виявляється недовантаженим.

Оскільки перевантаження трансформаторів неприпустиме, доводиться знижувати загальне навантаження. На практиці допускається паралельна робота трансформаторів, якщо різниця в їх коефіцієнтах трансформації не перевищує 6,5 %, а для трансформаторів з $k > 3$ - не більше 1 %. В такому випадку значення ΔU , буде невеликим і зрівнювальний струм незначним.

При неоднакових групах з'єднання між однойменними затискачами вторинних обмоток виникає різниця напруг, яка при найменш можливому значенні кута $\alpha = 30^\circ$ досягає значення $\Delta U = 2U_2 \sin 15^\circ = 0.5U_2$. У абсолютно однакових трансформаторів зрівнювальний струм визначається виразом:

$$I_{yp} = \Delta U / 2Z_k = 0.26U_2 / Z_k .$$

В даному випадку величина $0.26U_2$ являє собою напругу, прикладену до короткозамкненого трансформатора, I_{yp} є струмом короткого замикання. Порівнюючи ці величини, бачимо, що вони приблизно в 3-5 разів перевищують напругу короткого замикання й номінальний струм трансформатора. Це

означає, що таке ввімкнення ні в якому разі не припустимо.

Неоднакові напруги короткого замикання призводять до нерівномірного розподілу навантаження між двома паралельно ввімкненими трансформаторами.

Якщо $u_{kI} \neq u_{kII}$, то при паралельній роботі більше навантажується трансформатор з меншим u_k і, щоб не допустити його перевантаження, доводиться знижувати загальне навантаження. Отже, нерівність напруги короткого замикання не дозволяє повного використання паралельного включення трансформаторів за потужністю. Задовільний розподіл навантаження має місце, коли значення u_k відхиляється від його середнього арифметичного значення не більше, ніж на $\pm 10\%$. Але, оскільки різниця в значеннях u_k тим більше, чим більше трансформатори відрізняються за потужністю, рекомендується, щоб відношення номінальних потужностей паралельно працюючих трансформаторів було не більше, ніж $S_{Iном} / S_{IIном} = 1/3$.

Ця вимога пояснюється тим, що у трансформаторів різних потужностей активні й реактивні складові напруги короткого замикання різні.

§ 5.4 Автотрансформатор

Автотрансформатор - це такий трансформатор, у якого між первинною та вторинною обмотками є не тільки магнітний, але й електричний (гальванічний) зв'язок. Автотрансформатори можуть бути підвищуючими і понижуючими, однофазними чи трифазними.

Розглянемо принцип роботи на прикладі однофазного понижуючого автотрансформатора, схема якого представлена на рис. 5.4.

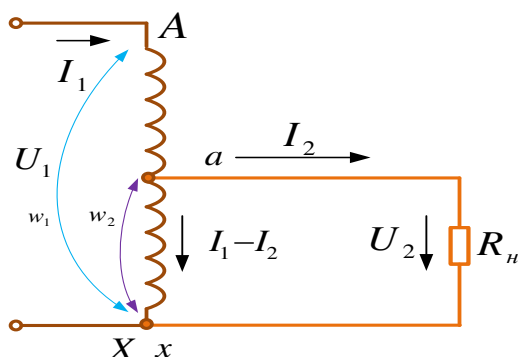


Рис.5.4 – Принципова електрична схема автотрансформатора

В режимі холостого ходу ($Z_n = \infty, I_2 = 0$) струм, що проходить по обмотці $A-X$, призводить до появи магнітного потоку, який індукуює в кожному витку ЕРС $E = 4.44 f \Phi_m$; отже, на затискачах ax з'явиться ЕРС

$$E_2 = 4.44 f w_{ax} \Phi_m = U_{20} = U_1 w_{ax} / w_{AX} = U_1 / k ,$$

де w_{AX} і w_{ax} - кількість витків, ввімкнених відповідно між затискачами, $A-X$ і $a-x$;

$k = w_{AX} / w_{ax}$ - коефіцієнт трансформації.

Порівняємо співвідношення звичайного трансформатора з автотрансформатором в режимі навантаження, при цьому знехтуємо струмом холостого ходу. Якщо б обмотки $A-X$ і $a-x$ були зв'язані між собою тільки електромагнітним чином, тобто, як у звичайному трансформаторі, то в цьому випадку рівняння МРС (4.18) мало б вигляд $\dot{I}_1 w_{AX} = -\dot{I}_2 w_{ax}$, звідки

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{w_{AX}}{w_{ax}} = -\dot{I}_2 \frac{1}{k} \quad (5.2)$$

Однак струм тече тільки по частині обмотки $A-a$, а на ділянці $a-x$ проходить струм, рівний геометричній сумі ($\dot{I}_1 + \dot{I}_2$); тоді з урахуванням (5,2)

$$\dot{I}_{ax} = \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = -\dot{I}_2 \frac{1}{k} + \dot{I}_2 = \dot{I}_2 \left(1 - \frac{1}{k} \right) \quad (5.3)$$

Виявляється, що струм у "вторинній" обмотці автотрансформатора менше вторинного струму в звичайному трансформаторі; це означає, що при одній і тій же густині струму переріз проводу "вторинної" обмотки автотрансформатора може бути менше, ніж у звичайного трансформатора.

Частина обмотки *A-a* повинна мати такий самий переріз, як і у звичайного трансформатора, так як по ній проходить струм I_1 . Однак її число витків менше, ніж у первинної обмотки звичайного трансформатора.

$$w_{Aa} = w_{AX} - w_{ax} = w_{AX} - w_{AX} / k = w_{AX} (1 - 1/k) \quad (5.4)$$

Таким чином, затрати міді в автотрансформаторі в цілому також можуть бути менші, ніж у звичайного трансформатора. Зменшення кількості обмотувальної міді в такій же мірі викличе й зменшення в ній електричних втрат.

Для будь-якого трансформатора існує поняття *розрахункової* (електромагнітної) потужності, якою визначаються всі його розміри: $S_p = EI$.

Згідно з виразом (4.4), ЕРС E_1 і E_2 пропорційні магнітному потокові, який можна представити як добуток індукції B на площу поперечного перерізу сталі магнітопроводу q_c , при заданих значеннях B і j розміри магнітопроводу і обмотки визначаються значенням потужності. S_p .

У звичайному трансформаторі розрахункова потужність обох обмоток становить:

$$S_p = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad (5.5)$$

Розрахункова потужність автотрансформатора може бути представлена у вигляді суми потужностей на ділянці $A-a$ і $a-x$, тобто

$$S_{p,a} = S_{p,Aa} + S_{p,ax} = E_{Aa} I_1 + E_{2ax} \quad (5.6)$$

Розрахункова потужність автотрансформатора і, значить, його розміри складають частину потужності звичайного трансформатора

$$S_{p,a} / S_p = (1 - 1/k) = k_g \quad (5.7)$$

Величину k_g називають *коефіцієнтом вигідності*. Очевидно, чим менше значення k , тим менше k_g , тобто тим вигіднішим застосування автотрансформатора.

Фізично це пояснюється тим, що в автотрансформаторі частина енергії передається із первинного кола до вторинного гальванічним шляхом (по дротам), тому що вторинне коло електрично зв'язане, з первинним. При $k > 2$ вигідність використання автотрансформатора зменшується; при цьому звичайно $k = 1.2 \div 2$, відповідно $k_g = 0.17 \div 0.5$.

Автотрансформатори малої потужності широко використовують в пристроях зв'язку і автоматики, радіоапаратурі і лабораторних стендах. Останнім часом застосовують також автотрансформатори великої потужності, за посередництвом яких з'єднують високовольтні мережі різних напруг (110, 154, 220, 330, 500 кВ).

Суттєвим *недоліком*, автотрансформаторів є те, що вторинне коло у них електрично з'єднане з первинним. При цьому обмотки HH і підключені до них споживачі мають мати таку ж ізоляцію по відношенню до землі, як обмотка VH і первинне коло. З тієї ж причини в цілях забезпечення електробезпеки не допускається використання автотрансформаторів для живлення кіл низької напруги від мережі високої напруги.

§ 5.5 Зварювальний трансформатор

При ручному дуговому електрозварюванні використовують трансформатори з напругою при холостому ході $U_{20} = 60 \div 75 \text{ В}$.

Для обмеження струму короткого замикання в момент запалювання дуги і забезпечення стійкого горіння при деякій зміні її довжини (коливання електроду) трансформатор повинен мати різко спадаючу зовнішню характеристику (рис. 5.5.а), для чого зварювальне коло роблять з великою індуктивністю ($\cos \varphi = 0.4 \div 0.5$).

Для регулювання зварювального струму в межах характеристики 1 і 2 на рис. 5.5,а ця індуктивність повинна бути змінною. Для цих цілей у зварювальне коло вмикають реактор (рис. 5.5,б), у якого за допомогою відповідного механізму змінюють зазор δ .

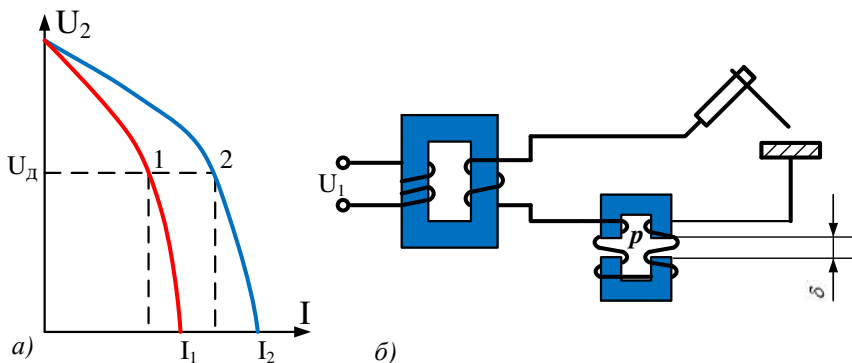


Рис. 5.5 - Зовнішні характеристики (а) і схема (б) зварювального трансформатора з реактором

При зменшенні зазору індуктивність реактора зростає, $\cos \delta$ зменшується, і характеристика зміщується в напрямку кривої 1, а значення зварювального струму зменшується від I_{22} до I_{21} при напрузі горіння дуги $U_d \approx 30 \text{ В}$.

По умовах безпеки праці для цілей електрозварювання не

можна використати автотрансформатори, які мають електричний зв'язок між первинними і вторинними колами: зварювальник може попасти під повну напругу первинного кола.

§ 5.6 Вимірювальні трансформатори

Ці трансформатори використовують в колах змінного струму для вимірювання великих значень напруг (більше 250 В) і струмів (більше декількох десятків ампер). При цьому забезпечується безпека робіт, тому що електровимірювальні прилади відділяються від кіл високої напруги, а також є можливість використати порівняно недорогі стандартні прилади, призначені для вимірювання малих струмів і напруг (амперметри на 1; 2; 2,5 і 5 А, вольтметри на 100 В).

Трансформатори струму призначені для ввімкнення амперметрів, струмових котушок ватметрів тощо. Трансформатори струму виконуються у вигляді двообмоткового підвищувального трансформатора, первинна обмотка якого вмикається послідовно у вимірювальне коло, або у вигляді прохідного трансформатора, у якого первинною обмоткою є провід, що проходить через вікно магніто-проводу.

Опори обмоток амперметрів, які представляють навантаження трансформатора, дуже малі; значить, дуже і дуже мале падіння напруги в них, тобто $U_2 \approx 0$. Тому можна вважати, що номінальним робочим режимом трансформатора струму є коротке замикання. В цьому режимі, згідно з (4.23.в) і (4.20), $I_1 \approx I_2' = I_2 / k$. В дійсності через наявність струму холостого ходу виникає деяка похибка при вимірюваннях, для зменшення якої магнітопроводи виконуються великим поперечним перерізом з високоякісної сталі. При цих умовах струм I_0 буде мінімальним.

Слід особливо підкреслити, що вторинну обмотку при

роботі трансформатора струму неприпустимо розмикати або залишати розімкнутою перед ввімкненням. В цьому випадку трансформатор переходить в режим холостого ходу, при якому в десятки й навіть в сотні разів зростає магнітний потік, індукція та втрати в сталі магнітопроводу, трансформатор перегрівається й може вийти із ладу. Але ще більшу небезпеку представляє різке підвищення напруги на затискачах вторинної обмотки. Якщо при номінальному робочому режимі (коротке замикання) $U_2 \approx 0$, то при переході в режим холостого ходу напруга U_2 може досягнути декількох сотень і навіть тисяч вольт, що представляє велику небезпеку для обслуговуючого персоналу. Для попередження випадкового режиму холостого ходу необхідно перед ввімкненням приладів замикати обмотку накоротко.

Трансформатори напруги використовуються для ввімкнення вольтметрів, котушок напруги ватметрів, фазометрів і різних реле. Трансформатор напруги виконується у вигляді двообмоткового понижувального трансформатора, вторинна обмотка якого в цілях безпечного обслуговування персоналом заземлюється.

Відомо, що опір обмоток вольтметрів надзвичайно великий, по них течуть дуже малі струми; тому можна вважати, що нормальним режимом роботи трансформатора напруги є *холостий хід*. В цьому режимі з достатньою точністю можна вважати $U'_2 = E'_2 = E_1 \approx U_1 \approx U_2 / k$. В дійсності струми в обмотках трансформатора створюють деяке падіння напруги, яке виключає похибки при вимірюваннях. Очевидно, ці похибки будуть тим менші, чим менший повний опір обмоток Z_1 , Z_2 , і втрати в сталі останні зменшують, використовуючи магнітопроводи великого поперечного перерізу, виготовлені з високоякісної сталі.

Контрольні питання

1. Яке призначення і принцип виконання трифазних трансформаторів?
2. Як маркуються виводи обмоток трифазних трансформаторів?
3. Які є основні схеми з'єднання обмоток трифазних трансформаторів, їх умовне позначення?
4. Що називають групою трансформатора, чим вона визначається?
5. Які групи можна отримати при різних схемах з'єднання трифазних трансформаторів?
6. Яких умов слід дотримуватися при ввімкненні трансформаторів на паралельну роботу?
7. Що таке автотрансформатор, який принцип його роботи?
8. Порівняйте виконання обмоток звичайного трансформатора і автотрансформатора, в чому вигода використання останнього?
9. Порівняйте розрахункові потужності звичайного трансформатора і автотрансформатора; коли вигідніше використовувати останній?
10. Де використовують автотрансформатори? В чому є їх недолік, в якій галузі вони використовуються?
11. Як отримати сильно спадну зовнішню характеристику зварювального трансформатора і регулювати значення його струму?
12. Для чого призначені вимірювальні трансформатори?

Розділ 3 ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 6 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

§ 6.1 Принцип виконання обмоток статора

Електричні машини, що розглядаються у цьому розділі (асинхронні і синхронні), не дивлячись на відмінності в будові і властивостях, мають багато спільного в принципі роботи і теорії. Наявність контактних кілець і щіток в колі якоря є його суттєвим недоліком, бо при значному струмі і високій напрузі робота рухомого контакту стає ненадійною. Тому, користуючись властивістю кінематичної зворотності електричних машин, обмотку якоря розміщують на статорі (цю обмотку далі будемо називати статорною). Здійснити підведення струму до ротора машини, на якому розміщений індуктор (синхронні машини), значно простіше через невелику потужність і низьку напругу кола збудження.

У відповідності до прийнятої системи змінного струму статорні обмотки виконують, як правило, трифазними. Виконати таку обмотку можна зі звичайної обмотки якоря постійного струму, якщо від'єднати колектор зі щітками і розділити її на три рівні частини; отримана трифазна обмотка, з'єднана трикутником (рис. 6.1,а). Запам'ятаємо, що виводи обмоток загальнопромислових і тягових машин, згідно ГОСТ 183-74, позначаються таким чином: $C_1 C_2 C_3$, - початки, C_4 , C_5 , і C_6 - кінці фаз, які їм відповідають. Але через причини методичного характеру, з метою покращення засвоєння запропонованого матеріалу, збережемо тут позначення виводів фаз, як у трансформаторів.

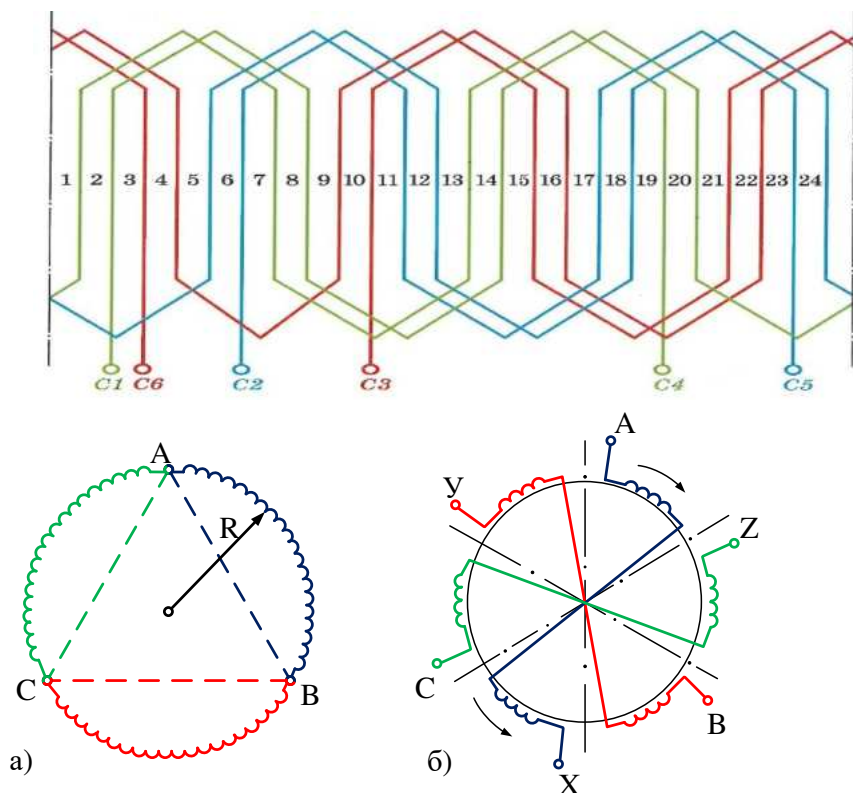


Рис. 6.1 – Хвильова обмотка статора і принципи виконання трифазної обмотки з трьома (а) і шістьма (б) зонами

Якщо обмотка розміщена на колі статора, радіусом R , то при значній кількості провідників (пазів) дуга АВ, що дорівнює $1/3$ довжини кола, буде еквівалентна алгебраїчній сумі наведених в них ЕРС, а хорда АВ відповідає їх геометричній сумі, що дає напругу між виводами А і В.

Відношення геометричної суми ЕРС секцій фази обмотки до їх алгебраїчної суми є засобом використання обмотки і називається коефіцієнтом розподілу. В даному випадку

$$k_p = \frac{r\sqrt{3}}{2\pi R/3} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi} \quad (6.1)$$

Таким чином, при трифазній обмотці ЕРС фази на виводах *A* і *B* на 17,3% менше алгебраїчної суми ЕРС, наведеної у фазі. Інакше кажучи, має місце значне недовикористання обмотки.

Кращий результат може бути отриманий при розподілі кіл на шість зон. При цьому кожна фаза складається з двох півфаз (рис.6.1, б), зсунутих одна відносно одної на 180° ел. Щоб ЕРС протилежних півфаз (наприклад) *A* та *X*) діяли по контуру узгоджено, треба з'єднати перемичкою кінці півфаз *A* та *X*. Наявність перемички є недоліком такого способу з'єднання, а коефіцієнт розподілу шестизонної обмотки

$$k_p = \frac{R}{2\pi R/6} = \frac{3}{\pi} = 0.955$$

тобто в цьому випадку втрачається лише 4-5% наведеної ЕРС, тому обмотки змінного струму виконують зазвичай шестизонними.

Для того, щоб всі півфази обмотки із зоною 60° були однакові, потрібно мати однакове ціле число пазів у кожній зоні, тобто кількість пазів, що приходить на полюс і фазу

$$q = \frac{z}{2pt} \quad , \quad (6.2)$$

де *Z* - кількість пазів всієї обмотки;

p - кількість пар полюсів машини;

m - кількість фаз.

Обмотка статора складається з котушок, котрі виконані аналогічно котушкам якірної обмотки машини постійного струму. Її можна з'єднати трикутником або зіркою. Якщо машина має *p* пар полюсів, то коло статора ділиться на *bp*

частин. Кількість півфаз у кожній фазі дорівнює кількості полюсів $2p$. Пари полюсів можуть бути з'єднані послідовно або паралельно.

В загальному випадку індукція магнітного кола на довжині подвійного полюсного поділу розподіляється по несинусоїдальній кривій. Ця симетрична відносно осі абсцис крива носить періодичний характер. Отже, її можна розкласти в ряд гармонійних складових (ряд Фур'є), що представляє собою суму синусоїд непарного порядку. Діюче значення ЕРС цих складових, дорівнюють $E_1, E_3, E_5, \dots, E_n$.

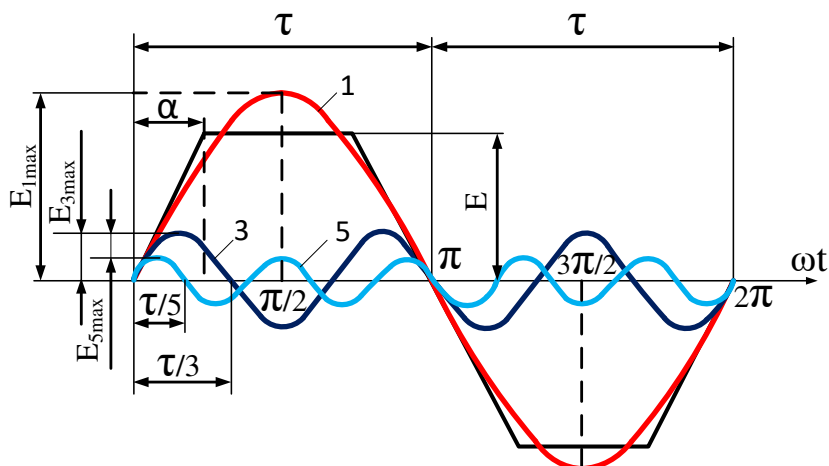


Рис. 6.2 – Розклад трапецієвидної ЕРС в гармонічний ряд Фур'є

Згідно теорії змішаних струмів, діюче значення результуючої ЕРС визначається за формулою:

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_n^2} = E_1 \sqrt{1 + (E_3 / E_1)^2 + (E_5 / E_1)^2 + \dots + (E_n / E_1)^2}$$

Звичайним вираховуванням легко впевнитися в тому, що вищі гармонічні складові мало впливають на результуючу ЕРС; вони тільки спотворюють її форму. Тому в подальшому для простішого викладення розподілу індукції на довжині подвійної полюсної поділки 2τ і наведену ЕРС будемо вважати

синусоїдальними.

Для того, щоб не мати вищих гармонійних складових ЕРС, обмотки виконують зі скороченим кроком, тобто $y < \tau$. При цьому, як і в машинах постійного струму трохи зменшується значення ЕРС. Відомо, що у трифазних обмотках, з'єднаних трикутником або зіркою, гармонічні складові струмів і ЕРС, кратні трьом, відсутні. Розглянемо, яким чином вкорочення обмотки впливає на знищення п'ятої гармоніки.

На рис. 6.3,а зображений розподіл у повітряному проміжку магнітної індукції першої B_1 і п'ятої B_5 гармонік. Якщо обмотка виконана з діаметральним кроком ($y_1 = \tau$), то ЕРС першої і п'ятої гармонік (e_1 і e_5) в обох боках секції (рис. 6.3 ,б) додаються арифметично; результуюча ЕРС $e_{к.д}$ має поряд з першою і п'яту гармоніку.

Якщо крок секції вкоротити на $\varepsilon = \left(\frac{1}{5}\right)\tau$, тобто мати $y = \left(\frac{4}{5}\right)\tau$ то ЕРС e_5 в обох сторонах секції будуть напрямлені назустріч і їх сума буде дорівнювати нулеві (рис. 6.3, в): результуюча ЕРС $e_{к.в}$ утримує тільки першу гармоніку. А для зниження сьомої гармоніки треба прийняти $y_1 = \frac{6}{7}\tau$.

Для того, щоб одночасно істотно послабити 5-у, 7-у і кратні їм гармоніки, приймають $y_1 = (0.8 \div 0.85)\tau$. Інші гармоніки (11-, 13-, 17-а тощо) істотно не впливають на роботу машини.

З рис, 6.3,в видно, що при вкороченні трохи зменшилась сумарна ЕРС першої гармоніки, тобто $E_{1в} < E_{1д}$. Це зменшення вважають *коефіцієнтом вкорочення*:

$$k_{y1} = E_{1в} / E_{1д} = \sin(90^\circ y_1 / \tau)$$

Магнітним потоком Φ , частота якого f_1 у фазі статора з кількістю витків w_1 наводиться ЕРС, діюче значення якої визначається формулою, аналогічною (4.4):

$$E_1 = 4.44k_{p1}k_{y1}f_1w_1\Phi = 4.44k_{o\delta 1}f_1w_1\Phi, \quad (6.3)$$

де добуток $k_{p1}k_{y1} = k_{o\delta 1} = (0.9 \div 0.94)$ називається обмотковим коефіцієнтом.

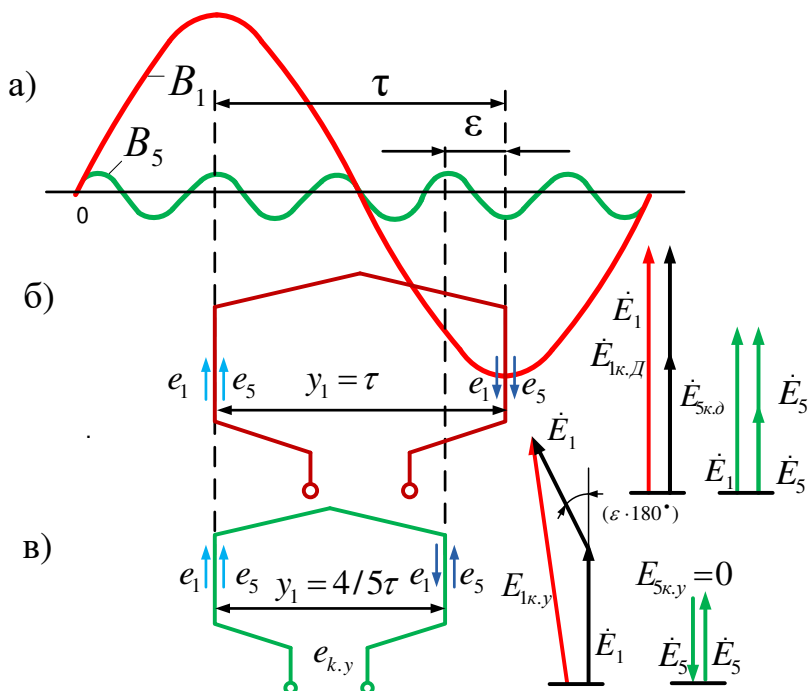


Рис. 6.3 – Усунення ЕРС п'ятої гармоніки

§ 6.2 Створення магнітного поля, що обертається

При випробуванні обмотки однофазним змінним струмом створюється пульсуюче магнітне поле, вектор індукції якого впродовж періоду τ , що відповідає куту 2π рад, змінюється від нуля до $+B_m$ знову до нуля, далі до $-B_m$ і знову до нуля.

На рис. 6.3.а розподіл індукції показаний в момент часу, що відповідає $\omega t = \frac{\pi}{2}$.

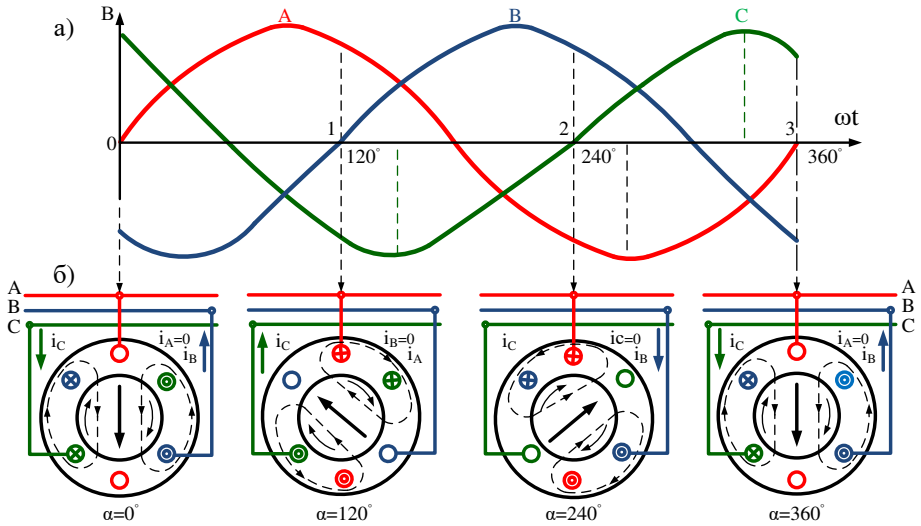


Рис. 6.3 - Розподіл індукції в повітряному зазорі (а) і розташування вектора пульсуючого поля (б)

В загальному випадку індукція по осі обмотки дорівнює $B_m \sin \omega t$. В кожній точці повітряного проміжку, розміщений на відстані x від осі обмотки, індукція буде визначатися:

$$B_x = B_m \sin \omega t \cos x = 0.5 B_m \sin(\omega t - x) + 0.5 B_m \sin(\omega t + x) \quad (6.4)$$

Кожний з членів правої частини (6.4) являє собою біжучу хвилю з амплітудою $0.5 B_m$, де одна обертається проти, а інша - за годинниковою стрілкою.

Оскільки $\omega t - x = \text{const}$ тоді $x + \text{const} = \omega t$ (6.5) тобто координата x завжди безперервно збільшується (по колу) з часом t .

Швидкість обертання хвилі можна визначити

продиференціювавши вираз (6.5), тоді отримаємо:

$$dx / dt = \omega = 2\pi f = 2\pi pn$$

Отже, пульсуюче магнітне поле можна представити у вигляді двох полів, що обертаються в протилежні боки. При повороті на 360° електричних, кожний вектор $0,5B_m$ описує коло, таке поле називається коловим.

Колове поле при трифазній обмотці. З метою утворення обертаючого магнітного поля, трифазна обмотка статора, рівномірно розподілена по колу і магнітні осі фаз A , B і C зсунуті в просторі на кут 120° електричних або $2\pi/3$ радіан. Магнітні індукції фаз дорівнюють відповідно:

$$\left\{ \begin{array}{l} B_a = B_m \sin \omega t \\ B_b = B_m \sin (\omega t + 2\pi / 3) \\ B_c = B_m \sin (\omega t + 4\pi / 3) \end{array} \right. \quad (6.6)$$

Результуюча індукція у довільно взятій точці становить:

$$B_{рез} = B_{ax} + B_{bx} + B_{cx} = 1.5B_m \sin (\omega t - x) \quad (6.7)$$

Отже трифазна обмотка створює хвилю з амплітудою $1,5B_m$ що обертається в просторі зі швидкістю ω .

На основі викладеного зробимо важливий висновок: *поле, що обертається, може бути утворене багатофазною обмоткою при наявності, одночасного зсуву фаз в часі і в просторі.*

При симетричному зсуві в часі і симетрії струмів, що проходять по фазах, а також при симетричному розташуванні

цих фаз у просторі поле є коловим.

Амплітуда результуючої хвилі розташована так, що в даний момент складова індукції максимальна (тобто максимальний струм фази).

Результуюча хвиля магнітної індукції перетинає осі фаз обмотки в такій послідовності, в якій струми в фазах проходять через максимум. Звідси випливає важливий практичний висновок: *для зміни напрямку обертання магнітного поля необхідно змінити хід чергування фаз*, тобто, вивести двох фаз підєднаних до мережі, поміняти місцями.

В симетричній двофазній обмотці магнітні осі взаємно перпендикулярні, а струми зсунуті на $\pi/2$.

Двофазна обмотка створює хвилю з амплітудою B_m , а швидкість її розповсюдження дорівнює ω .

При симетричній m -фазній обмотці, коли фази зсунуті в просторі на кут $2\pi/m$ радіан, а струми в часі - на цей же кут, рівняння біжучої хвилі має вигляд

$$B_{рез} = \frac{m}{2} B_m \sin(\omega t) - x \quad (6.8)$$

Отже, будь-яка симетрична m -фазна обмотка створює магнітне поле, що обертається, амплітуда якого дорівнює $\frac{m}{2} B_m$, а швидкість - ω .

Еліптичне поле. При недотриманні хоча б однієї з умов утворення колового поля результуючий вектор магнітної індукції описує в просторі еліпс. Вектор $B_{рез}$ що описує еліпс можна подати у вигляді суми двох векторів;

B_n - прямого і $B_{зв}$ - зворотного, що обертаються в різні боки з однаковими швидкостями ω .

Доказом цьому є відоме положення про те, що будь-яку несиметричну багатофазну систему можна проаналізувати,

використовуючи метод симетричних складових.

Так, несиметрична трифазна система може бути розкладена на симетричні складові прямої, зворотної і нульової послідовностей. Остання, не маючи часового зсуву, не утворює обертового поля, а створює лише додаткові втрати енергії. Тому еліптичне поле можна розглядати як результат додавання двох різних за величиною кругових полів, які обертаються в різні сторони. Практично це призводить до того, що зворотне поле "гальмує" ротор, зменшуючи ефективність дії прямого поля. Таке явище може мати місце, якщо на електричну машину через ті чи інші причини подано несиметричне живлення.

Контрольні запитання

1. Де розміщена обмотка якоря машини змінного струму, чому?
2. Що таке коефіцієнт розподілу; чому надається перевага шестизонним обмоткам?
3. З якою метою виконуються вкорочення обмоток, які бувають величини вкорочення?
4. Як можна уявити пульсуюче поле однофазної обмотки?
5. Чому дорівнює швидкість біжучої хвилі; яке поле називається коловим?
6. Які існують умови створення колового обертового поля?
7. Що таке еліптичне поле, як воно може бути представлено і чому воно виникає?

§ 7.1 Будова асинхронних машин

Асинхронні двигуни в силу ряду переваг (відносна дешевизна, високі енергетичні показники, простота конструкції й обслуговування), є найбільш розповсюдженими серед всіх електричних машин. У кількісному відношенні вони складають близько 90 % усього парку електродвигунів, а по встановленій потужності близько 55 %; вони споживають понад 40 % усієї вироблюваної в країні електроенергії.

За конструкцією асинхронні машини поділяють на два основних типи: з короткозамкненим ротором і фазним ротором, їх статори конструктивно однакові.

Осердя статорів і роторів набирають з листів електротехнічної сталі, у виштомпованих пазах яких вкладають обмотки, що мають однакову кількість полюсів.

Машина з короткозамкненим ротором (рис.7.2) складається із двох основних частин: статора та ротора і простіша за будовою в порівнянні з іншими машинами.

В пази осердя ротора 1 (рис. 7.3) закладають без ізоляції стержні 2, що замикаються накоротко з торців двома

кільцями 3. При цьому обмотка ротора дістає вигляд "білчиної клітки" (рис. 7.3.а), вона дуже часто саме так і зветься. Для двигунів великої потужності "білчину клітку"

(рис. 7.3.а) виготовляють з мідних чи латунних стержнів, кінці яких приварюють до короткозамкнених кілець з обох боків осердя. Для двигунів середньої і малої потужності, її разом з торцевими лопатками 4 (рис.7.3.в), що відіграють роль теплорозсіювачів і лопастей вентилятора, виливають з алюмінію.

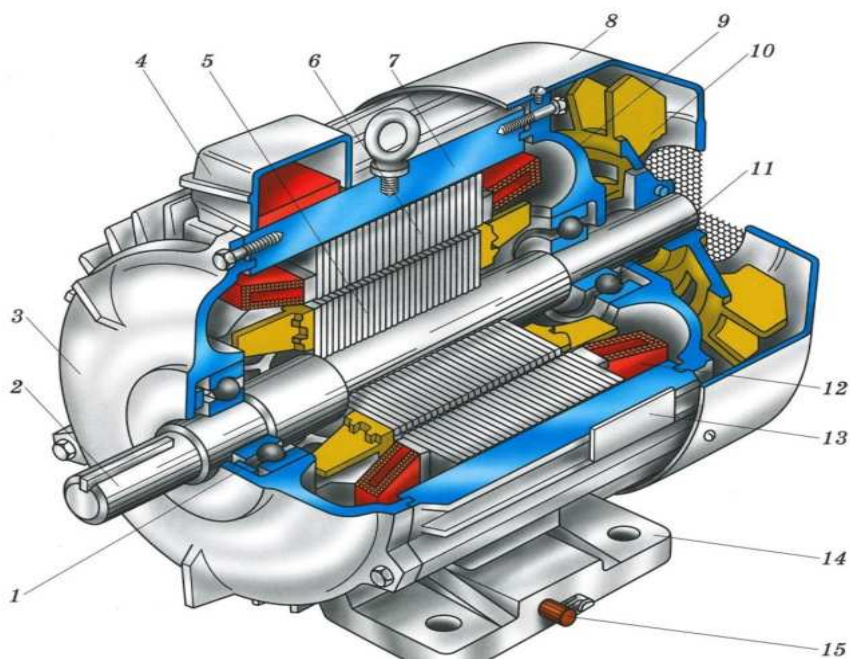


Рис. 7.2 - Асинхронна машина з короткозамкненим ротором:

1- підшипник; 2 - вал; 3 - підшипниковий щит; 4 - коробка виводів; 5 - осердя ротора з короткозамкненою обмоткою;

6 - осердя статора з обмоткою; 7 - корпус; 8 - кожух вентилятора; 9 - підшипниковий щит; 10 - вентилятор;

11- підшипник; 12 - обмотка статора; 13 - табличка з паспортними даними; 14 - лапи кріплення; 15 - гвинт заземлення

В електричному відношенні "білчина клітка" являє собою багатофазну короткозамкнену зірку, кількість фаз якої m_2 дорівнює кількості стержнів (пазів) ротора Z_2 , а в кожен фазу входить один стержень і прилеглі до нього ділянки короткозамикаючих кілець.

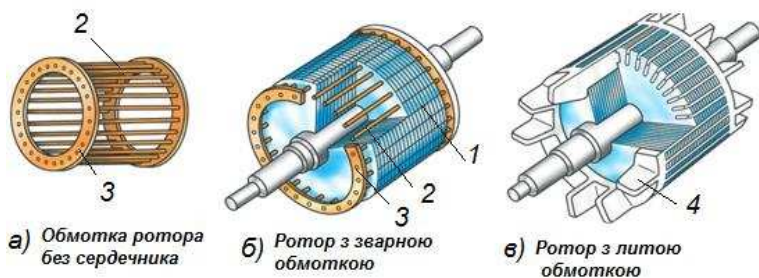


Рис. 7.3 - Будова короткозамкненого ротора

Оскільки один виток може бути утворений, як мінімум, двома провідниками, а фаза має один стержень (провідник), кількість витків в фазі "білчиної клітки" $w_2 = \frac{1}{2}$.

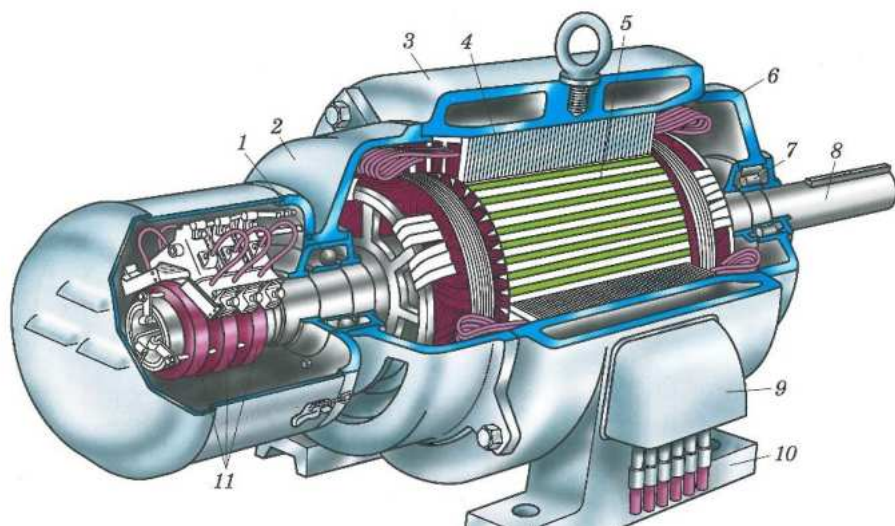
Асинхронна машина з короткозамкненим ротором найпростіша, найнадійніша, найлегша і найдешевша серед усіх типів машин, тому її застосування на транспорті є дуже перспективним.

Машина з фазним ротором (рис.7.4.а) трохи складніша за будовою ротора, але має ряд переваг в порівнянні з машиною з короткозамкненим ротором.

Трифазна обмотка статора, виконана із мідного проводу, укладена в пазах його осердя 4. На роторі 5 укладена аналогічна обмотка, яка звичайно з'єднана зіркою, а її виводи під'єднані до контактних кілець 11, що насаджені на вал машини 8. По кільцях 1 ковзають щітки 2 (рис.7.4.б), за допомогою яких в коло ротора можна включити реостат R_p .

Будова блока контактних кілець зображена на рис.7.4.б, контактні кільця 1 виготовляють з бронзи і запресовують в пластмасу, від кожного кільця відходить ізольована контактна шпилька. Машини забезпечені пристроєм, що дозволяє після запуску машини підняти щітки з контактних кілець, а самі контактні кільця замкнути накоротко.

а)



б)

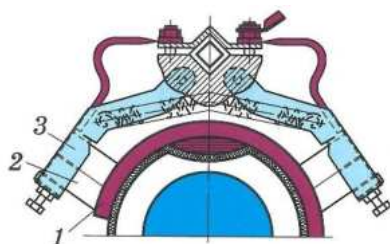


Рис. 7.4 – Будова трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором: 1, 7 - підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус; 4 – осердя статора з обмоткою; 5 – осердя ротора; 8 - вал; 9 – коробка виводів; 10 – лапи кріплення; 11 – контактні кільця

§ 7.2 Принцип дії асинхронного двигуна. Ковзання

Асинхронні машини, як і всі інші енергетично зворотні але викласти принцип їх дії простіше, почавши з двигуна. Трифазні і однофазні (двофазні) асинхронні двигуни найбільше використовуються в промисловості і на транспорті, тому теорія асинхронних машин викладена тут до застосування в режимі

двигуна.

Вважатимемо обмотку статора асинхронного двигуна, на яку подається напруга з мережі, як і в трансформатора, первинною, а обмотку ротора - вторинною з відповідними індексами у всіх позначеннях.

Від трансформатора асинхронна машина відрізняється тим, що між первинною обмоткою (статором) і вторинною обмоткою (ротором) є повітряний проміжок, який для покращення магнітного зв'язку між обмотками роблять мінімальним (0,3-1,2 мм), крім цього вторинна обмотка в асинхронних машинах рухома (обертається). Якщо трифазну обмотку статора (рис.7.1), що має p пар полюсів, під'єднати до мережі з частотою струму f_1 , то виникне оберতальне магнітне поле, частота обертання якого визначається по формулі (7.1)

$$n_1 = 60f_1 / p \quad (7.1)$$

Обертальне магнітне поле статора і ротора перетинає провідники обмотки статора і ротора та індукує в них ЕРС самоіндукції E_1 і взаємоіндукції E_2 , під дією останньої в обмотці ротора виникає струм I_2 . Взаємодія потоку статора і струму ротора призводить до появи електромагнітного оберতального моменту. Ротор починає обертатися з частотою $n < n_1$ в той же бік, що і поле статора.

Якщо уявити собі, що ротор обертається з синхронною частотою, тобто $n = n_1$, то ротор і магнітний потік статора будуть нерухомі один відносно одного і при цьому потік Φ не перетинатиме провідників ротора, а значить в них не буде індукуватися ЕРС взаємоіндукції E_2 , не буде струму I_2 і машина працювати не зможе.

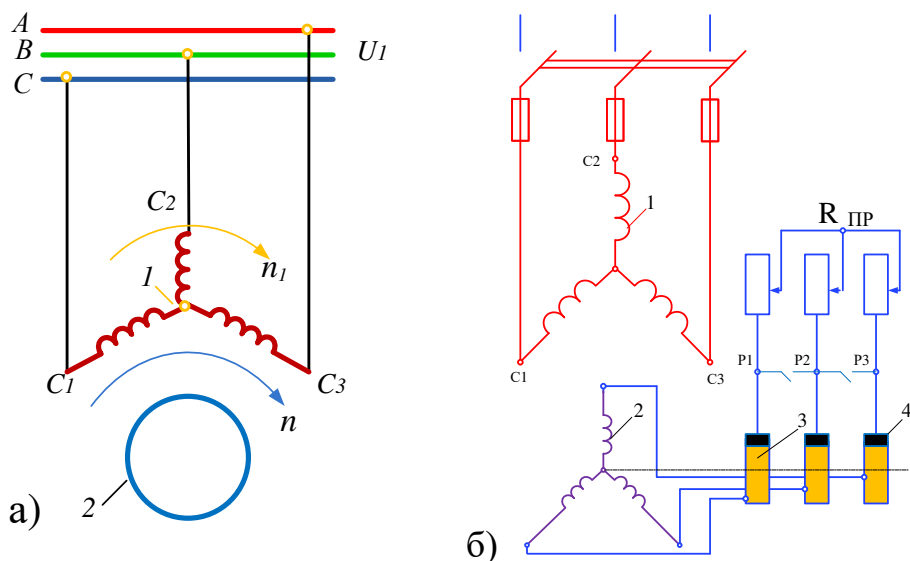


Рис.7.1 – Принципові електричні схема АД з короткозамкнутою обмоткою(а) та з фазною обмоткою (б)

Таким чином, незаперечною умовою виникнення обертового електромагнітного моменту є несинхронна частота обертання ротора, тобто $n \neq n_1$. З цієї причини машина отримала назву асинхронної.

Відносна різниця частот обертання поля статора і ротора називається ковзанням:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (7.2)$$

Воно характеризує ступінь "відставання" ротора від поля статора. Ковзання виражають також у відсотках, в цьому випадку рівняння (7.2) множать на 100%.

Зі співвідношення (7.2) можна отримати вираз частоти обертання ротора

$$n = n_1 (1 - s) \quad (7.3)$$

§ 7.3 Режими роботи асинхронних машин

Режим двигуна. Для асинхронних машин, режим двигуна, є основним. В момент запуску, коли $n = 0$, згідно (7.2), $s = 1$. Після появи обертання ротора та зростання частоти обертання ротора, величина ковзання зменшується.

Таким чином діапазони, ковзання асинхронного двигуна знаходяться в межах: $0 < s < 1$.

Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню двигуна, називається номінальним ковзанням.

Практично $s_{ном} = 0.01 \div 0.03$, лише у малих і спеціальних машинах номінальне ковзання $s_{ном} = 0.05 \div 0.07$.

При нерухомому роторі ($n = 0$) асинхронна машина нічим не відрізняється від трансформатора. В роторі, як і у вторинній обмотці трансформатора, індукується ЕРС взаємоіндукції E_2 ,

що має частоту мережі f_1 . Якщо ж ротор обертається з

частотою n , то частота обертання магнітного потоку Φ відносно ротора згідно (7.1) визначається: $n_2 = n_1 - n = n_1 s$.

В роторі протікає струм I_2 , частота, якого $f_2 = f_1 s = 50(0.01 \div 0.03) = 0.5 \div 1.5$ Гц. Враховуючи те, що частота мала, втрати в сталі при, $s_{ном}$ приймають рівними нулю.

Струм в багатofазній обмотці ротора викликає появу магнітного поля, що обертається, яке відносно самого ротора, згідно (6.5), буде обертатися зі швидкістю

$$\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi p n_2 \quad (7.5)$$

Але через те, що ротор обертається в просторі синхронно з полем статора, то поле ротора відносно будь-якої нерухомої точки простору буде обертатися з частотою $n_2 + n = n_1$.

Отже, поле ротора обертається в просторі синхронно з полем

статора, тобто ці поля нерухомі одне відносно одного і утворюють загальне поле, що обертається.

Режим генератора. Приклавши до валу ротора зовнішній обертальний момент, ротор можна, привести в обертання в напрямі обертання поля статора з частотою, вищою від синхронної. У цьому випадку ротор буде переганяти поле статора, а напрям ЕРС і активної складової струму ротора у порівнянні з режимом двигуна зміниться на зворотне. Значить, зміниться на зворотній і напрям електромагнітного моменту, котрий стане тепер гальмівним, а машина почне працювати в режимі генератора, віддаючи енергію в мережу.

Частота обертання ротора, при цьому теоретично може бути як завгодно великою.

Не дивлячись на виключну простоту і дешевизну асинхронних машин, а також дуже просте переведення їх в режим генератора, асинхронні генератори застосовуються рідко.

Справа в тому, що як і трансформатор, асинхронна машина, споживає з мережі індуктивний струм намагнічування, а оскільки цей струм через наявність повітряного проміжку, що чинить магнітному потокові значний опір, дуже великий: може досягати 30-40 % номінального струму машини, значить, на три асинхронних генератора потрібний один синхронний, що дорівнює їх потужності, який забезпечував би перші струмом намагнічування. Можливо і самозбудження асинхронних генераторів, коли до затискачів статора під'єднується батарея конденсаторів. Але вони дорогі і мають великі розміри. Останнім часом, у зв'язку з появою малогабаритних конденсаторів, асинхронні машини використовують на маленьких електростанціях, які використовують енергію вітру.

Режим електромагнітного гальма. Якщо нерухомий ротор

почати обертати в напрямі, зворотному напряміві обертання поля статора, то виникає електромагнітний момент, що діє в напрямі обертання поля статора. Він буде гальмувати ротор, що обертається проти поля.

Такий режим отримаємо, наприклад, коли під дією сили тяжіння вантаж, що висить на гаку крана, примусить обертатися проти поля ротор кранового двигуна. Те саме станеться, коли в асинхронному двигуні, що обертається "перекинути" виводи обмотки статора, змінити напрям обертання поля, тобто здійснити протилежне ввімкнення. Ротор може бути приведений в рух "проти поля" з будь-якою великою частотою.

Частота струму в роторі $f_2 = f_1 s > f_1$ значить надзвичайно великі втрати у сталі, дуже значний також і струм I_2 . В режимі електромагнітного гальма асинхронна машина, з короткозамкненим ротором може працювати дуже короткий час. В коло фазного ротора для обмеження струму вмикають додатковий резистор.

§ 7.4 Основні рівняння заміщення асинхронного двигуна

При нерухомому роторі асинхронний двигун є повною аналогією трансформатора, тому аналогічні і основні рівняння.

ЕРС статора визначається рівнянням (6.3), а ЕРС загальмованого ротора (7.6)

$$E_2 = 4.44 k_{oo} w_2 f_1 \Phi \quad (7.6)$$

У роторі, що обертається, буде індукуватися ЕРС, котра з урахуванням (7.5) і (7.6) дорівнює

$$E_{2s} = 4.44 k_{oo} w_2 f_2 \Phi = 4.44 k_{oo} w_2 f_1 s \Phi = E_2 s \quad (7.7)$$

Таким чином, ЕРС ротора, що обертається є функцією

ковзання і менше, ніж ЕРС в загальмованому роторі. Аналогічна справа із індуктивним опором. При нерухомому роторі $x_2\omega_1L_2 = 2\pi f_1L_2$, а при роторі, що обертається,

$$x_{2s} = \omega_2L_2 = 2\pi f_2L_2.$$

В процесі роботи обмотка ротора замкнена накоротко; отже, $U_2 = 0$. Через ті самі причини, що і у трансформатора, і при дотриманні тих самих умов у асинхронного двигуна проводять приведення вторинної обмотки до первинної.

На основі викладеного можна записати три основних рівняння асинхронного двигуна:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1Z_1 & (7.9) \end{cases}$$

$$\begin{cases} \dot{E}_2' - j\dot{I}_2'x_{2s}' - \dot{I}_2'r_2' = 0 & (7.10) \end{cases}$$

$$\begin{cases} I_1 = I_0 + (-I_2') & (7.11) \end{cases}$$

Після перетворення рівняння (7.10) записують:

$$\dot{E}_2' = j\dot{I}_2'x_2' + \dot{I}_2'r_2'/s = \dot{I}_2'\left(\frac{r_2'}{s} + jx_2'\right)$$

Рівняння (7.9), (7.10) і (7.11) дозволяють побудувати векторну діаграму, а також, як і для трансформатора (див. п. 4.7) схему заміщення; при цьому доцільно подати величину r_2'/s , що складається з двох складових:

$$r_2'/s = r_2' + r_2'(1-s)/s$$

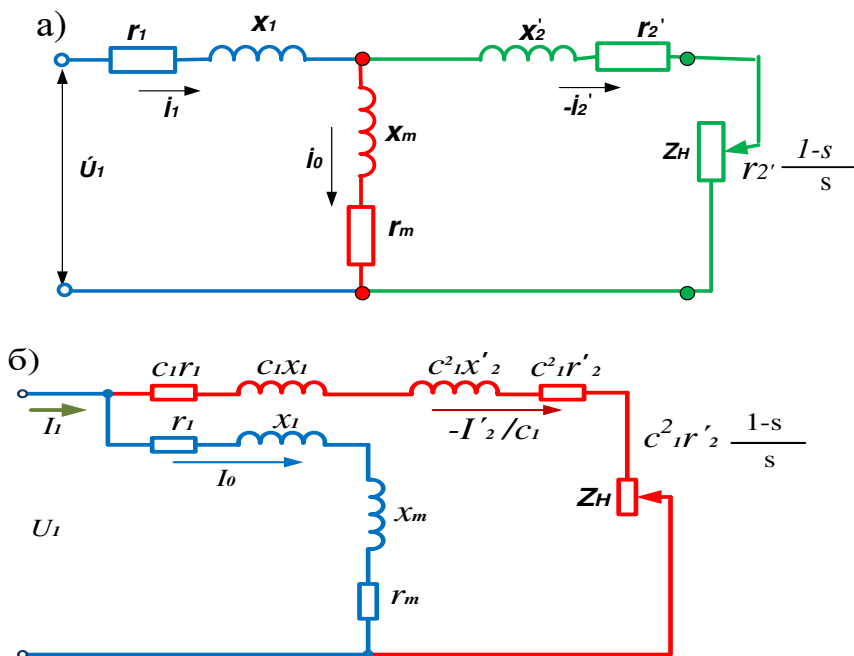


Рис. 7.5 - Схеми заміщення асинхронного двигуна:
(а) – Т- подібна; (б) – Г- подібна

Така Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна зображена на рис. 7.5.а. Порівняння її з рис. 4.5.в показує, що асинхронний двигун при заданому ковзанні s можна розглядати як трансформатор, до виводів вторинної обмотки якого під'єднане чисто активне навантаження $r_2'(1-s)/s$. Це навантаження - єдиний змінний параметр в схемі. Якщо $s \approx 0$, то $r_2'(1-s)/s \approx \infty$ що відповідає режиму холостого ходу. Коли ротор нерухомий ($s=1$), то $r_2'(1-s)/s=0$, що відповідає режиму короткого замикання.

Т-подібна схема заміщення (рис. 7.5.а) являє собою складне розгалужене коло, при розрахунку якого зустрічаються значні труднощі. При розгляді роботи асинхронного двигуна нехтувати колом намагнічування і струмом холостого ходу

щоб отримували просту схему заміщення не можна, через велике значення струму холостого ходу помилка, була б значною.

Для спрощення розрахунків Т-подібну схему заміщення перетворюють в Г-подібну (рис. 7.5,б), яка складається з двох самостійних паралельних гілок. Суть цього перетворення полягає в тому, що здійснюють таку заміну параметрів схеми, при якій струми I_1 і I_0 при даній напрузі U_1 залишаються незмінними. Тому послідовно з винесеним на затискачі колом намагнічування (Z_m) вмикають повний опір обмотки статора (Z_1), а інші параметри схеми заміщують за допомогою коефіцієнта c_1 як зображено на рис. 7.5,б.

Можна, показати, що $c_1 \approx 1 + x_1 / x_m$ причому для двигунів потужністю 1-10 кВт $c_1 \approx 1.04 \div 1.06$, а для більш потужних $c_1 \approx 1.02 \div 1.04$. Тому на практиці часто приймають $c_1 = 1$ і отримують спрощену Г-подібну схему заміщення.

Згідно закону Ома, приведений струм ротора в спрощеній схемі заміщення (на рис. 7.5,б при $c_1 = 1$) визначають по формулі (7.12)

$$I'_2 = U_1 / \sqrt{(r_1 + r'_2 / s)^2 + (x_1 + x'_2)^2} \quad (7.12)$$

§7.5 Робочий процес і енергетична діаграма асинхронного двигуна

Асинхронна машина є універсальним перетворювачем. Дійсно, в ній підведена до статора напруга U_1 перетворюється в напругу на роторі $U_p = I_2 r_2 (1 - s) / s$, кількість фаз статора, m_1 можна перетворити в кількість фаз ротора m_2 ,

частота статора f_1 перетворюється в частоту ротора f_2 і, нарешті, підведена електрична потужність P_1 - в механічну потужність на валі двигуна P_2

Вказані перетворення супроводжуються втратами енергії, тому робочий, процес асинхронного двигуна, зручно подати за допомогою енергетичної діаграми (рис. 7.6).

До статора трифазного асинхронного двигуна підводиться потужність :

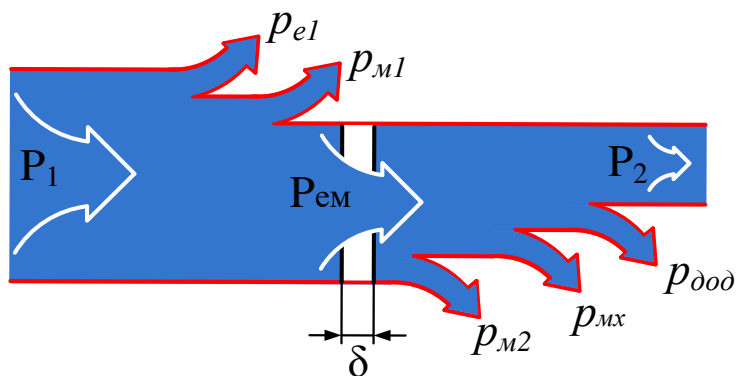
$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (7.13)$$


Рис. 7.6 – Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Струм, що тече по статору, створює електричні втрати p_{e1} , а в сталі статора виникають втрати від гістерезису і вихрових струмів p_{m1} . Потужність P_{em} , що залишилася, передається на ротор через повітряний проміжок δ електромагнітним шляхом і тому називається електромагнітною. Магнітний потік, що обертається, наводить в роторі ЕРС, а протікаючий струм створює електричні втрати їх часто також називають втрати в міді і позначають p_{m2} або p_{e2} . Ротор починає обертатися, розвиваючи механічну потужність P_{mx} . При обертанні ротора виникають механічні p_{mx} і додаткові p_{dod} втрати, віднявши які від P_{mx} , отримаємо корисну потужність

на валу двигуна P_2 .

Виходячи з умов рівноваги моментів, за допомогою енергетичної діаграми можна отримати ряд важливих співвідношень. В загальному випадку, коли асинхронний двигун має кількість пар полюсів $p > 1$, так звана механічна кутова швидкість магнітного потоку становить:

$$\Omega_1 = 2\pi n_1 = 2\pi f_1 / p = \omega_1 / p \quad (7.14)$$

а ротора

$$\Omega = \Omega_1(1 - s) \quad (7.15)$$

Електромагнітна і механічна потужності пов'язані з обертальним моментом двигуна співвідношеннями:

$$P_{em} = \Omega_1 M \quad (7.16)$$

$$P_{mx} = \Omega M \quad (7.17)$$

Підставивши (7.15) в (7.17), з урахуванням (7.16) отримаємо

$$P_{mx} = \Omega_1 M(1 - s) = P_{em}(1 - s) \quad (7.18)$$

З енергетичної діаграми випливає, що

$$P_{mx} = P_{em} - P_{m2} \quad (7.19)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (7.18) і (7.19), знайдемо

$$P_{em}(1 - s) = P_{em} - P_{m2}$$

Звідки
$$p_{e2} = P_{em} \cdot s \quad (7.20)$$

Таким чином, електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню.

§7.6 Обертальний момент асинхронного двигуна

Загальний вираз моменту. Електричні втрати в роторі з урахуванням його приведення

$$p_{e2} = m_2 E_{2s} I_2 \cos \varphi_2 = m_1 E'_2 s I'_2 \cos \varphi_2, \quad (7.21)$$

де m_1 і m_2 - кількість фаз статора і ротора відповідно, а φ_2 - кут зсуву між ЕРС і струмом ротора. Співставивши вирази (7.20) і (7.21), побачимо, що електромагнітна потужність

$$P_{em} = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (7.22)$$

Тоді, згідно (7.16), обертальний момент з урахуванням (7.6)

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = \frac{m_2 4,44 k_{\phi 2} w_2 f_1 \Phi I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = c_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (7.23)$$

де $c_m = 2,22 m_2 p k_{\phi 2} w_2 / p$ - стала.

Обертальний момент асинхронного двигуна залежить не від повного струму в роторі, а лише від його активної складової $I_2 \cos \varphi_2$. Цей висновок, як і формула (7.23) справджується для електричних машин всіх типів.

Момент і втрати в колі ротора. З урахуванням виразу (7.20) формулу (7.23) можна записати так:

$$M = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{p_{m2} / s}{\Omega_1} \quad (7.24)$$

тобто обертальний момент асинхронного двигуна залежить від електричних втрат в колі ротора. Значить, двигун, обмотка

ротора якого має значний опір, розвиває при інших рівних умовах значніший момент. В той же час збільшення електричних втрат робить роботу двигуна менш економною.

Залежність моменту від напруги. Електричні втрати в роторі $p_{e2} = m_2 I_2'^2 r_2 = m_1 I_2'^2 r_2'$. Підставивши сюди значення струму з (7.12), отримаємо

$$p_{e2} = m_1 r_2' \left(\frac{U_1}{\sqrt{(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right)^2 \quad (7.25)$$

Остаточне рівняння обертального моменту отримаємо підстановкою (7.14) і (7.25) у (7.24):

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega_1 [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (7.26)$$

Формула (7.26) дозволяє зробити важливий практичний висновок: *обертальний момент, асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги, прикладеної до статора.* Ця властивість асинхронного двигуна є його істотним недоліком. Наприклад, якщо асинхронний двигун електровоза розвиває номінальний момент при номінальній напрузі в контактній мережі, то при допустимому зменшенні напруги обертальний момент значно зменшиться, що може негативно відобразитися на роботі механізму приводу і самого двигуна. Тому асинхронні двигуни електровозів вибирають зі значним запасом по потужності у порівнянні з двигунами постійного струму, що приводять в дію аналогічні механізми.

Залежність моменту від ковзання. З виразу (7.26) випливає, що при $s > 0$ також $M > 0$, тобто має місце режим двигуна або режим електромагнітного гальма; при $s < 0$ також $M < 0$ (режим генератора). Крім цього, $M = 0$ при $s = 0$ або $s = \pm\infty$; отже, між цими значеннями ковзання знаходяться

(максимум і мінімум) моменту.

§7.7 Механічна характеристика асинхронної машини

Характеристика, що являє собою графічну залежність $M = f(s)$ при $U_1 = const$ і $f_1 = const$, може бути побудована за рівнянням (7.26), якщо задатися різними значеннями ковзання (рис. 7.7). З рисунка видно, що момент досягає максимуму при деякому ковзанні $s_{кр} \approx 0,15 \div 0,3$, що називається критичним.

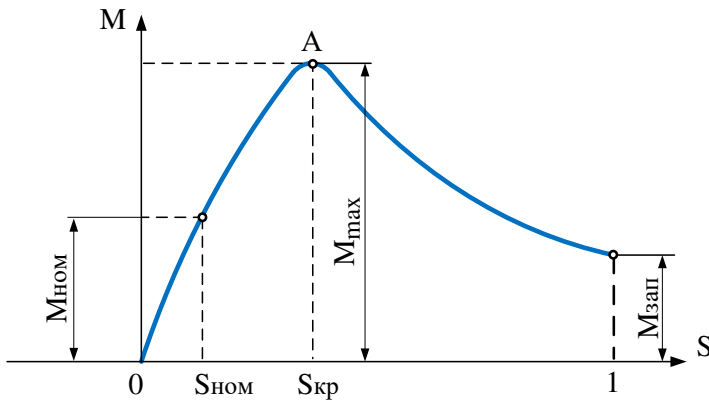


Рис. 7.7 - Механічна характеристика асинхронної машини

Форма кривої $M = f(s)$ вказує на те, що асинхронний двигун може стійко працювати тільки в діапазоні ковзань від $s = 0$ до $s = s_{кр}$, коли момент збільшується з ковзанням від $M = 0$ до $M = M_{max}$. Після перевищення критичного ковзання момент зменшиться і двигун неминуче повинен зупинитися. Таким чином, асинхронний двигун має границю по навантаженню, що визначає максимум обертового моменту.

Варто пам'ятати, що в діапазоні великих ковзань ($s > s_{кр}$), згідно рівнянь (7.5) і (7.20), різко збільшуються втрати у сталі і обмотці ротора в порівнянні з номінальним режимом. Теплота,

що при цьому виділяється, може призвести до несправності двигуна, навіть до виплавлення "білчиної клітки" ротора.

Максимальне значення моменту (критичне ковзання) можна визначити, взявши похідну від моменту (7.26) по ковзанню і прирівнявши до нуля, тобто $dM / ds = 0$.

В результаті цієї звичайної математичної операції отримаємо

$$s_{кр} = \pm \frac{r'_2}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x'_2)^2}} \quad (7.27, a)$$

У звичайних електричних машинах $r_1 \ll (x_1 + x'_2)$;

тому, нехтуючи величиною r_1 отримуємо

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r'_2}{x_1 + x'_2} = \pm \frac{r'_2}{x_k} \quad (7.27, б)$$

де $x_k = x_1 + x'$ - один з параметрів короткого замикання.

Значення максимального моменту визначимо за (7.26), підставляючи значення $s_{кр}$ з (7.27.б) і приймаючи $r_1 = 0$:

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{2\omega_1 x_k} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{4\pi f_1 x_k} \quad (7.28)$$

де знак "+" відноситься до режиму двигуна, "-" до режиму генератора.

З рівняння (7.28) видно, що максимальний момент залежить лише від конструктивних параметрів двигуна, (величини x_k) і в процесі експлуатації не може бути змінений. Активний опір кола ротора за (7.27) визначає тільки значення $s_{кр}$ при M_{max} .

Величина підведеної напруги дуже впливає на величини моментів $M_{зан}$, M_n та M_{max} (рис.7.7.1.а).

Відношення максимального моменту до номінального

називається коефіцієнтом перевантажувальної здатності;
звичайно

$$k_{\mathcal{M}} = M_{\max} / M_{\text{ном}} = 1,8 \div 2,5$$

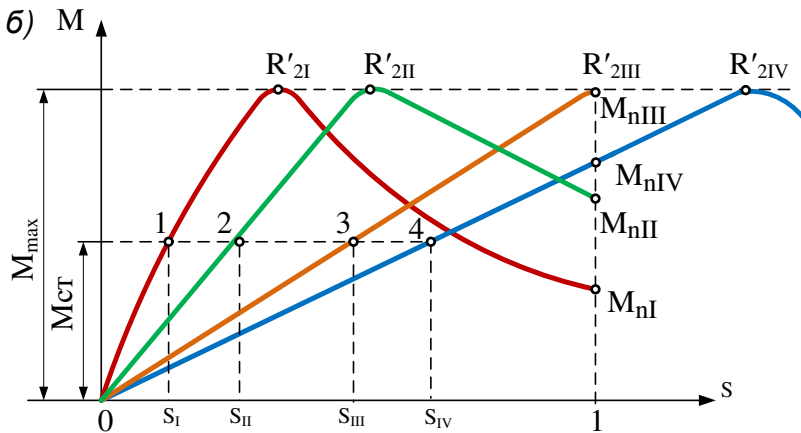
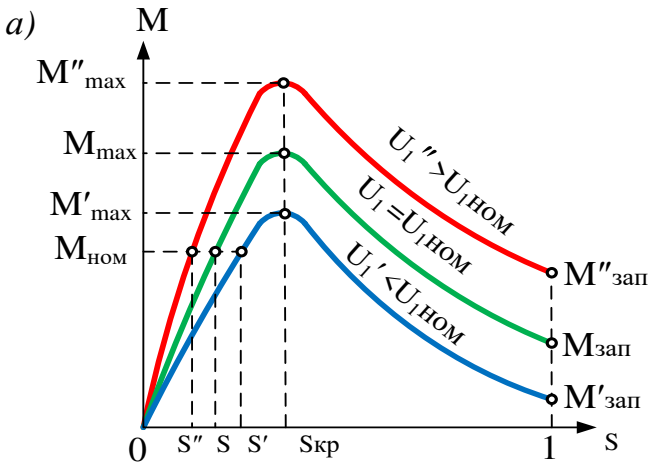


Рис. 7.7.1. - Механічні характеристики АД при зміні напруги (а) та при зміні величини активного опору (б)

В момент запуску $s = 1$; тому значення $M_{\text{зап}}$ можна отримати більшим або максимальним, в машинах з фазним

ротором, включивши в обмотку ротора додатковий реостат певної величини. Механічні характеристики $M = f(s)$ при зміні значення ковзання асинхронного двигуна з фазним ротором побудовані на рис.7.7.1, б.

Як бачимо з характеристик, при збільшенні навантаження на валу, частота обертання двигуна зменшується. За своїм виглядом робоча частина характеристики аналогічна механічній характеристиці двигуна постійного струму паралельного збудження. Якщо навантаження на валу збільшиться до M_{max} , то двигун може перейти на відрізок характеристики, де одночасно почне зменшуватися і обертальний момент і частота обертання аж до зупинки двигуна.

§ 7.8 Запуск в хід асинхронних двигунів

Запуск двигунів в хід має бути простим, при найбільшому можливому пусковому моменті і найменшому пусковому струмі. Практично використовують три таких способи:

- 1) прямий запуск, безпосереднє підключення статора до мережі;
- 2) запуск на знижену напругу, що підводиться до статора при запуску;
- 3) ввімкнення в коло ротора пускового резистора $R_{л}$.

Прямий запуск застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором. Двигун автоматично розганяється згідно механічної характеристики (див. рис. 7.8) від точки, що відповідає M_{zan} , до точки на робочій характеристиці, в якій встановлюється рівновага моментів.

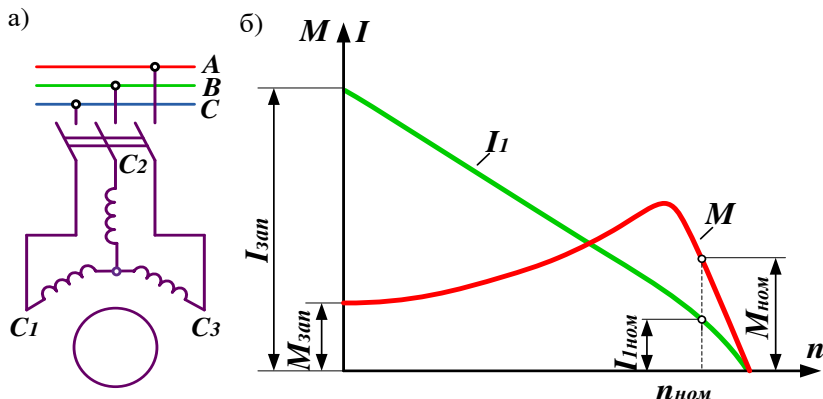


Рис. 7.8 - Електрична схема включення АД з короткозамкненим ротором на прямий запуск (а) та пускові характеристики (б)

Відношення моментів $M_{\text{зп}} / M_{\text{ном}} = k_n$ називають кратністю початкового пускового моменту. Для двигунів потужністю до 100 кВт $k_n = 1 \div 2$; потужністю більше 100 кВт $k_n = 0,7 \div 1$.

Недоліком прямого запуску є порівняно невелике значення k_n і надзвичайно великий стрибок пускового струму, що в 5-7 разів перевищує $I_{\text{ном}}$.

Запуск при зниженій напрузі застосовують з метою зменшення стрибка пускового струму. Для цього на період запуску в коло статора вмикають реактор, на якому спадає частина напруги, пропорційна пусковому струмові, або знижують напругу за допомогою автотрансформатора.

Застосовують також перемикання обмотки статора при запуску з робочої схеми "трикутник" (Δ) на пускову схему "зірка" (Y) рис.7.8.1. При ввімкненні статора по схемі Y напруга, що подається на фази обмотки зменшується в $\sqrt{3}$ разів, що обумовлює також зменшення фазних струмів, а лінійних - в три рази. Останнє дуже важливо для системи

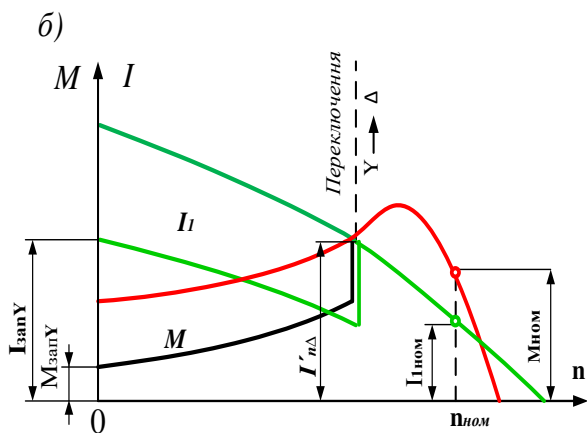


Рис. 7.8.1 - Електрична схема включення АД з короткозамкненим ротором на понижену напругу (а) та пускові характеристики (б)

198

ковзаннях. Підібравши таке значення опору пускового резистора r_p , щоб, згідно (7.27.б), $r_p + r_2' \approx x_k$, можна отримати $S_{kp} = 1$, тобто двигун при запуску розвине максимальний момент. Збільшення опору кола ротора, як видно з виразу (7.12), зменшить повний пусковий струм.

Фізичне пояснення цьому, здавалося б, парадоксальному явищу (струм зменшується, а момент зростає) впливає з виразу (7.23). Резистор хоч і зменшує повний струм, але збільшує його активну складову, оскільки збільшується активна складова опору Z_2 кола ротора;

$$\text{дійсно,} \quad Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2},$$

$$\text{з резистором} \quad Z_{2p} = \sqrt{(r_2 + r_p)^2 + x_2^2}.$$

Механічні характеристики двигуна при різних опорах ротора зображені на рис. 7.9,б. Тут характеристика з меншим порядковим номером відповідає більшому опорі кола ротора. Для кривої 1 $S_{kp} = 1$ і $M_{зан} = M_{max}$. Виводячи частинами пусковий реостат, переходять на характеристики 2, 3, поки не вийдуть на звичайну характеристику 4. Після цього щітки піднімають з кілець, а обмотка ротора закорочується контактором.

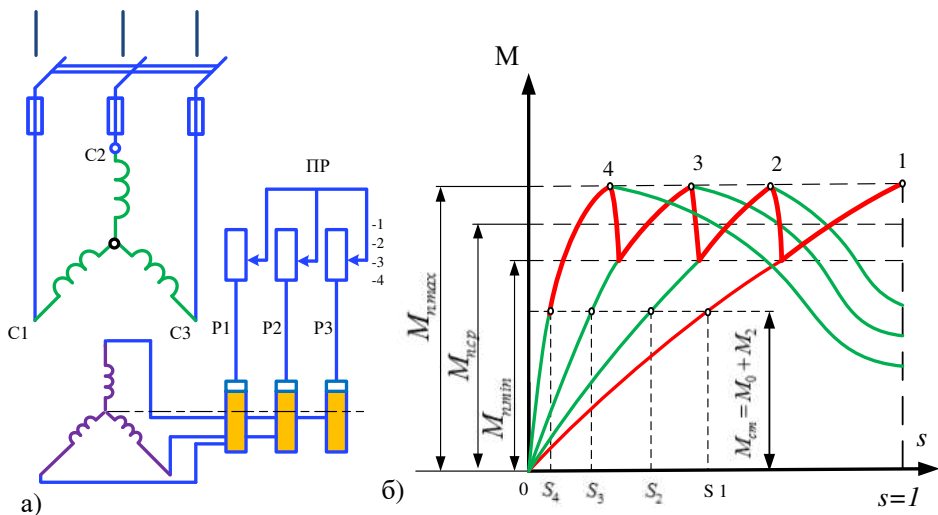


Рис. 7.9 – Схема ввімкнення пускового реостату (а) та діаграма пуску двигуна з фазним ротором (б)

§ 7.9 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Експлуатаційні властивості асинхронного двигуна визначаються його робочими характеристиками.

Робочі характеристики асинхронного двигуна (рис. 7.10) являють собою графічно виражені залежності частоти обертання n , ККД η , корисного моменту (моменту на валу) M_2 , коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$ та струму статора I_1 від корисної потужності P_2 при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$ (в межах зміни P_2 від 0 до $1,2 P_{2н}$).

Розглянемо ці характеристики, які зняті експериментально (рис.7.10). Швидкісна характеристика $n=f(P_2)$. Частота обертання ротора асинхронного двигуна $n = n_1(I - s)$ залежить від ковзання двигуна, а отже, і його частоту обертання можна визначити відношенням електричних втрат в роторі до електромагнітної потужності $P_{ем}$.

$$s = p_{e2} / P_{em}$$

Нехтуючи електричними втратами в роторі в режимі холостого ходу можна прийняти $p_{e2}=0$, тому $s_0 = 0$ і $n_0 \approx n_1$.

В міру збільшення навантаження на валу ковзання змінюється і досягає при номінальному навантаженні значень 0,01 — 0,06. Відповідно до цього залежність $n=f(P_2)$ являє собою криву, слабо нахилену до осі абсцис.

$M_2 = f(P_2)$. Залежність корисного моменту на валу двигуна M_2 від корисної потужності P_2 називається моментною характеристикою і визначається виразом.

$$M_2 = P_2 / \omega = 60P_2 / (2\pi n) = 9,55P_2 / n ,$$

де P_2 - корисна потужність, Вт;

$\omega = \pi n / 60$ - кутова частота обертання ротора.

З цього виразу випливає, що якщо $n=\text{const}$, то графік

$M_2 = f(P_2)$ повинен представляти собою пряму лінію. Але в асинхронному двигуні зі збільшенням навантаження P_2 частота обертання ротора зменшується, а тому корисний момент на валу M_2 зі збільшенням навантаження зростає трохи швидше навантаження, а отже графік $M_2 = f(P_2)$ має криволінійний характер.

Залежність $\cos\varphi_1 = f(P_2)$. В зв'язку з тим, що струм статора має реактивну (індуктивну) складову, необхідну для створення магнітного поля в статорі, коефіцієнт потужності асинхронного двигуна менше одиниці. Найменше значення коефіцієнта потужності відповідає режиму холостого ходу. Пояснюється це тим, що струм холостого ходу I_0 при будь-якому навантаженні

залишається практично незмінним. Тому при малих навантаженнях двигуна струм статора невеликий і в значній частині є реактивним ($I_1 \approx I_0$). В результаті цього зсув по фазі струму статора I_2 щодо напруги U_1 являється значним ($\varphi_1 = \varphi_0$), лише трохи менше 90° . Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів в режимі холостого ходу, як правило, не перевищує 0,2. При збільшенні навантаження на валу двигуна росте активна складова струму I_1 і коефіцієнт потужності зростає, досягаючи найбільшого значення (0.80÷0.90). Подальше збільшення навантаження супроводжується зменшенням $\cos\varphi_1$, що пояснюється зростанням індуктивного опору ротора ($X_2 \cdot s$) за рахунок збільшення ковзання, а отже, і частоти струму в роторі.

Асинхронний двигун з конкретними номінальними даними при експлуатації може навантажуватися різним способом і працювати в діапазоні навантажень від холостого ходу до номінального. Тому потрібно, щоб він мав досить високий ККД і коефіцієнт потужності не тільки при номінальній, але і при неповному навантаженні, що складає більш 0,5 номінальної. Зі збільшенням ККД зменшується споживана двигуном активна потужність $P_1 = P_2 / \eta$; зі збільшенням коефіцієнта потужності зменшується споживана ним повна потужність $S_1 = P_1 / \cos\varphi_1$ за рахунок зниження реактивної потужності $Q_1 = S_1 \sin\varphi_1 = P_1 \tan\varphi_1$. І те й інше приводить до зменшення струму, що споживається з мережі

$$I_1 = S_1 / (m_1 U_1) = P_2 / (m_1 U_1 \eta \cos\varphi_1),$$

та повної потужності встановлених на електричних станціях синхронних генераторів і втрат в трансформаторах та

електричних мережах при передачі електричної енергії, в кінцевому рахунку зменшуючи вартість експлуатації двигуна.

Асинхронні двигуни проектують таким чином, щоб ККД і $\cos\varphi_1$ мали максимуми при $P_2 = (0,5 \div 0,8)P_{2н}$.

ККД має максимум в області, де постійні втрати ($p_{ст}$ і $p_{мх}$) дорівнюють змінним втратам - електричним (p_{e1} і p_{e2}). Коефіцієнт корисної дії має максимум в області $(0,5 \div 0,8)P_{2н}$, тому що більшість асинхронних двигунів в електроприводах експлуатуються при таких навантаженнях.

Важливими характеристиками асинхронного двигуна є кратність пускового моменту $K_n = M_n / M_n = 1 \div 1,7$ і перевантажувальна здатність асинхронного двигуна по моменту $\lambda = M_{max} / M_n = 1,7 \div 2,5$.

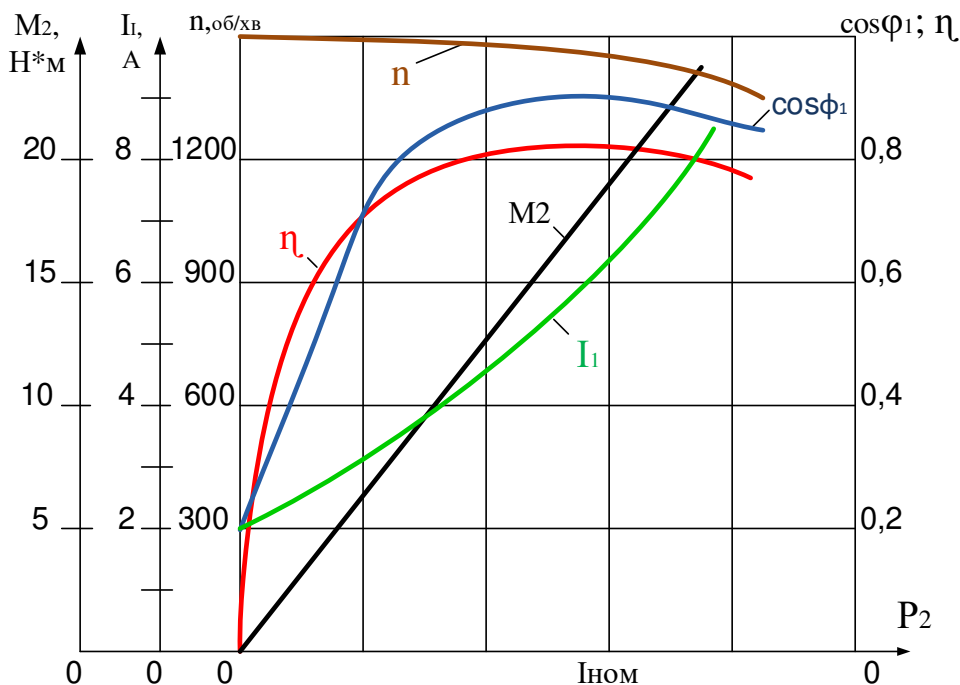


Рис. 7.10 – Робочі характеристики асинхронного двигуна

§7.10 Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Підставивши у вираз (7.3) значення синхронної частоти обертання з (7.1) і ковзання з (7.20), отримаємо формулу

$$n = 60 \cdot \frac{f_1}{p} \left(1 - \frac{P_{M2}}{P_{em}}\right) \quad (7.29)$$

з якої випливає три принципово можливих способи регулювання n :

- зміною частоти струму f_1 напруги живлення;
- зміною кількості пар полюсів p ;
- зміною електричних втрат P_{M2} у колі ротора (ввімкненням резистора в коло ротора).

Частотне регулювання вимагає застосування спеціальних джерел живлення зі змішаною частотою. Швидкий розвиток напівпровідникової техніки робить цей спосіб регулювання більш поширеним. Особливо важливе значення таке регулювання має для тягового електроприводу, бо плавне безступінчате регулювання частоти f_1 дає можливість так само плавно змінювати частоту обертання двигуна n , а значить, і швидкість руху екіпажу.

Однак частотне регулювання зводиться не тільки до зміни частоти f_1 , одночасно вимагається і зміна значення напруги живлення U_1 . Закони її зміни можуть бути різними в залежності від властивостей, котрі хочуть надати двигуну.

Індуктивний опір короткого замикання знаходиться як:

$$x_{\kappa} = \omega_1 L_{\kappa} = 2\pi f_1 L_{\kappa},$$

і формула (7.28) набере вигляду:

$$M_{\max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 L_{\kappa}} = \pm c_{\text{мм}} \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (7.30)$$

де $c_{\text{мм}} = pm_1 / (8\pi^2 L_{\kappa})$ - стала.

З (7.30) випливає, що при зміні f_1 одночасно з частотою обертання змінюється величина $M_{\max}$, тобто коефіцієнт перевантажувальної здатності k_m . Наприклад, при підвищенні швидкості руху двигуна у 1,41 рази у стільки ж збільшується і частота f_1 ; тоді при незмінному значенні U_1 максимальний момент зменшується у $(1,41)^2=2$ рази, що може виявитися неприпустимим по умовах стійкої роботи двигуна.

Зміна частоти f_1 при незмінному значенні U_1 призводить до змін в оберненій пропорційності магнітного потоку Φ , що видно з формули (6.2), оскільки $U_1 \approx E_1$. Це є неприпустимим, бо при збільшенні потоку виникне сильне насичення

магнітного кола і ріст намагнічування індуктивного струму, а зменшення Φ , призведе до зниження її перевантажувальної здатності.

Основний закон регулювання частоти виражений формулою (7.31)

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}} \quad , \quad (7.31)$$

де U_1 , f_1 і M - поточні значення напруги, частоти і обертового моменту.

Наприклад, якщо при частотному регулюванні необхідно мати $M = M_{ном}$, то вираз (7.31) дістає, вигляд $U_1 / f_1 = U_{1ном} / f_{1ном} = const$, тобто при зміні частоти f_1 треба пропорційно змінювати і напругу U_1 .

Формула (7.31) дозволяє визначити взаємозалежність U_1 і f_1 при будь-яких умовах, що вимагаються.

Регулювання зміною кількості пар полюсів застосовується у двигунах з короткозамкненим ротором, бо при цьому достатньо обійтися тільки перемиканням обмотки статора. Якщо на статорі укласти обмотку, що допускає перемикання кількості пар полюсів у відношенні 1:2, то отримаємо двошвидкісну машину.

Іноді на статорі вкладають дві обмотки, котрі перемикаються. Тоді отримуємо чотиришвидкісну машину. Наприклад, двигун з двома обмотками, котрі перемикаються на $p = 2$ і 4 , $p = 3$ і 6 при $f_1 = 50$ Гц має синхронну частоту обертання 1500/1000/750/500 об/хв.

Багатошвидкісні двигуни більші за розмірами, масою і вартістю у порівнянні з двигунами нормального виконання;

регулювання частоти їх обертання обмежене, як правило, чотирма ступенями.

Регулювання ввімкненням резистора в коло ротора можливе тільки в двигунах з фазним ротором. При збільшенні опору резистора збільшуються втрати r_{m2} і, згідно (7.29), частота обертання n знижується. При заданому статичному моменті M_{cm} відбувається перехід з характеристики 1 на характеристику 2, 3 тощо із збільшенням ковзання (див. рис. 7.9).

Цей спосіб дозволяє змінювати частоту обертання у широких межах, але він пов'язаний з великими втратами енергії у регульовальному резисторі.

§7.11 Короткозамкнені асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом

Необхідність забезпечення високих пускових моментів без застосування пускових резисторів призвела до створення двигунів з короткозамкненим ротором, в яких використане явище витіснення струму в стержнях при запуску, коли при $s = 1$, а частота $f_2 = f_1$.

Як відомо, при витісненні струму в верхню частину провідника відбувається зменшення його використовуваного перерізу, що еквівалентно підвищенню активного опору стержня; крім того, витіснення струму призводить до зменшення індуктивного опору, так як зменшується загальна провідність пазового магнітного потоку розсіювання. Все це створює умови для отримання високого пускового моменту. Цими властивостями володіють двигуни з двоклітковим і глибокопазним роторами.

Двигун з подвійною "білчиною кліткою". Ротор має дві короткозамкнені обмотки (рис. 7.11,а). Зовнішня клітка 1 є пусковою; її стержні мають малий поперечний переріз і виготовляються з марганцевистої латуні або бронзи, тому

активний опір цієї клітки r_{2p} порівняно з мідою великий. В деяких випадках обидві клітки об'єднують і виготовляють литими з алюмінію.

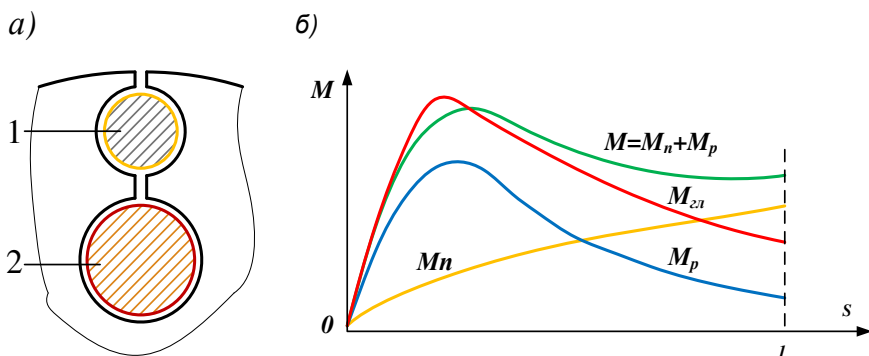


Рис.7.11 - Двоклітковий ротор (а) і механічні характеристики пускової і робочої кліток (б)

Індуктивні опори кліток визначаються значенням потоку розсіювання $\Phi_{2роз}$, зчепленого з їх стержнями. Оскільки пускова клітка розташована ближче до поверхні ротора, зчеплений з нею потік розсіювання невеликий і, отже, її індуктивний опір $X_{2п}$ малий. У робочої ж клітки зчеплення потоків розсіювання велике і, значить, вона володіє більшим X_{2p} . Співвідношення між $X_{2п}$ і X_{2p} , а також збільшення останнього забезпечуються відповідним вибором ширини і висоти пліца в пазові над верхньою кліткою і щілини між стержнями.

Обидві клітки в електричному відношенні ввімкненні паралельно, тому струми між ними розподіляються обернено пропорційно їх повним опорам:

$$I_{2п} / I_{2p} = Z_{2п} / Z_{2p} = \sqrt{r_{2п}^2 + x_{2п}^2} / \sqrt{r_{2п}^2 + x_{2п}^2}$$

При запуску ($s=1$) індуктивні опори порівняно з активними

надзвичайно великі; тому $I_{2\Pi} / I_{2p} \approx x_{2p} / x_{2\Pi}$, тобто струм ротора в основному проходить по верхній пусковій клітці, так як $x_{2\Pi} < x_{2p}$. Але у цієї ж клітки великий $r_{2\Pi}$ що призводить до появи великого пускового моменту.

В міру розгону ротора зменшуються ковзання, S і частота $f_2 = f_1 s$. Разом з ковзанням і частотою як це слідує з (7.8), зменшується індуктивний опір x_{2p} , і струм поступово переходить з клітки запуску в робочу.

По закінченні запуску, коли ковзання дуже мале, роль індуктивних опорів в розподілі струму стає незначною; тому можна вважати, що $I_{2\Pi} / I_{2p} \approx r_{2p} / r_{2\Pi}$. Але так як $r_{2\Pi} > r_{2p}$ то струм ротора в основному проходить по нижній робочій клітці. Отже, в двоклітковому роторі струм в початковий момент запуску витісняється у верхню (пускову) клітку, котра створює значний момент запуску: у ході розгону струм поступово проникає у нижню (робочу) клітку, а по закінченні запуску практично повністю протікає, по ній.

На рис. 7.11,б показані механічні характеристики робочої клітки запуску, а також результуюча крива, що являє собою суму двох попередніх ($M = M_{\Pi} + M_p$).

У двокліткових двигунів великої потужності кратність початкового пускового моменту $k_{\Pi} = 1,7 \div 2$ при істотно меншому, ніж у звичайних двигунів стрибку струму запуску: $I_{1зап} / I_{1ном} = 4 \div 5$.

Глибокопазний двигун. Треба сказати, що ефект витіснення струму у верхню частину провідника, коли $s = 1$ і $f_2 = f_1 = 50$ Гц, починає проявлятися у мідного провідника при його висоті $h > 12$ мм, а в алюмінієвого - при $h > 16$ мм.

Наприклад, активний опір мідного провідника при $h = 50$ мм у 5 разів більший, а індуктивний - у 3,33 рази менший в початковий момент запуску, ніж у робочому режимі при $s_{ном} = 0,01 \div 0,03$. Тому "білчину клітку" глибокопазних двигунів виготовляють з вузьких і високих (30÷60 мм) стержнів.

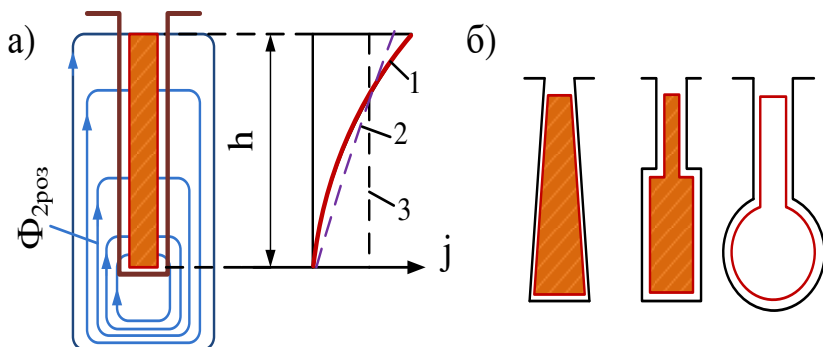


Рис.

7.12 - Розподіл густини струму по висоті стержня глибокопазного ротора (а) і різні форми перерізів стержнів(б)

Розподіл густини струму j по висоті стержня h у момент запуску показаний на рис.7.12,а крива - 1. Можна собі уявити, що при запуску працює тільки верхня частина стержня, його активний опір збільшується, а індуктивний - зменшується, і створюються умови для виникнення більшого моменту запуску.

При розгоні зі зменшенням частоти f_2 струм все рівномірніше розподіляється по висоті стержня (крива 2 на рис. 7.12,а). Відбувається ніби плавне збільшення робочого перерізу провідника і зменшення його активного опору.

В номінальному режимі явища витіснення струму немає, активний опір стержня стає мінімальний, густина струму рівномірно розподіляється по висоті провідника (лінія 3 на рис. 7.12,а).

На рис. 7.11,б крива $M_{эл}$ представляє собою механічну

характеристику глибокопазного двигуна. Вона займає проміжне становище між характеристиками звичайного і двокліткового двигунів.

Існують різновиди глибокопазних двигунів з трапецієвидною, двоступінчатою і колбоподібною формами стержнів (рис. 7.12,б). Ці ротори дешевші від двокліткових, тому вони дістали більше поширення.

З метою посилення ефекту витіснення струму при запуску у сучасних короткозамкнених двигунах потужністю до 100 кВт з алюмінієвою заливкою роторів пазам останніх надають спеціально сильно видовжену у радіальному напрямі форму.

§ 7.12 Однофазні асинхронні двигуни

У цілому ряді випадків (на транспорті, у побутових умовах тощо) виникає необхідність живлення машин змінного струму від однофазних мереж. Тут знаходять застосування однофазні двигуни, котрі легко отримати з трифазних, відімкнувши одну з фаз статора, а дві, що залишилися, з'єднати послідовно або паралельно. Очевидно, що потужність однофазного двигуна при цьому навіть теоретично не може бути більшою $2/3$ потужності трифазного. У спеціальних однофазних двигунах обмоткою заповнюють також не більше $2/3$ пазів, оскільки при більшому їх заповненні обмотковий коефіцієнт виходить невеликим, витрати міді зростають, а ЕРС, що виникає, значить, і потужність практично не збільшуються.

Однофазний струм у статорі створює пульсуюче магнітне поле, яке можна розкласти на два поля, що обертаються у різні боки. При нерухомому роторі ці поля створюють однакові за значенням, але різні за знаками обертальні моменти M_I і M_{II} . Результуючий момент $M_{зан} = M_I - M_{II}$. тому без спеціальних пристроїв двигун з місця не рухається.

Якщо ротор привести в обертання в будь-який бік, то одне поле - пряме, те, що обертається в той самий бік, що і ротор. Друге - зворотне поле - створює режим електромагнітного гальма.

При номінальному значенні $f_{ном} = 0,02f_{2l} = 1 \text{ Гц}$, а $f_{2л} = 50(2 - 0,02) = 99 \text{ Гц}$. Тому індуктивний опір обмотки ротора струмові $I'_{2л}$ дуже значний ($x'_{2s} = 2\pi f_{2л} L_2$), струм є практично чисто індуктивним і здійснює розмагнічуючу дію на поле, що зворотно обертається. Очевидно, що при цьому сильно зменшується зворотній момент $M_{л}$ і ротор обертається у напрямі прямого моменту M .

Для отримання початкового моменту запуску необхідно створити магнітне поле, що обертається. При використанні трифазних двигунів з цією метою можна скористатися однією зі схем, зображених на рис. 7.13.

Якщо увести собі еквівалентну магнітну вісь двох послідовно ввімкнених за схемою Y фаз, то третя (вільна) фаза буде їй перпендикулярна; цим забезпечується зсув магнітних осей в просторі на кут 90° ел. Третя фаза відіграє роль обмотки запуску. Ввімкнені в її коло конденсатор, резистор або індуктивність, створюючи зсув у часі, забезпечує появу поля, що обертається. Якщо навіть це поле не є коловим, створений момент дає можливість запустити двигун у хід. Реверсування такого двигуна здійснюється зміною під'єднання пускового елемента до мережі.

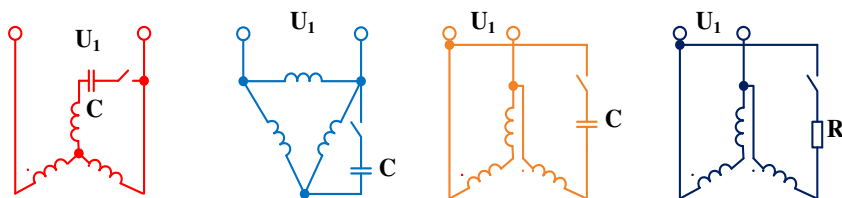


Рис. 7.13 - Схеми ввімкнення трифазних асинхронних двигунів для роботи від однофазної мережі

Відповідним вибором ємності, пускового конденсатора можна забезпечити зсув у часі на кут 90° , тоді поле буде коловим. У деяких однофазних машинах обмотку запуску намотують дротом меншого перерізу, що підвищує її опір і не становить небезпеку у короткий період запуску. У такому випадку немає необхідності у використанні спеціального резистора, тим більше, що сама обмотка запуску володіє індуктивністю. Після запуску двигуна обмотку запуску вимикають.

§7.13 Конденсаторні асинхронні двигуни

Це такі двигуни (рис. 7.14) на статорі яких під кутом 90° ел. укладені дві обмотки, що займають однакову кількість пазів. Одну з обмоток (А) вмикають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу (В) - в ту саму мережу, але через конденсатор С, який залишається постійно ввімкненим впродовж всього часу роботи, створюючи фазовий зсув між струмами i_A та i_B ; тому ці двигуни називаються двофазними. Таким чином, якщо однофазний двигун по закінченні процесу запуску працює з пульсуючим полем, то конденсаторний - з полем, що обертається. Це наближає конденсаторні двигуни до трифазних.

Підбором ємності конденсатора С можна забезпечити отримання колового поля в одному потрібному режимі роботи, у тому числі і при запуску: потужність конденсатора при цьому має дорівнювати повній потужності двигуна, тобто бути достатньо великою. В інших режимах, відмінних від розрахункового, поле двигуна буде не коловим, а еліптичним.

У деяких випадках паралельно постійно ввімкненому конденсатору С на весь період запуску вмикають конденсатор запуску, що дає можливість забезпечити отримання колового поля при запуску в потрібному робочому режимі.

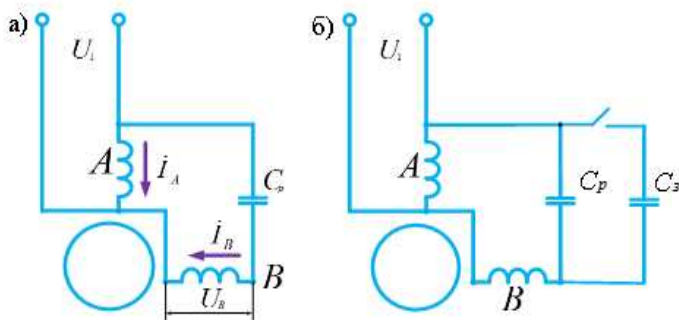


Рис. 7.14 - Схеми конденсаторного асинхронного двигуна

Конденсаторні двигуни володіють вищими енергетичними показниками, ніж однофазні, їх $\cos\varphi$ наближується до одиниці. До недоліків цих двигунів варто віднести значні розміри конденсаторів, що ускладнює їх використання на транспорті.

§ 7.14 Основні типи асинхронних двигунів, що випускаються серійно

Асинхронні двигуни випускають, як правило, великими серіями, найбільш значними, з яких є машини загального призначення - серії 4А, АІ і серії спеціалізованих двигунів, наприклад, кранових МТ, вибухозахисних ВР, ВАО та ін.

Серія — ряд двигунів зростаючої потужності, що мають одну конструкцію і єдину технологію на великих ділянках серії і призначених для масового виробництва. При проектуванні серії двигунів найважливіше значення мають питання уніфікації деталей, конструктивних вузлів і нормалізації ряду розмірів. Усе це зв'язано з раціональною організацією

виробництва як усередині заводу, так і в об'єднанні, що випускає єдину серію машин.

При проектуванні серії асинхронних двигунів зовнішні діаметри статора вибирають таким чином, щоб при тому самому зовнішньому діаметрі при зміні довжини машини одержати кілька машин на різні потужності і частоти обертання. Така побудова серії приводить до скорочення кількості штампів, зменшенню кількості моделей для виливки станин і підшипникових щитів, збереженню тих самих діаметрів валів, уніфікації підшипникових щитів, збереження кількості і номенклатури оснащення і вимірювального інструмента. Широка уніфікація забезпечує економічну ефективність цілої серії, а не однієї машини.

Серія трифазних асинхронних двигунів 4А. Єдина серія 4А охоплює діапазон потужностей від 0,06 кВт до 400 кВт. В основу поділу двигунів на типорозміри покладено конструктивний параметр - висота осі обертання h , обумовлена відстанню від осі обертання (для машин з горизонтальною віссю обертання) до опорної площини. Двигуни єдиної серії 4А виготовляються з висотами осі обертання 50, 56, 63, 71, 80, 90, 100, 112, 132, 160, 180, 200, 225, 250, 280, 315, 355 мм. Двигуни кожної висоти осі обертання виконуються двох типорозмірів з різною довжиною пакетів сердечників, але однаковим штампом пластин цих сердечників. Двигуни виготовляються на синхронні частоти обертання 3000; 1500; 1000; 750; 600 і 500 об/хв.

Двигуни єдиної серії 4А виготовляються в двох виконаннях: закритий, що обдувається (IP23) і захищений із внутрішньою самовентиляцією (IP44). Двигуни закритого виконання всього діапазону осей обертання виготовляються з короткозамкненим

ротором, а осей обертання 200, 225 і 250 мм - ще і з фазним ротором (4АК). Двигуни захищеного виконання виготовляються з короткозамкненим ротором (4АН) при висоті осі обертання $h \geq 160$ мм, а при висоті осі обертання $h \geq 200$ мм - ще і з фазним ротором (4АНК).

Асинхронні двигуни єдиної серії 4А призначені для самого широкого застосування у всіх галузях народного господарства і крім основного мають кілька електричних модифікацій і спеціалізованих виконань.

Двигуни основного виконання призначені для привода механізмів, що не пред'являють особливих вимог до пускових характеристик, ковзанню, енергетичним показникам і т. д. Передбачається, що навколишнє середовище в місці їхньої установки не вибухонебезпечне, не містить струмопровідного пилу, агресивних газів і пар у концентраціях, що руйнують метал і ізоляцію. Двигуни призначені для роботи від мережі частотою 50 Гц і напруги 220/380 і 380/660 В.

Розрізняють наступні електричні модифікації двигунів:

а) двигуни з підвищеним ковзанням, з "м'якою" механічною характеристикою;

б) двигуни з підвищеним пусковим моментом (подвійна клітка на роторі);

в) багатшвидкісні двигуни - на дві, три і чотири частоти обертання в діапазоні від 500 до 3000 об/хв;

г) двигуни на частоту 60 Гц, що мають частоту обертання на 20 % вище, ніж двигуни основного виконання при тієї ж потужності.

За конструктивним виконанням двигуни розділяються на:

а) малошумні, що мають підвищений скіс пазів (1,5 зубцових розподілів), збільшений повітряний зазор, пластмасовий вентилятор;

б) двигуни, що вбудовуються, (4AB) для вбудовування у верстати і механізми;

в) двигуни з вбудованим температурним захистом для привода механізмів, що працюють зі значними перевантаженнями, частими пусками у лобові частини обмоток статора встановлені терморезистори, що при перегріві двигуна видають сигнал на відключення двигуна.

Відповідно до умов навколишнього середовища виконують:

а) двигуни тропічного виконання які призначені для роботи в умовах вологого чи сухого тропічного клімату, у них застосовані тропікостійка ізоляція й антикорозійне покриття всіх деталей;

б) двигуни вологоморозостійкого виконання, призначені для роботи при навколишній температурі до -40°C і відносної вологості до 100 % при температурі $+25^{\circ}\text{C}$;

в) двигуни хімоустійкого виконання, призначені для роботи в умовах температури навколишнього середовища $\pm 40^{\circ}\text{C}$, відносної вологості до 80 % при температурі $+25^{\circ}\text{C}$ і наявності хімічно активного невибухонебезпечного середовища; у них застосовані хімоустійкі ізоляційні матеріали й антикорозійні покриття всіх деталей.

Серія трифазних асинхронних двигунів АИ. Асинхронні двигуни серії АИ загальпромислового призначення з висотами осей обертання від 45 до 355 мм потужністю від 0,025 до 315 кВт розроблені в рамках Міжнародної організації по економічному і науково-технічному співробітництву в електротехнічній промисловості (ІНТЕРЕЛЕКТРО).

Двигуни виготовляються на напругу 220/380 і 380/660 В, частотою струму 50 Гц. Можливе виготовлення двигунів на частоту струму 60 Гц. По ступені захисту двигуни цієї серії мають виконання: закритий, що обдувається для усіх висот осі обертання чи захищений із внутрішньою самовентиляцією для висот осі обертання від 160 до 355 мм.

На відміну від серії 4А в двигунах серії АІ більш широко застосовані високоміцні алюмінієві сплави і пластмаси і використана більш вдосконалена система вентиляції, що забезпечує зниження температури нагрівання двигунів при номінальному навантаженні на 10-20 °С у порівнянні з двигунами серії 4А. Для найбільш масового відрізка серії з висотами осей обертання від 77 до 100 мм застосовані підшипники з поліпшеними віброакустичними характеристиками. Поліпшення вентиляційного і підшипникового вузлів забезпечило двигунам серії АІ зниження рівня шуму при їхній роботі і підвищення надійності.

Для привода гірничих машин випускаються рудничні вибухозахищені асинхронні електродвигуни потужністю 0,25 - 2000 кВт і напругою – 220 - 6000 В.

Вибухозахищені електричні машини підрозділяються на два типи: електричні машини, призначені для експлуатації у вибухонебезпечних приміщеннях і в зовнішніх установках, і рудничні електричні машини, призначені для застосування в підземних виробітках вугільних шахт. Їхньою відмінністю від машин загального призначення є в першу чергу конструкція і частково матеріали оболонок і ущільнень, що забезпечують необхідний вибухозахист. Ряд рудничних двигунів відрізняється також ізоляцією обмоток, номінальною напругою, зв'язаною з умовами живлення двигунів, що

працюють у підземних виробках, механічними характеристиками, обумовленими специфічними вимогами привода.

Ступінь захисту і конструкція двигунів визначаються вибухонебезпечністю приміщень.

Двигуни з фазним ротором мають дві коробки виводів: для підключення статора і ротора. Контактні кільця і щітки вкриті вибухонепроникним ковпаком.

Двигуни зі звичайним короткозамкненим ротором застосовують для гірничих машин з легкими умовами пуску (насоси, вентилятори), а двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками - для машин з важкими умовами пуску (скребкові конвеєри, струги). Двигуни з фазним ротором використовують для машин з частими важкими пусками і для регулювання швидкості (шахтні підйомні машини, магістральні стрічкові конвеєри).

Двигуни серії ВАО, У, ВР призначені для роботи у всіх галузях вугільної промисловості в тому числі в шахтах, небезпечних по газі (метану) і вугільного пилу, для приводів насосів, вентиляторів, елеваторів, дробарок, стрічкових конвеєрів, прохідницьких машин, шахтних комбайнів, крім головного привода, і т. п. Двигуни мають основне виконання і ряд модифікацій, що розрізняються призначенням, технічними даними, особливостями конструкції і рівнем вибухозахисту.

Двигуни серії ЕДКО, ЕКВ і ЕКВЖ призначені для привода очисних комбайнів. У двигунах для очисних комбайнів обертовий короткозамкнений ротор розміщений у статорі, корпус якого має форму паралелепіпеда (для зчленування з комбайном), причому двигуни серії ЕДКО мають зовнішній обдув корпуса, а серії ЕКВ - охолодження корпуса водою, що

подається на комбайн для зрошення вибою. Потужність цих двигунів від 36 до 160 кВт. Двигун серії ЕКВЖ потужністю 575 кВт має охолодження ротора спеціальною непальною ізолюючою рідиною, що циркулює усередині корпуса, який охолоджується водою.

Контрольні запитання і задача

1. Що таке ковзання асинхронної машини?
2. Які існують типи асинхронних машин, у чому їх конструктивні відмінності?
3. Які бувають режими роботи асинхронних машин, які межі зміни частот обертання і ковзання їм відповідають?
4. Трифазний асинхронний двигун живиться від мережі з $f_1 = 50 \text{ Гц}$, і ротор має при цьому $n = 2850 \text{ об/хв}$. Визначити ковзання s , кількість пар полюсів p і частоту в роторі f_{2s} .
5. В чому полягає аналогія асинхронного двигуна з трансформатором і в чому їх відмінності? Напишіть основні рівняння асинхронного двигуна і порівняйте їх з аналогічними рівняннями трансформатора.
6. Як змінюються електричні втрати в роторі при зміні ковзання? Як з ними пов'язаний обертальний момент?
7. Як залежить обертальний момент від напруги живлення?
8. Чим визначається значення $M_{\max}$ асинхронного двигуна? Порівняйте механічні характеристики двигунів постійного струму і асинхронного, а також їхню здатність до перевантаження.
9. Які існують способи запуску асинхронних двигунів?
10. Який принцип покладений в основу створення двигунів з підвищеним моментом запуску?
11. Яка "білчина клітка" у двокліткового двигуна є робочою, а

яка - пусковою? Яке співвідношення їх активних і індуктивних опорів?

12. Чому в короткозамкнених асинхронних двигунів застосовують високі стержні ротора?

13. Які існують способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів? Який з них придатний для тягового електропривода?

14. Який принцип дії однофазних і двофазних (конденсаторних) двигунів?

15. Чи можна запустити трифазний двигун від однофазної мережі? Що для цього потрібно?

Частина 8 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ СИНХРОННИХ МАШИН

§ 8.1 Основні визначення і поняття

Синхронною називається машина змінного струму, в якій в усталеному режимі, частота обертання ротора співпадає з частотою магнітного поля статора і не залежить від величини навантаження при зміні його в межах, що допускаються

$$n=n_1=f 60 / p, \text{ об/хв} \quad (8.1)$$

де p - число пар полюсів;

n_1 - частота обертання магнітного поля, що створюється обмоткою статора.

Конструктивно синхронна машина складається з двох частин: нерухомої - статора, та обертової - ротора.

Статор синхронної машини по будові, майже не відрізняється від статора асинхронної машини. Якщо синхронна машина трифазна, то на статорі розташовується трифазна обмотка, що називається *обмоткою якоря(статора)*.

На роторі синхронної машини розташовується обмотка, що через два контактних кільця живиться від джерела постійного струму - *збудника*. Ця обмотка призначена для створення магнітного потоку збудження Φ_0 і називається *обмоткою збудження*. Потужність збудника складає $(0,3 - 3) \%$ від номінальної потужності P_n синхронної машини. Збудник звичайно розташовується на одному валу із синхронною машиною. Існують і інші способи збудження синхронних машин, наприклад - живлення обмотки збудження від мережі змінного струму через випрямляч.

Синхронна машина, як і інші електричні машини може працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна.

Найбільш розповсюдженим режимом роботи синхронних машин є генераторний режим. Як генератор, синхронна машина використовується головним чином для виробництва електричної енергії змінного струму на електричних станціях. Синхронні генератори - самі потужні електричні машини, створені людиною. На теплових і атомних електростанціях експлуатуються турбогенератори потужністю 1200 МВт на 3000 об/хв і 1600 МВт на 1500 об/хв. Синхронні генератори для дизель-генераторних установок мають потужність від сотень до десятків тисяч кіловат.

У режимі двигуна синхронні машини використовуються як приводні двигуни потужних насосів, вентиляторів, повітродувок. Гранична потужність синхронних двигунів досягає декількох сотень мегаватів. Синхронні двигуни у відмінності від двигунів інших типів мають в усталеному режимі незмінну частоту обертання при сталій частоті живлячої мережі. Відмінною рисою синхронних двигунів є можливість регулювання коефіцієнта потужності. Дана властивість найбільш важлива в електроприводі великої потужності, тому що дає можливість підвищити коефіцієнт корисної дії.

Синхронні двигуни малої потужності застосовуються в системах автоматики, де є необхідність мати сталу частоту обертання. У великих кількостях випускаються двигуни малої потужності, в яких для створення магнітного поля збудження застосовуються постійні магніти.

Синхронний двигун, який працює без навантаження на валу двигуна та призначений для генерації реактивної потужності називають синхронним компенсатором. Застосування синхронної машини як синхронного компенсатора дає можливість поліпшувати коефіцієнт потужності в електричній мережі. Якщо асинхронні машини для створення магнітного поля споживають з мережі реактивну потужність, то синхронні машини в залежності від ступеня збудження видають у мережу або споживають з мережі реактивну потужність.

Режим роботи синхронної машини, для якого вона призначена, вказують в її технічному паспорті разом з номінальними величинами: потужність; лінійний струм в амперах; лінійна напруга; коефіцієнт потужності $\cos\varphi$; число фаз; з'єднання обмотки статора (зірка чи трикутник); частота

струму в герцах; частота обертання ротора в обертах у хвилину; напруги збудження; найбільший припустимий струм збудження.

§ 8.2 Типи синхронних машин та їх конструкція

У залежності від конструктивного виконання ротора синхронні машини поділяються на два типи: явнополюсні і неявнополюсні.

Явнополюсні синхронні машини (рис.8.1) - це машини в яких на роторі є певна кількість явновиражених полюсів. Полюс складається з полюсного наконечника (7), осердя та полюсної котушки. Полюсні котушки з'єднуються між собою послідовно і утворюють роторну обмотку – обмотку збудження (10).

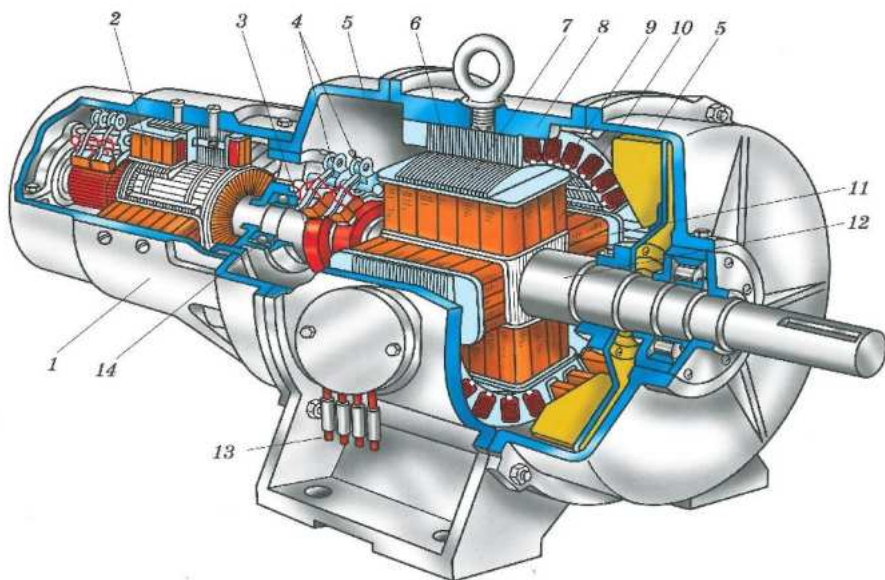


Рис. 8.1 – Будова синхронної машини: 1 - збудник; 2 - обмотка збудження збудника; 3 - контактні кільця; 4 - щіткотримачі; 5 – підшипникові щити; 6 – осердя статора; 7 – полюсний наконечник; 8 – станина; 9 – обмотка статора; 10 - обмотка збудження;

Щоб на роторі утворилися полюси різної полярності, що чергується, $N-S; N-S; N-S; \dots$ необхідно змінювати напрям намотування полюсних котушок. Обмотка збудження підключаються до збудника (джерела постійного струму) за допомогою двох контактних кілець (3) що обертаються з ротором і двох нерухомих струмоз'ємних щіток які кріплять в щіткотримачах. Постійний струм $I_{зб}$ що протікає в обмотці збудження створює в роторі магнітне поле з полярністю, що чергується. Таким чином, ротор являє собою електромагнітну систему постійного струму з обмоткою, що має теж число полюсів, що і трифазна обмотка статора (обмотка якоря).

З рівняння 8.1 випливає, що в залежності від числа пар полюсів, при $f = 50$ Гц частота обертання ротора може бути представлена так званим *синхронним* рядом:

$$3000; 1500; 1000; 750; \dots [\text{об/хв}].$$

Однак явнополюсні синхронні машини виконуються на частоти обертання що не перевищують 1000 об/хв. Це пояснюється тим, що при більш високих частотах обертання не забезпечується механічна міцність ротора.

Найбільш великі явнополюсні синхронні машини – *гідрогенератори* які використовують на електростанціях приводяться в обертання тихохідною гідравлічною турбіною зображено на рис. 8.2, а.

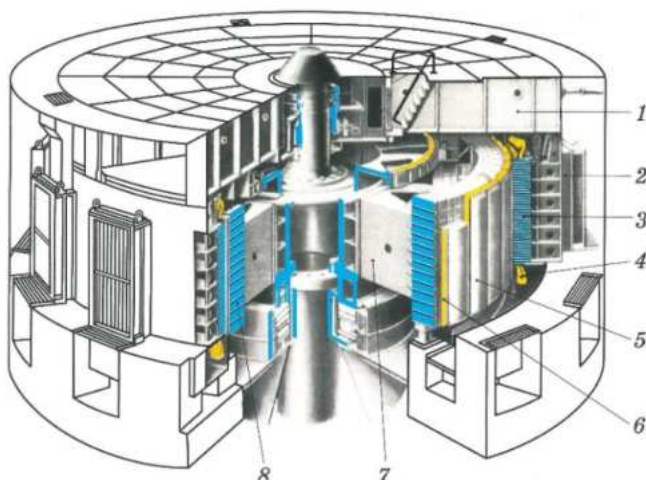


Рис. 8.2 , а – Загальний вигляд гідрогенератора:

1- вантажонесучі хрестовини; 2 – корпус статора; 3- осердя статора; 4 – обмотка статора; 5 – полюс ротора; 6 – обмотка ротора; 7 - спиця ротора; 8 – обід ротора

Звичайно гідрогенератори мають вертикальне розташування вала з опорним підшипником. При цьому діаметр ротора у великих гідрогенераторах досягає 20 м при осьовій довжині 1,7 м. Горизонтальне розташування вала в гідрогенераторах зустрічається рідко.

Неявнополюсні синхронні машини. Типовою неявнополюсною синхронною машиною є генератор теплової електростанції, що приводиться в обертання швидкохідною паровою турбіною. Ці генератори називаються турбогенераторами (рис. 8.2, б).

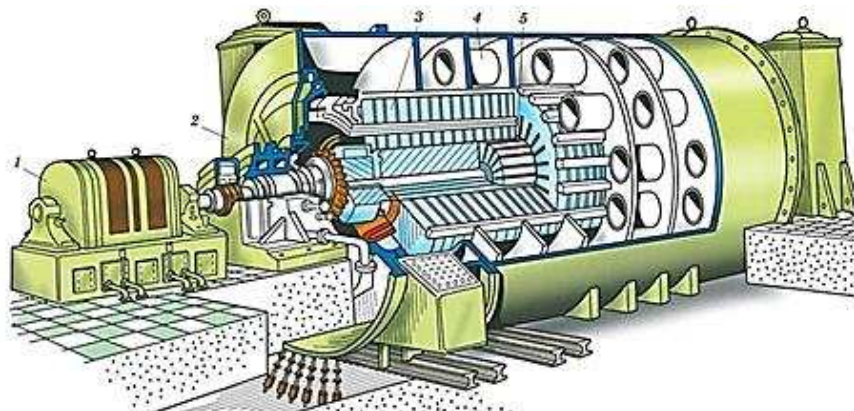


Рис. 8.2, б – Загальний вигляд турбогенератора:

1 – збудник; 2 – корпус; 3 – осердя статора;
4 – секція водяного охолодження; 5 – ротор

Ротор турбогенератора виконується із суцільного сталевго кування діаметром до 1,1-1,15 м і довжиною до 7,5 м. Схематично конструкція синхронної машини з неявновираженими полюсами представлена на рис. 8.3. На зовнішній поверхні ротора 2 фрезеруються пази, в які укладається обмотка збудження 4. У пазах вона закріплюється сталевими клинами, а по торцях сталевими бандажами. Така конструкція ротора забезпечує високу механічну міцність.

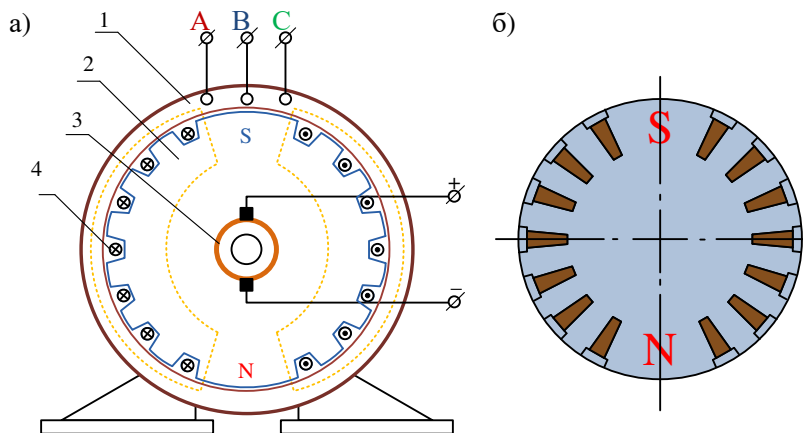


Рис. 8.3 – Схематична конструкція синхронної машини (а) та ротора (б): 1 - статор; 2 - ротор; 3- контактні кільця; 4- обмотка збудження

Турбогенератори звичайно виконуються двополюсними ($2p=2$) з горизонтальним розташуванням вала, в цьому випадку їх частоти обертання становить:

$$n = n_1 = 60f/p = 60 \cdot 50 / 1 = 3000 \text{ об/хв}$$

Живлення обмотки збудження 4 здійснюється через контактні кільця 3 від джерела постійної напруги.

Турбогенератори мають складну систему охолодження. У великих машинах обмотка якоря охолоджується водою, що тече по пустотілим провідникам обмотки. Обмотка збудження охолоджується воднем по замкнутому циклу.

Обернена синхронна машина. Цей тип синхронної машини відрізняється від попередніх тим, що полюса та обмотка збудження розташовуються на статорі, а трифазна обмотка якоря на роторі. При цьому вона через три контактних кільця з'єднується з зовнішнім електричним колом. Обернені машини застосовуються рідко і тільки малої потужності (до 5 кВт). Це в першу чергу зв'язане з тим, що в колі обмотки якоря протікає великі струми, у наслідку чого мають місце великі втрати потужності в щіткових контактах і зниження терміну їхньої служби.

Процеси перетворення енергії в синхронній машині оберненої конструкції відбуваються в такий же спосіб, як і в синхронній машині, основного виконання.

Багато синхронних машин мають на роторі крім обмотки збудження ще мідну чи латунну короткозамкнену демпферну обмотку яка в неявнополюсному роторі мало відрізняється від аналогічної обмотки асинхронної машини, а в явнополюсному роторі її виконують у вигляді неповної короткозамкнутої обмот-

ки, стрижні якої закладені тільки в пази полюсних наконечників і відсутні в міжполюсному просторі (рис. 8.4).

Ця обмотка сприяє загасанню коливань ротора при неусталених режимах синхронної машини, а також забезпечує асинхронний пуск синхронного двигуна.

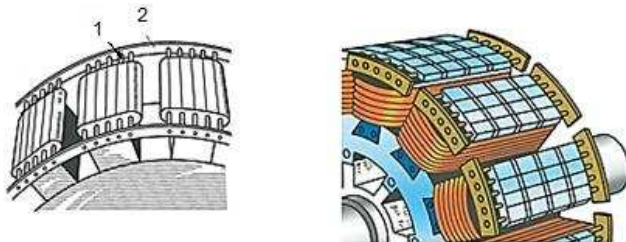


Рис.8.4 - Елементи явнополюсного ротора:

1 – стрижні; 2 – кільця демпферної обмотки

Частина 9 ТРИФАЗНІ СИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ

§ 9.1 Принцип дії синхронного генератора

Робота синхронного генератора заснована на явищі електромагнітної індукції і полягає в перетворенні механічної енергії в електричну енергію змінного струму.

Принцип дії синхронного генератора розглянемо на прикладі двопольової моделі синхронної машини (рис. 9.1).

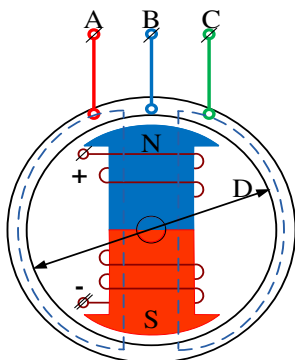


Рис. 9.1 – Модель двополюсної синхронної машини

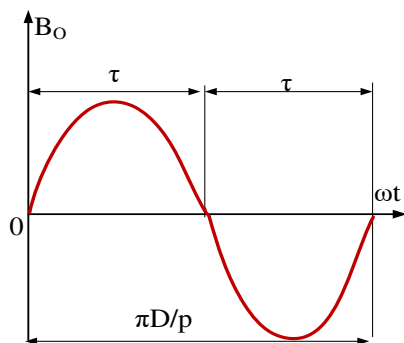


Рис. 9.2 – Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі

При підключенні обмотки збудження до джерела постійного струму створюється магнітне поле. Оскільки це поле утворено постійним струмом, то воно нерухоме в просторі щодо полюсів ротора. Якщо ротор не приведений в обертання, в обмотці якоря ЕРС не наводиться. Коли ротор приводиться в обертання приводним двигуном то лінії магнітного поля збудження перетинають провідники обмотки якоря та наводять у них ЕРС. Відповідно до закону електромагнітної індукції миттєве значення ЕРС провідника визначається як добуток величини магнітної індукції, довжини провідника та швидкості його руху:

$$e_{np} = Blv \quad (9.1)$$

Якщо прийняти, що довжина провідника і швидкість руху поля ротора постійні величини, що має місце в синхронній машині, то очевидно, що характер ЕРС e_{np} буде залежати тільки від кривої розподілу індукції в повітряному зазорі уздовж окружності статора. Для одержання кривої ЕРС, близької до синусоїдальної, необхідно, щоб магнітна індукція вздовж повітряного зазору змінювалася за синусоїдальним законом $B_0 = B_{max} \sin \alpha$ (рис. 9.2). Дана умова досягається відповідною

конструкцією ротора: в явнополюсних машинах збільшенням повітряного зазору під краями полюсних наконечників (у 1,5-2 рази), а в неявнополюсних підбором співвідношення між частиною окружності ротора без пазів і частиною його окружності з пазами, у які укладається розподілена обмотка збудження.

Діюче значення ЕРС фази обмотки якоря визначається вираженням

$$E_{\phi} = 4,44 w_{\phi} f K_{об} \Phi_0 = E_0 \quad (9.2)$$

де w_{ϕ} - число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки якоря;

$f = pn / 60$ – частота струму, Гц;

p - число пар полюсів ротора;

n - частота обертання ротора, об/хв;

Φ_0 - магнітний потік збудження на полюсному розподілі, Вб;

$K_{об}$ - обмотковий коефіцієнт обмотки якоря.

Відповідно до приведеного виразу, значення ЕРС і, отже, *вихідна напруга генератора залежить від магнітного потоку Φ_0 на полюсному розподілі, що регулюється струмом збудження та частотою обертання ротора n .*

Звичайно в генераторах загальпромислового призначення частота вихідної напруги $f = 50$ Гц, отже, у залежності від числа пар полюсів машини частота обертання ротора повинна бути визначеною, тобто відповідати наступному ряду:

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

Таким чином, у синхронних генераторах регулювати значення ЕРС обмотки якоря і відповідно, вихідну напругу можна тільки зміною струму збудження.

Обмотка якоря трифазного синхронного генератора складається з трьох однофазних обмоток, зміщених у просторі під кутом 120 ел. градусів відносно один одного і з'єднаних зіркою чи трикутником. На роторі розташована обмотка збудження, при підключенні якої до джерела постійного струму виникає магнітне поле збудження. За допомогою первинного двигуна ротор генератора приводять в обертання. При цьому магнітне поле ротора також обертається і наводить у трифазній обмотці якоря ЕРС, які будучи однаковими по величині і зсунутими по фазі відносно один одного на 120 електричних градусів, утворюють трифазну симетричну систему ЕРС.

ЕРС першої гармоніки трифазної обмотки (приймав початкову фазу ЕРС в обмотці А рівною нулю) становить:

$$\begin{cases} e_A = E_m \sin \omega t = \sqrt{2} \cdot E_\phi \cdot \sin \omega t \\ e_B = E_m \sin(\omega t - 120^\circ) = \sqrt{2} \cdot E_\phi \cdot \sin(\omega t - 120^\circ) \\ e_C = E_m \sin(\omega t - 240^\circ) = \sqrt{2} \cdot E_\phi \cdot \sin(\omega t + 120^\circ) \end{cases} \quad (9.3)$$

§ 9.2 Реакція якоря синхронного генератора

При роботі синхронного генератора в режимі холостого ходу виводи обмотки якоря розімкнуті. У цьому режимі в магнітному колі машини існує тільки поле, створене обмоткою збудження під дією магніторушійної сили (МРС) F_0 . На кожному полюсному розподілі в повітряному зазорі між статором і ротором утворюється магнітний потік Φ_0 , що

називається основним магнітним потоком, він і визначає значення ЕРС обмотки якоря при холостому ході.

У навантажувальному режимі обмотка якоря підключена до навантаження. При цьому в обмотці якоря протікає струм I_l , що створює власне магнітне поле під дією МРС обмотки якоря F_a . Це поле якоря взаємодіє з основним полем (полем збудження) підсилюючи, послабляючи або спотворюючи його форму. У результаті цієї взаємодії в генераторі, що працює під навантаженням, утвориться результуюче магнітне поле під дією результуючої МРС

$$\dot{F}_p = \dot{F}_0 + \dot{F}_a \quad (9.4)$$

Вплив МРС обмотки якоря на МРС обмотки збудження називають реакцією якоря.

У синхронних машинах магнітне поле, створене обмоткою збудження обертається разом з ротором і частота обертання цього поля n . Змінний трифазний струм, що проходить по обмотці якоря, має частоту струму якоря f і створює магнітне поле якоря, що обертається щодо нерухомого статора з частотою n_1 . Очевидно, що магнітні поля (МРС) ротора і якоря обертаються щодо нерухомої системи відліку з однаковою частотою ($n_2 = n_1$) і є взаємно нерухомими, чим і визначається можливість електромеханічного перетворення енергії.

Реакція якоря впливає на робочі властивості синхронної машини, тому що зміна магнітного поля в машині супроводжується зміною ЕРС, наведеної в обмотці статора, а отже, зміною ряду інших величин, зв'язаних з цією ЕРС. Очевидно, що реакція якоря синхронних машин залежить не тільки від величини, але і від характеру навантаження. Синхронні генератори, як правило, працюють на змішане навантаження

(активно-індуктивне чи активно-ємнісне). Але для з'ясування питання про вплив реакції якоря на роботу синхронної машини доцільно розглянути випадки роботи генератора при навантаженнях граничного характеру, а саме: активного, індуктивного та ємнісного. Скористаємося для цього векторними діаграмами МРС, ЕРС і струмів синхронного генератора. При аналізі впливу реакції якоря виходять з наступних положень:

а) вектор ЕРС $\vec{E}_0$, що індукується магнітним потоком обмотки збудження в обмотці статора, відстає по фазі від вектора цього потоку (а отже, і вектора МРС $\vec{F}_0$) на 90° ;

б) вектор струму в обмотці якоря (статора) $\vec{I}_l$ може займати стосовно вектора $\vec{E}_0$ різні положення, обумовлені кутом ψ у залежності від виду навантаження;

в) взаємне розташування обертового ротора й обмотки фази А-х якоря розглядаються для моменту часу, коли у фазі А якоря струм максимальний;

г) вісь результуючої МРС усіх трьох фаз обмотки якоря F_a , а отже і вісь потоку Φ_a у всіх випадках перпендикулярна до площини котушки А - х, тобто в повітряному зазорі зображена горизонтальною лінією.

Активне навантаження ($\psi=0$). На рис. 9.3,а представлений статор і ротор дво полюсного генератора. На статорі показана частина фазної обмотки. Ротор явнополюсний, обертається проти руху годинникової стрілки. У розглянутий момент часу ротор займає вертикальне положення, що відповідає максимуму ЕРС $\vec{E}_0$ у фазній обмотці А-х. Так як струм при активному навантаженні збігається по фазі з ЕРС, то вказане положення ротора відповідає також і максимуму

струму. Побудувавши лінії магнітної індукції поля збудження (ротора) і лінії магнітної індукції поля обмотки якоря, бачимо, що МРС обмотки якоря F_a спрямована перпендикулярно МРС обмотки збудження F_0 . Цей висновок також підтверджується векторною діаграмою, побудованою для цього ж випадку. Порядок побудови цієї діаграми наступний: відповідно до положення ротора генератора проводимо вектор МРС збудження $\vec{F}_0$; під кутом 90° до цього вектора у бік відставання проводимо вектор ЕРС $\vec{E}_0$, наведеної магнітним полем збудження в обмотці якоря; при підключенні чисто активного навантаження струм в обмотці статора I_1 збігається по фазі з ЕРС $\vec{E}_0$, а тому вектор МРС F_a , створений цим струмом, зсунутий у просторі щодо вектора $\vec{F}_0$ на 90° . Така взаємодія МРС F_0 та F_a викликає викривлення магнітного поля машини, магнітне поле послаблюється під краєм полюса, що набігає, і підсилюється під краєм полюса, що збігає. У наслідку насичення магнітного кола результуюче магнітне поле машини трохи послаблюється. Реакцію якоря у синхронному генераторі при активному навантаженні називають поперечною.

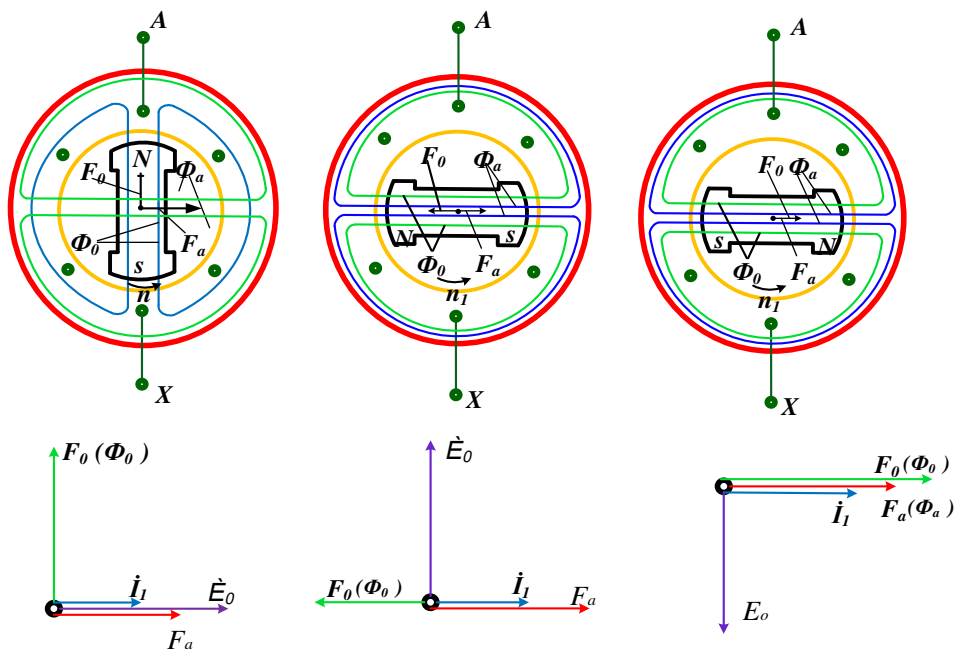


Рис.9.3 - Реакція якоря синхронного генератора при навантаженнях:
активному (а), індуктивному (б), ємнісному (в)

Індуктивне навантаження ($\psi=90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні генератора струм якоря $\dot{I}_l$ відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ на 90° . Тому він досягає максимального значення лише після повороту ротора вперед на 90° щодо його положення, що відповідає максимуму ЕРС $\dot{E}_0$ (рис.9.3,б) При цьому МРС якоря $\dot{F}_a$ діє по осі полюсів ротора зустрічно МРС збудження $\dot{F}_0$. У цьому ми також переконуємося, побудувавши векторну діаграму. Така дія МРС якоря послабляє поле машини. Отже, реакція якоря в синхронному генераторі при чисто індуктивному навантаженні здійснює поздовжньо-розмагнічуючу дію.

Ємнісне навантаження ($\psi = -90^\circ$). Так як струм I_l при ємнісному навантаженні випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$ на 90° , до свого найбільшого значення він досягає раніш, ніж ЕРС, тобто коли ротор займе положення, показане на рис.9.3,в. Магніторушійна сила якоря $\dot{F}_a$, так само як і в попередньому випадку, діє по осі полюсів, але тепер уже згідно з МРС збудження $\dot{F}_0$. При цьому відбувається посилення магнітного поля збудження. Таким чином, при чисто ємнісному навантаженні синхронного генератора реакція якоря здійснює поздовжньо-намагнічуючу дію.

Змішане навантаження. При змішаному навантаженні синхронного генератора струм якоря I_l зсунуто по фазі відносно ЕРС $\dot{E}_0$ на кут ψ , значення якого знаходяться в межах $0 < \psi < \pm 90^\circ$. Для з'ясування питання про вплив реакції якоря при змішаному навантаженні скористаємося векторними діаграмами, що представлені на рис. 9.4. При активно-індуктивному навантаженні (рис. 9.4, а) вектор ψ відстає від вектора $\dot{E}_0$ на кут $0 < \psi < 90^\circ$. Розкладемо вектор $\dot{F}_a$ на дві складові: поздовжню складову МРС якоря $F_{ad} = F_a \sin \psi$ і поперечну складову МРС якоря

$F_{aq} = F_a \cos \psi$. Таке ж розкладання МРС якоря $\dot{F}_a$ на складові можна зробити у випадку активно-ємнісного навантаження (рис. 9.4, б). Поперечна складова МРС якоря F_{aq} пропорційна активній складовій струму навантаження $I_q = I_l \cos \psi$, а поздовжня складова МРС якоря F_{ad} пропорційна реактивній складовій струму навантаження $I_d = I_l \sin \psi$.

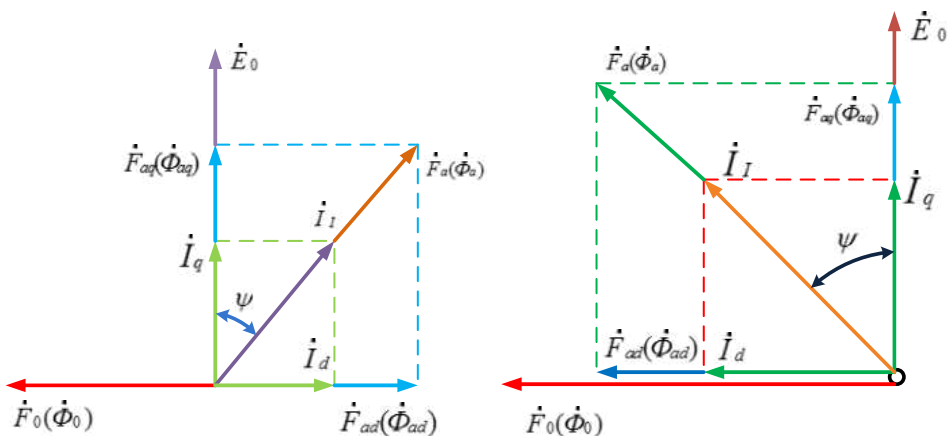


Рис.9.4 – Реакція якоря синхронного генератора при змішаному навантаженні: (а) - активно-індуктивне навантаження, (б) – активно-ємнісне навантаження

При цьому, якщо реактивна складова струму навантаження I_d відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ (навантаження активно-індуктивне), то МРС F_{ad} розмагнічує генератор; якщо ж реактивна складова I_d випереджає по фазі ЕРС $\dot{E}_0$ (навантаження активно-ємнісне), то МРС F_{ad} підмагнічує генератор.

§ 9.3 Векторні діаграми і характеристики трифазного синхронного генератора

Векторні діаграми синхронного генератора з приєднаним симетричним навантаженням дозволяють установити зв'язок між його ЕРС $\dot{E}$, напругою $\dot{U}_l$ і струмом обмотки якоря $\dot{I}_l$ виходячи з рівняння електричного стану фази обмотки якоря

$$\dot{U}_l = \dot{E} - \dot{I}_l R_a - j \dot{I}_l X_l \quad (9.6)$$

де R_a і X_l - відповідно активний опір і індуктивний опір розсіювання фази обмотки якоря.

Як відзначалося результуюче магнітне поле машини внаслідок реакції якоря визначається взаємодією основного магнітного поля (Φ_0) і магнітного поля якоря (Φ_a). У першому наближенні можна вважати, що $\Phi = \Phi_0 + \Phi_a$ а отже і ЕРС генератора $\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a$. Оскільки, магнітне поле якоря визначається струмом якоря (I_l), і тому ЕРС, що індукується в обмотці якоря (E_a), визначається індуктивним спаданням напруги в цій обмотці

$$\dot{E}_a = -jX_a \cdot \dot{I}_l \quad (9.7)$$

З врахуванням (9.7) напругу генератора можна представити так:

$$\dot{U}_l = \dot{E}_0 - \dot{I}_l R_a - j\dot{I}_l (X_l + X_a)$$

або

$$\dot{U}_l = \dot{E}_0 - \dot{I}_l R_a - j\dot{I}_l X_c, \quad (9.8)$$

де $X_c = X_l + X_a$ являє собою синхронний індуктивний опір фази обмотки якоря, що у ненасиченої машини є практично незмінною величиною.

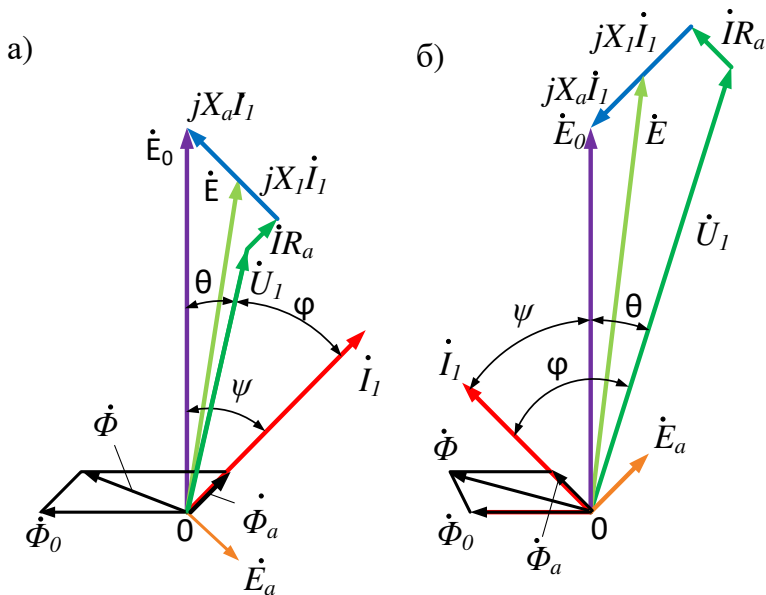


Рис. 9.5 – Векторні діаграми фази трифазного синхронного генератора при симетричному навантаженні зі струмом обмотки якоря: (а) відстаючим від напруги; (б) випереджаючи напругу

Рівнянню (9.8) відповідають векторні діаграми (рис. 9.5, а, б), що побудовані для однієї фази трифазного синхронного генератора відповідно для струму відстаючого (навантаження активно - індуктивне) та випереджаючого (навантаження активно - ємнісне) по фазі напругу.

З цих діаграм видно, що в першому випадку, коли $\varphi > 0$, збільшення навантаження супроводжується зменшенням напруги U_1 , а в другому при $\varphi < 0$ – зростанням напруги U_1 .

У синхронних машинах великої потужності активне спадання напруги $I_1 R_a$ мале в порівнянні з індуктивним спаданням напруги $jI_1 X_s$ і не перевищує 5...6 % номінальної напруги генератора.

Тому рівняння електричного стану фази статора можна спростити і записати в такому виді:

$$\dot{U}_1 = \dot{E}_0 - jX_c \dot{I}_1 \quad (9.8, a)$$

Це рівняння можна інтерпретувати спрощеною векторною діаграмою (рис.9.6), представленій для двох симетричних навантажень з однаковими струмами $\dot{I}_1$ та $\dot{I}_2$, що відстають від своїх напруг відповідно на кути φ_1 та φ_2 з якої видно, що напруга на затискачах синхронного генератора залежить не тільки від струму обмотки статора, обумовленого приєднаним навантаженням, але також і від її коефіцієнта потужності.

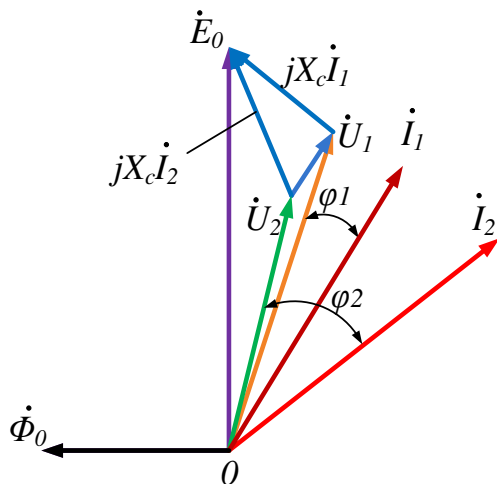


Рис. 9.6 – Спрощена векторна діаграма фази трифазного синхронного генератора при симетричному навантаженні з однаковими струмами, що відстають від напруги на різні кути

Аналіз приведених векторних діаграм дозволяє судити про характеристики синхронного генератора, що у кінцевому виді визначають його властивості. Найважливішими з цих характеристик є характеристики холостого ходу, зовнішні і регульовальні. Характеристика холостого ходу синхронного генератора являє собою графік залежності напруги U_0 у режимі холостого ходу генератора від струму збудження I_{z60} при незмінній частоті обертання ротора: $U_0 = f(I_{z60})$ при $I_1 = 0$ та

$n=const$. Схема ввімкнення синхронного генератора для зняття характеристики холостого ходу приведена на рис. 9.7, а.

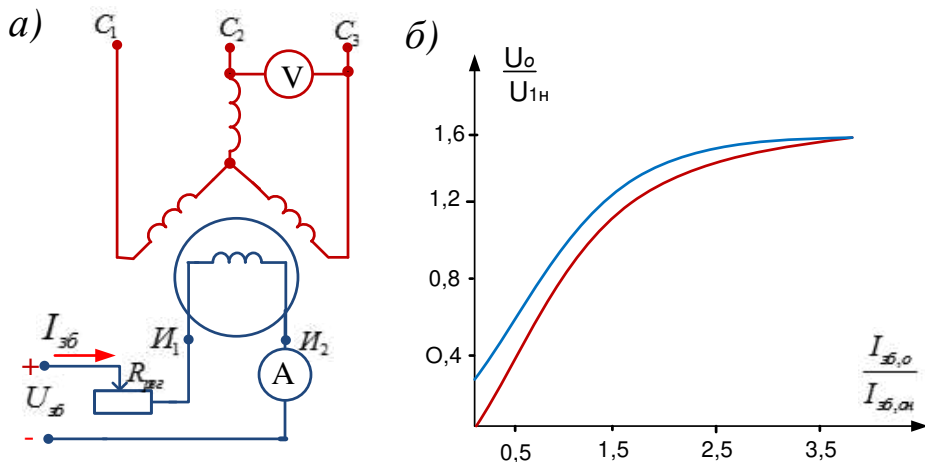


Рис. 9.7 – Електрична схема СГ (а) та характеристика холостого ходу (б)

Зазвичай, знімають дві ділянки характеристики, при збільшенні та зменшенні струму збудження, які внаслідок гістерезисних властивостей магнітного кола не збігаються.

Характеристика холостого ходу, а також інші характеристики синхронних генераторів зручніше будувати у відносних одиницях. При цьому по осях графіка відкладають не абсолютні значення величин, а їхні відношення до номінальних значень: по осі ординат $U_0 / U_{1н}$, по осі абсцис $I_{зб,0} / I_{зб,0н}$.

Таким чином, за одиницю на осі напруг приймають напругу холостого ходу, яка дорівнює номінальній $U_0 = U_{1н}$, а за одиницю на осі струмів збудження приймають струм збудження $I_{зб,0н}$, що відповідає напрузі $U_0 = U_{1н}$.

Характеристики у відносних одиницях дозволяють зробити порівняльну оцінку різних генераторів.

Зовнішня характеристика синхронного генератора являє собою залежність напруги на виводах якірної обмотки від величини струму навантаження: $U_1 = f(I_1)$ при умові $I_{3\phi} = \text{const}$; $\cos\varphi = \text{const}$; $n_1 = n_n = \text{const}$.

На рис. 9.8.а представлені зовнішні характеристики, що відповідають різним за характером навантаженням синхронного генератора.

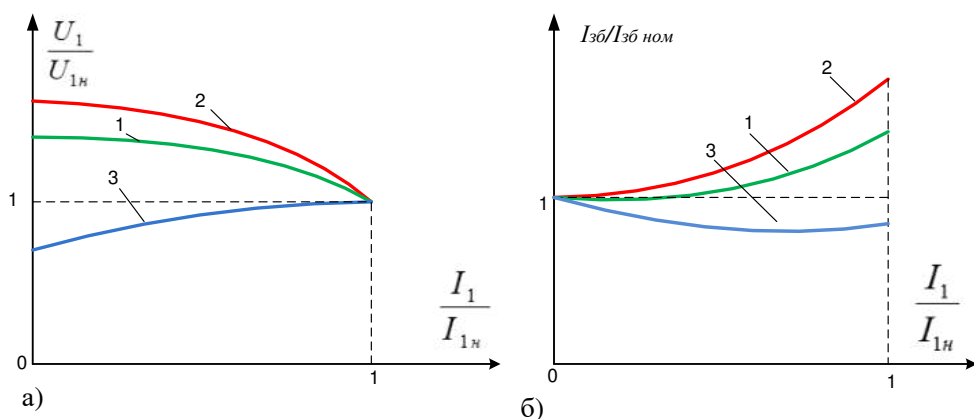


Рис. 9.8 – Зовнішні (а) та регулювальні (б) характеристики СГ

При знятті зовнішньої характеристики генератор навантажують до номінального струму ($I_1 = I_{1n}$) при номінальній напрузі ($U_1 = U_{1n}$) на виводах якірної обмотки. Потім поступово розвантажують генератор. При активному навантаженні (крива 1) зменшення навантажувального струму супроводжується зростанням напруги, що пояснюється зменшенням спадання напруги в статорній обмотці й ослабленням потоку поперечної реакції якоря в насиченій машині.

При активно-індуктивному навантаженні (крива 2) збільшення напруги при зменшенні навантаження буде більш інтенсивним, тому що зі зменшенням струму I_l послабляється дія розмагнічуючої складової реакції якоря. Однак у випадку активно-ємнісного навантаження генератора (крива 3) зменшення струму I_l супроводжується зменшенням напруги U_l , що пояснюється ослабленням підмагнічуючої дії реакції якоря.

Зміна напруги синхронного генератора, що працює окремо від інших, при скиданні навантаження від номінального значення до нуля і при збереженні струму збудження і частоті обертання незмінними, називається номінальною зміною напруги

$$\Delta U_n = \frac{E_0 - U_{In}}{U_{In}} 100\% \quad (9.9)$$

При ємнісному навантаженні генератора величина ΔU_n є від'ємною. Відповідно до існуючих норм підвищення напруги, при зменшенні навантаження ΔU_n не повинно перевищувати 50%.

Регульовальна характеристика синхронного генератора показує, як варто змінювати струм збудження генератора при змінах навантаження, щоб напруга на затискачах генератора залишалася незмінною і дорівнювала номінальній:

$$I_{зб} = f(I_l) \text{ при } U_l = U_{In} = \text{const та } n_l = n_n = \text{const}$$

На рис.9.8,б представлені регульовальні характеристики синхронного генератора. При активному навантаженні збільшення струму навантаження, супроводжується зменшенням напруги U_l , тому для підтримки незмінної напруги, у міру збільшення струму навантаження I_n варто підвищувати

струм збудження (крива 1). Активно-індуктивний характер навантаження викликає більш різке зниження напруги U_I , тому струм збудження, необхідний для підтримки $U_I = U_{In}$, варто підвищувати більше (крива 2). При активно-ємнісному характері навантаження збільшення навантаження супроводжується ростом напруги U_I тому для підтримки рівності напруги $U_I = U_{In}$, струм збудження варто зменшувати (крива 3).

Регульовальні характеристики дають можливість установити межі зміни струму збудження синхронного генератора і вибрати апарати для регулювання напруги.

Регулювати струм збудження при зміні навантаження генератора можна вручну, впливаючи на регулюючий реостат $R_{рег}$, або домогтися його автоматичної зміни, що особливо зручно в синхронних генераторах із самозбудженням (рис. 9.9). Тут при холостому ході генератора вторинні обмотки додаткового трансформатора T_{pz} відіграють роль дроселів, що знижують напругу на затискачах погоджувального трансформатора T_{pn} , через який живиться напівпровідникові діоди Д. При збільшенні навантаження генератора в цих обмотках наводяться ЕРС, у результаті чого напруга на діодах зростає і збільшується струм збудження генератора, що приводить до відносної стабілізації напруги на його затискачах.

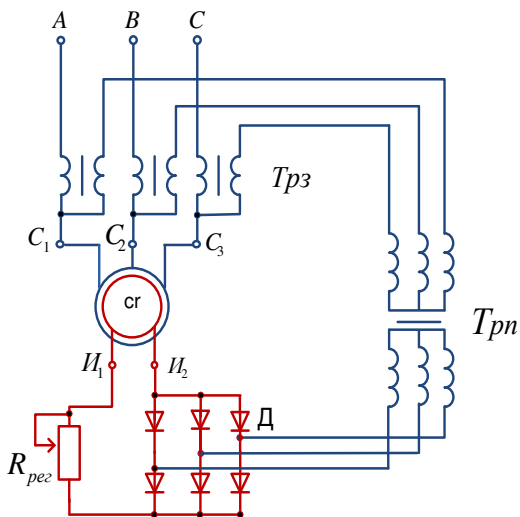


Рис. 9.9- Схема трифазного СГ із самозбудженням

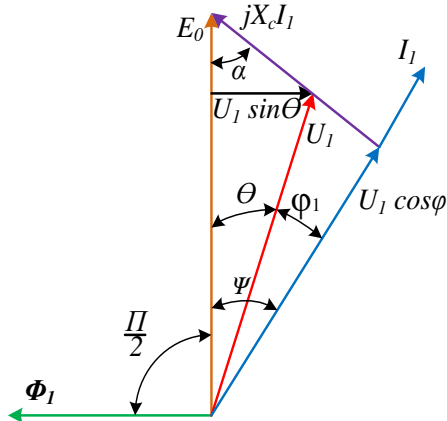


Рис. 9.10- Спрощена векторна діаграма фази трифазного синхронного генератора

§ 9.4 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора

Електромагнітна потужність трифазного синхронного генератора P_{em} - потужність, передана електромагнітним шляхом обмотці якоря ротором, що обертається, відрізняється від потужності P_2 зовнішнього кола, тільки на величину $3R_a I_1^2$, що відповідає втратам електричної енергії в трифазній обмотці якоря, тобто

$$P_{em} = P_2 + 3R_a I_1^2 \quad (9.10)$$

де R_a - активний опір фази обмотки якоря;

I_1 - струм фази обмотки якоря.

Оскільки втрати електричної енергії в обмотці якоря незначні, можна вважати, що потужності $P_{ел1}$ і P_2 практично однакові. Це дозволяє електромагнітну потужність знайти так:

$$P_{ем} \approx P_2 \approx 3U_1 I_1 \cos\varphi \quad (9.11)$$

де U_1 - фазна напруга генератора;

$\cos\varphi$ - коефіцієнт потужності приєднаних приймачів.

Зі спрощеної векторної діаграми синхронного генератора (рис. 9.10) випливає, що

$$U_1 \cos\varphi = E_0 \sin\alpha = E_0 \frac{U_1 \sin\theta}{X_C I_1}$$

Тоді електромагнітна потужність визначиться по формулі

$$P_{ем} = \frac{3E_0}{X_C} U_1 \sin\theta \quad (9.12)$$

де θ - кут між віссю полюсів ротора і віссю результуючого магнітного потоку машини (кут навантаження).

З останнього рівняння видно, що електромагнітна потужність синхронної машини прямо пропорційна напрузі на затискачах обмотки статора і залежить від кута θ . Криву $P_{ем} = f(\theta)$, отриману при струмі збудження $I_{зб} = const$ і незмінній частоті обертання ротора $n_1 = n_n = const$, називають кутовою характеристикою синхронного генератора (рис. 9.11). При зміні навантаження синхронного генератора кут θ змінюється звичайно від 0 до 30° , причому значення його $\theta_{ном} = 30^\circ$ відповідає номінальній потужності $P_{ном}$.

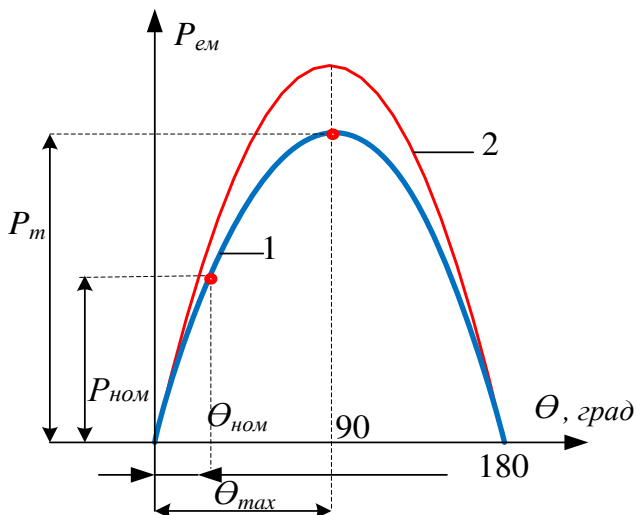


Рис. 9.11-Кутові характеристики трифазного синхронного генератора при: 1-номінальному збудженні; 2-перезбудженні

Оскільки електромагнітна потужність P_{em} залежить від ЕРС холостого ходу E_0 обумовленого струмом збудження $I_{зб}$, то деяким перезбудженням машини можна збільшити максимальну електромагнітну потужність що підвищує статичну стійкість роботи машини, але викликає підвищене нагрівання обмотки ротора.

$$P_m = \frac{3E_0}{X_C} U_1 \quad (9.13)$$

Виходячи з викладеного, рівняння електромагнітної потужності можна представити так:

$$P_{em} = P_m \sin \theta$$

а вираз електромагнітного моменту записати в такому виді:

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega_1} = \frac{pP_{em}}{2\pi f_1} = \frac{3pE_0}{2\pi f_1 X_C} = M_m \sin \theta \quad (9.14)$$

де Ω_l - частота обертання ротора;

p - число пар полюсів машини;

M_m - максимальний електромагнітний момент.

Максимальний електромагнітний момент трифазної синхронної машини визначається по формулі (9.15).

$$M_m = \frac{3pE_0}{2\pi f_l X_C} U_l \quad (9.15)$$

§ 9.5 Втрати і коефіцієнт корисної дії синхронних генераторів

Перетворення енергії в синхронному генераторі пов'язано з втратами енергії, що класифікуються в такий спосіб.

1. Механічні втрати $P_{мех}$ - складаються з втрат на тертя в підшипниках; тертя об повітря або інший газ, що охолоджує машину; тертя щіток на контактних кільцях.

2. Магнітні втрати виникають в сердечнику статора і складаються з втрат на перемагнічування (на гістерезис) і на вихрові струми.

3. Електричні втрати складаються із втрат в міді та перехідних втрат в контакті щіток, супроводжують нагрівання статорної (якірної) обмотки.

$$P_e = m_l I_l^2 R_{a75} \quad ,$$

де R_{a75} - активний опір фази статорної обмотки при робочій температурі 75°C;

m_l - число фаз;

I_l - фазний струм обмотки якоря.

Втрати на збудження $p_{зб}$, до яких, крім втрат в обмотці збудження відносяться втрати в самому збуднику, якщо він працює від загального із синхронною машиною первинного двигуна.

Додаткові втрати $p_{доо}$ складаються з втрат у поверхневому шарі ротора, викликаних пульсаціями поля внаслідок зубчатості внутрішньої поверхні статора, а також із втрат, викликаних полями розсіювання статора.

Механічні втрати, магнітні втрати в сталі статора і втрати на збудження складають втрати холостого ходу

$$p_0 = p_{мех} + p_c + p_{зб}$$

Величина цих втрат не залежить від навантаження машини.

Сума всіх втрат

$$\sum p = p_{мех} + p_c + p_{зб} + p_e + p_{доо} \quad (9.16)$$

Ефективність роботи синхронного генератора характеризується коефіцієнтом корисної дії

$$\eta = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} \quad (9.17)$$

де P_1 - потужність, що підводиться до вала синхронного генератора;

P_2 - корисна потужність, що віддається генератором навантаженню. Ця формула може бути перетворена у вид, зручний для підрахунку ККД синхронного генератора

$$\eta = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p} \quad (9.18)$$

Корисна потужність генератора

$$P_2 = m_1 I_1 U_1 \cos \varphi_1 \quad (9.19)$$

Приведена формула ККД синхронного генератора показує що величина ККД залежить не тільки від величини навантаження машини, але і від значення коефіцієнта потужності приймачів, що приєднуються до генератора (рис. 9.12).

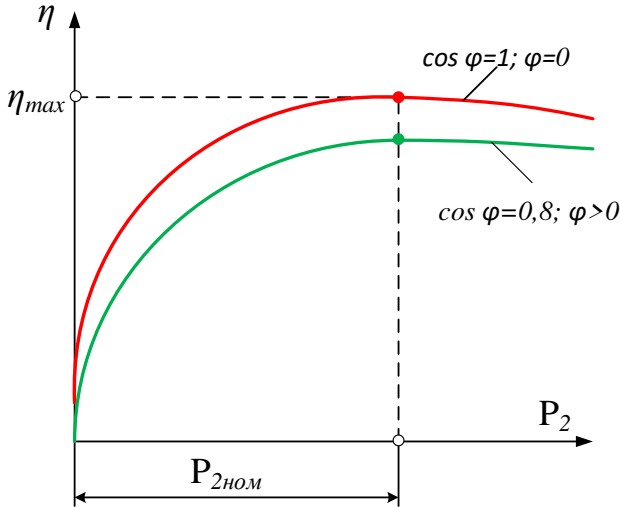


Рис. 9.12 – Залежність ККД СГ від навантаження

Максимальне значення ККД відповідає навантаженню, близькому до номінального, і складає для машин середньої потужності 0,89...0,92, а для генераторів великої потужності доходить до 0,96...0,99.

Незважаючи на високий ККД, у великих машинах через велике нагрівання застосовують охолодження обмоток воднем, дистильованою водою чи трансформаторним маслом, що дозволяє створювати більш компактні й ефективні трифазні машини.

§ 9.6 Особливості роботи генератора на мережу

Звичайно на електростанціях встановлюється кілька синхронних генераторів для паралельної роботи на загальну електричну мережу. Це підвищує надійність енергопостачання споживачів і дозволяє краще організувати обслуговування агрегатів. Електричні станції у свою чергу об'єднуються для паралельної роботи в потужні енергосистеми, що дозволяють щонайкраще вирішити задачу виробництва і розподілу електричної енергії. Таким чином, для синхронної машини, встановленої на електричній станції, типовим є режим роботи на мережу великої потужності, у порівнянні з якою потужність розглянутого генератора є малою. У цьому випадку з великим ступенем точності можна прийняти, що генератор працює паралельно з мережею нескінченно великої потужності, тобто що напруга мережі U_M і її частота f_M є постійними і не залежать від навантаження даного генератора. Розглянемо умови ввімкнення генератора на паралельну роботу з мережею і способи регулювання навантаження.

§ 9.7 Умови включення генератора на паралельну роботу з мережею

При ввімкненні синхронної машини на паралельну роботу необхідно забезпечити можливо менший кидок струму в момент приєднання генератора до мережі. У протилежному випадку можливе спрацювання захисту, поломка генератора чи первинного двигуна.

Струм у момент підключення генератора до мережі буде дорівнювати нулю, якщо вдається забезпечити рівність миттєвих значень напруг мережі і генератора: $U_e = U_m$

$$U_{.mm} \sin(\omega_{.m}t + a_{.m}) = U_{Im} \sin(\omega_{Im}t + a_{Im}) \quad (9.20)$$

При включенні синхронного генератора на паралельну роботу необхідно дотримуватись наступних трьох умов:

- ЕРС генератора $\dot{E}_0$ повинна бути рівна по величині U_M і знаходитись в протифазі ($\dot{E}_0 = - U_M$);
- рівність частоти струму мережі та частоти генератора ($f_M = f_z$);
- послідовність фаз генератора повинні відповідати послідовності фаз мережі.

Сукупність операцій, необхідних для підключення генератора до мережі, називається *умовами синхронізації*. Паралельне ввімкнення трифазного синхронного генератора з трифазною чотирьохпровідною мережею, до якої приєднані один чи кілька працюючих трифазних синхронних генераторів виконують методом точної синхронізації або способом самосинхронізації.

При точній синхронізації (рис. 9.13) послідовність операцій по синхронізації наступна:

- спочатку ротор генератора розганяють первинним двигуном до номінальної синхронної частоти обертання $n = n_1 = 60f_1/p$ в напрямку, що забезпечує необхідну послідовність фаз ЕРС обмоток, при цьому забезпечується рівність частот $f_M = f_1$;
- потім регулюємо струм у колі обмотки збудження ротора, домагаючись рівності напруг мережі і генератора ($U_M = U_z$).

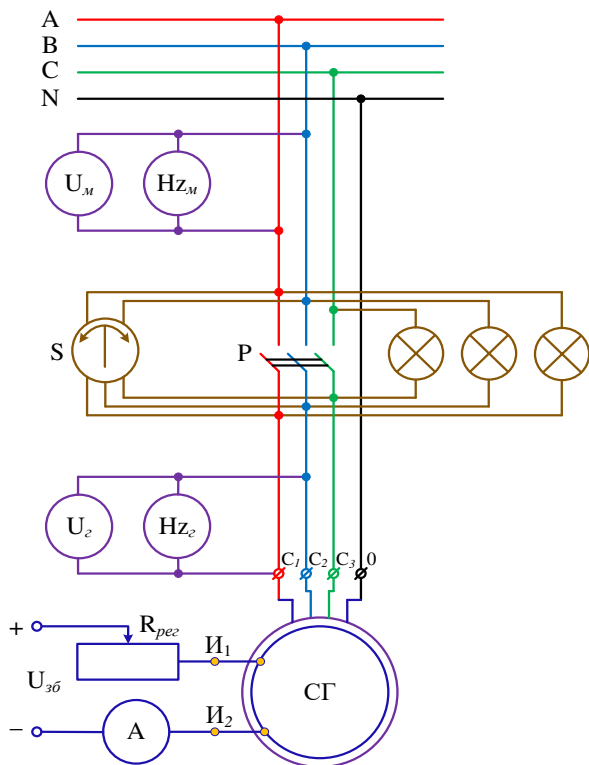


Рис.9.13 – Схема включення трифазного СГ на паралельну роботу з мережею

Процес синхронізації контролюється спеціальними приладами - ламповими чи стрілочними синхро-скопами.

Лампові синхроскопи застосовують для синхронізації генераторів малої потужності, звичайно їх використовують у лабораторній практиці. Цей прилад являє собою три лампочки, ввімкнені між фазами генератора і мережі. При ввімкненні їх за схемою, що зображена на рис. 9.13, на кожну лампу діє напруга $\Delta U = U_M - U_I$ яка при $f_M \neq f_I$ змінюється з частотою $\Delta f = f_M - f_I$, і називається частотою биття. При цьому лампи будуть мигати.

При $f_m \approx f_l$ різниця ΔU буде змінюватися повільно, внаслідок чого лампи будуть поступово загорятися і погасати. Звичайно практично неможливо забезпечити строгу рівність частот $f_m \approx f_l$, тому генератор підключають до мережі в момент, коли різниця напруг ΔU на короткий час стає близької нулю, тобто в середині періоду загасання ламп. Для більш точного визначення цього моменту часто застосовують нульовий вольтметр, що має розтягнуту шкалу в області нуля. Після ввімкнення генератора в мережу подальша синхронізація частоти його обертання, тобто підтримка умов $n=n_l$, як буде показано далі, відбувається автоматично.

Генератори великої потужності синхронізують за допомогою стрілочних синхроскопів, що працюють на принципі обертового магнітного поля. Стрілка синхроскопа при дотриманні умов синхронізації встановлюється на червоній рисці.

На електричних станціях використовують автоматичні прилади для синхронізації генераторів без участі обслуговуючого персоналу. При самосинхронізації ротор незбудженого синхронного генератора розганяють первинним двигуном до частоти обертання, що відрізняється від синхронної не більше ніж на $\pm 5\%$. Потім обмотку статора приєднують до мережі працюючих генераторів, після чого в коло обмотки збудження ротора подається постійний струм і цим забезпечують втягування ротора в синхронне обертання. Якщо синхронний генератор включають на паралельну роботу вперше, необхідно попередньо перевірити дотримання послідовності фаз. При самосинхронізації виникає короткочасне підвищення струму ("поштовх" струму не повинен

перебільшувати 3,5 номінального значення) і відповідні йому електромагнітні моменти і сили з одночасним зниженням напруги в мережі, що швидко відновлюється до номінального значення.

При будь-якому способі синхронізації не дотримання умов (9.20) викликає аварійний режим, зв'язаний з виникненням великих струмів, небажаних для якірних обмоток генератора і приєднаного електроустаткування, а також появи різких електромагнітних моментів і сил, небезпечних не тільки для синхронного генератора, але і для його первинного двигуна.

§ 9.8 Регулювання активної потужності

Після ввімкнення генератора в мережу його напруга стає рівною напрузі мережі. Стосовно зовнішнього навантаження напруги $\dot{U}_m = \dot{U}_l$ збігаються по фазі, а по контурі генератор - мережа знаходяться в протифазі, тобто $\dot{U}_l = -\dot{U}_m$ (рис. 9.14, а).

Так як перед ввімкненням у мережу генератор працював в режимі холостого ходу, то при виконанні зазначених раніше трьох умов, необхідних для синхронізації генератора, його струм I_l після підключення до мережі також буде рівним нулю.

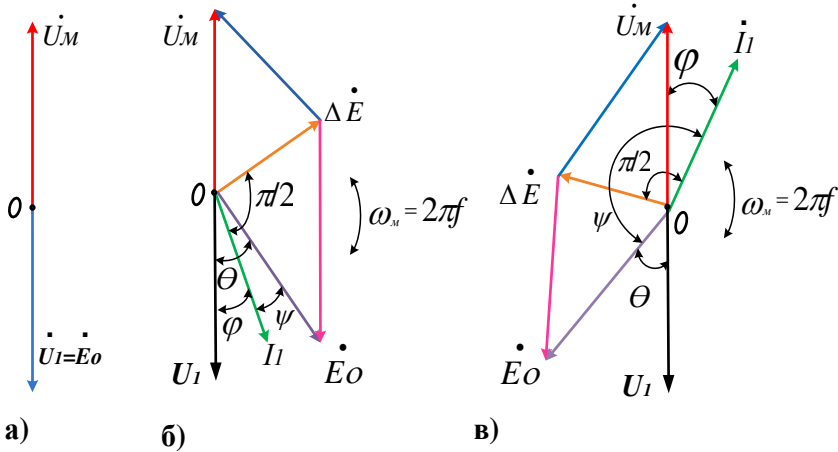


Рис. 9.14 - Векторні діаграми фази навантаженої трифазної синхронної машини, що працює в режимі: а - ідеального неробочого ходу; б - генератора; в - двигуна

Розглянемо, якими способами можна регулювати струм I_1 при роботі генератора паралельно з мережею на прикладі явнопольсної машини.

Струм, що проходить по обмотці якоря можна визначити з рівняння

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{E}_0 - \dot{U}_1}{jX_C} = \frac{\Delta \dot{E}}{jX_C} \quad (9.21)$$

Так як $\dot{U}_1 = -\dot{U}_M = \text{const}$, отже

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 - \dot{U}_1 = \dot{E}_0 + \dot{U}_M \quad (9.22)$$

Таким чином, величину струму I_1 можна змінювати тільки двома способами: змінюючи ЕРС E_0 по фазі чи по величині.

Якщо прикласти до валу генератора зовнішній момент $M_{\text{зовн}}$, більший моменту, необхідного для компенсації втрат потужності в сталі і механічних втрат, то ротор отримає деяке прискорення,

внаслідок чого вектор $\dot{E}_0$ зміщується щодо вектора $\dot{U}_I$ на деякий кут θ у бік обертання векторів (рис. 9.14, б).

Виникаючий при цьому струм $\dot{I}_I$, відстає на 90° від вектора $\Delta \dot{E}_0$, але стосовно вектора $\dot{U}_I$ зсунуто на порівняно малий кут φ . При цьому генератор віддає в мережу активну потужність $P_2 = m_I U_I I_I \cos \varphi_I$ на вал його діє електромагнітний гальмуючий момент M , що врівноважує обертаючий момент первинного двигуна, внаслідок чого частота обертання ротора залишається незмінною. Якщо прикласти до валу ротора зовнішній гальмівний момент $M_{\text{гальм}}$, то вектор $\dot{E}_0$ буде відставати від напруги $\dot{U}_I$ на кут 90° (рис. 9.14, в). При цьому виникає струм $\dot{I}_I$ що відстає на 90° від вектора $\Delta \dot{E}_0$, але зсунутий на порівняно невеликий кут φ щодо вектора напруги U_m . Отже, у розглянутому режимі активна потужність забирається з мережі і машина працює двигуном, створюючи електромагнітний обертаючий момент M , що врівноважує зовнішній гальмівний момент; частота обертання ротора при цьому знову залишається незмінною. *Таким чином, для збільшення навантаження генератора необхідно збільшувати прикладений до його вала зовнішній момент (тобто обертаючий момент первинного двигуна), а для зменшення навантаження - зменшувати цей момент.* При зміні напрямку зовнішнього моменту (якщо вал ротора не обертати, а гальмувати) машина автоматично переходить в режим двигуна.

§ 9.9 Регулювання реактивної потужності

Якщо в синхронній машині, підключеній до мережі і працюючій в режимі холостого ходу збільшити струм збудження $I_{\text{зб}}$, то зросте ЕРС $\dot{E}_0$ і по обмотці якоря буде

проходити струм $\dot{I}_l$ величина якого, згідно (9.21), визначається тільки індуктивним опором X_c машини. Отже, струм $\dot{I}_l$ буде реактивним: він відстає по фазі від E_l на кут 90° або випереджає на той же кут напругу мережі $\dot{U}_m$. При зменшенні струму збудження $I_{зб}$ струм $\dot{I}_l$ змінить свій напрямок: він буде відставати на 90° від напруги $\dot{U}_m$ (рис. 9.15, в) і випереджати на 90° ЕРС $\dot{E}_o$. Таким чином, при зміні струму збудження змінюється лише реактивна складова струму $\dot{I}_l$ тобто реактивна потужність машини.

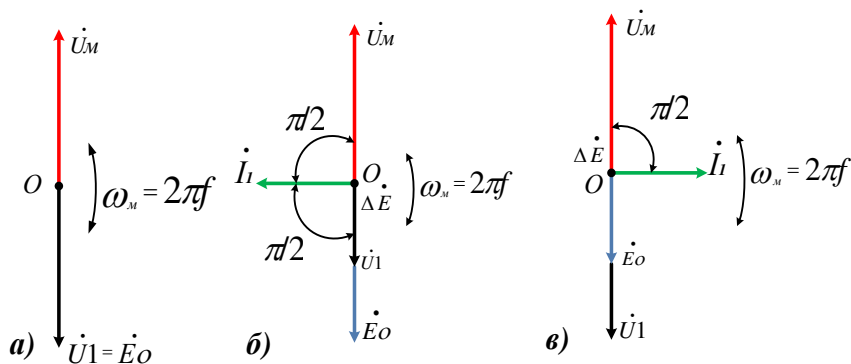


Рис. 9.15 - Векторні діаграми синхронної машини, що працює в режимі неробочого ходу при: а - нормальному збудженні, б - перезбудженні, в - недозбудженні

Активна складова струму $\dot{I}_l$ у розглянутих випадках дорівнює нулю. Отже, активна потужність $P_{ел} = 0$, і машина працює в режимі холостого ходу. Режим збудження синхронної машини, при якому реактивна складова струму $\dot{I}_l$ дорівнює нулю, називається нормальним(повним) збудженням. Якщо струм збудження $I_{зб} < I_{зб.норм}$, то струм $\dot{I}_l$ містить відстаючу реактивну складову; якщо $I_{зб} > I_{зб.норм}$, то струм $\dot{I}_l$ містить випереджальну реактивну складову.

Виникнення реактивної складової струму I_l фізично пояснюється тим, що при роботі синхронної машини на мережу нескінченно великої потужності її результуючий магнітний потік $\Phi_{рез} = \Phi_o + \Phi_a + \Phi_{\sigma}$ не залежить від струму збудження і при всіх умовах залишається незмінним. Тому якщо струм збудження $I_{зб}$ стає більше $I_{зб. норм}$, то виникає відстаюча складова струму I_l , що створює розмагнічуючий потік реакції якоря, а при $I_{зб} < I_{зб. норм}$ - випереджальна складова струму I_l , створює підмагнічуючий потік реакції якоря. В усіх випадках результуючий потік машини автоматично підтримується незмінним. Залежність струму якоря I_l від струму збудження $I_{зб}$ при різних навантаженнях машини називаються U -подібними характеристиками (рис. 9.16).

Як видно, при режимі нормального (повного) збудження струм якоря I_l мінімальний і активний; недозбудження або перезбудження приводить до збільшення струму якоря I_l за рахунок появи реактивних складових.

При зміні навантаження генератора змінюється тільки величина активної складової струму якоря $I_l \cos \varphi$, характер кривих $I_l = f(I_{зб})$ залишається незмінним.

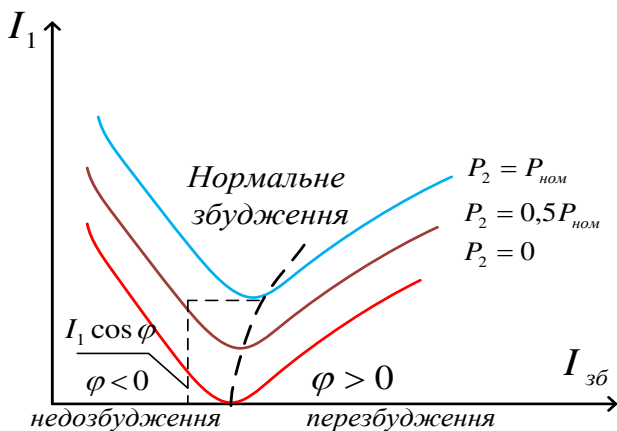


Рис. 9.16 - U-подібні характеристики СГ

Таким чином, за рахунок регулювання струму збудження можна при будь-якому навантаженні синхронної машини змінювати її $\cos \varphi$ і домагатися того, щоб вона при різних навантаженнях працювала з $\cos \varphi = 1$. Це є одним з її великих переваг у порівнянні з асинхронною машиною, що при всіх можливих режимах працює з $\cos \varphi < 1$ при відстаючому струмі. При необхідності синхронна машина може працювати і при випереджальному струмі (при перезбудженні), тобто віддавати в мережу реактивну потужність, необхідну різним пристроям, що споживають реактивну потужність (наприклад, асинхронним двигуном).

Отже, перезбуджена синхронна машина, що працює на мережу великої потужності, є генератором реактивної потужності.

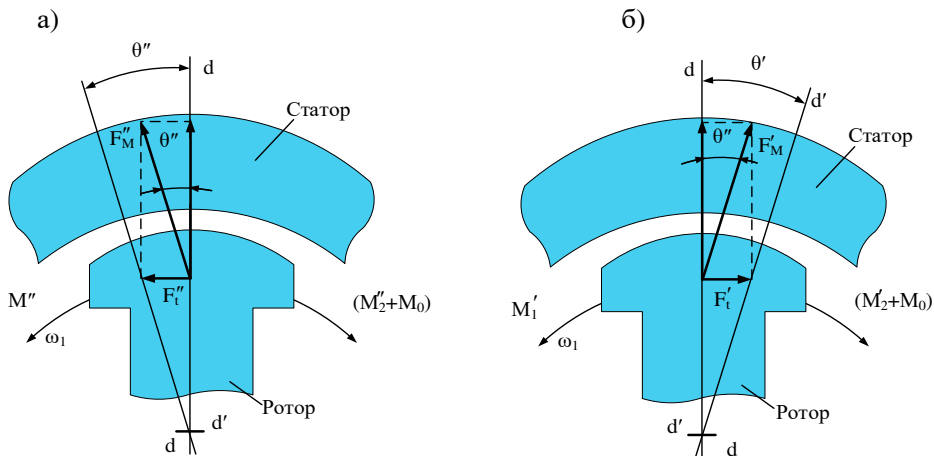
Частина 10 СИНХРОННІ ДВИГУНИ

§ 10.1 Принцип дії синхронного двигуна

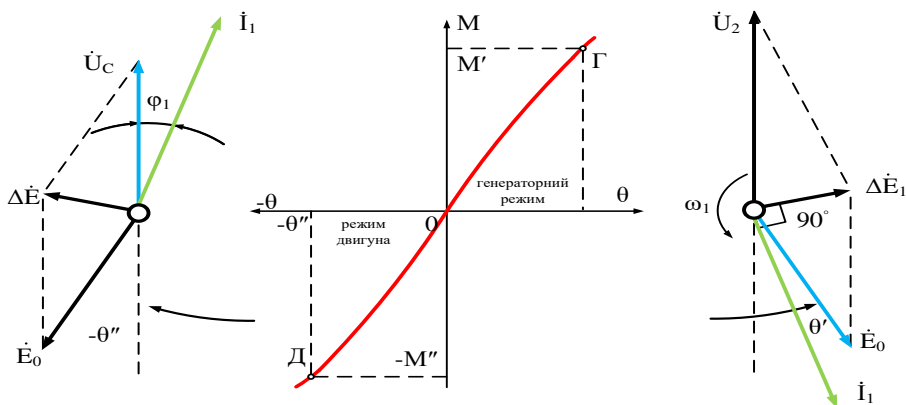
Синхронна машина, що працює паралельно з мережею, як було показано в п. 9.8, автоматично переходить у режим двигуна, якщо до валу ротора прикласти гальмівний момент. Таким чином, трифазні синхронні машини мають властивість оборотності, тобто можуть навіть без зміни їхньої конструкції працювати не тільки генераторами електричної енергії, але і двигунами, перетворюючи електричну енергію в механічну. При цьому обмотка статора (якоря) підключається до трифазної мережі і забезпечує збудження магнітного поля, що обертається із синхронною частотою $n_1 = 60f_1/p$ а обмотка ротора підключається до джерела постійного струму (випрямляча або збудника), що приводить до збудження магнітного поля ротора. Силкові лінії магнітного поля ротора і статора замикаються між сусідніми північними і південними полюсами через повітряні зазори і магнітопроводи статора і ротора.

Для пояснення принципу дії синхронного двигуна розглянемо синхронну машину, ввімкнену паралельно з мережею великої потужності і працюючу в режимі генератора.

Припустимо, привідний двигун обертає ротор генератора проти годинникової стрілки з кутовою частотою ω_1 ($\omega_1 = \pi n_1/30$). При цьому навантаження генератора таке, що подовжня вісь полюсів ротора $d-d$ зміщена відносно осі обертового поля $d'-d'$ на кут θ' у напрямку обертання ротора (рис.10.1, праворуч).



Електромагнітний момент синхронної машини в режимі двигуна (а) та генератора (б)



Залежність $M = f(\theta)$ в режимі генератора та двигуна та їх векторні діаграми

Рис. 10.1- Перехід синхронного генератора в режим двигуна

Нагадаємо, що обертове магнітне поле синхронної машини визначається як результат взаємодії основного магнітного поля, створюваного обмоткою збудження, і магнітного поля якоря,

створюваного трифазною обмоткою статора при протіканні по ній струму навантаження. Обертаючий момент привідного двигуна генератора M'_l врівноважується сумою електромагнітного моменту генератора M' і моментом холостого ходу M_0 . На кутовій характеристиці цьому режиму генератора відповідає крапка Γ .

Якщо зменшити обертаючий момент M'_l , то навантаження генератора почне також зменшуватися; при цьому зменшується кут θ' , а, отже, і струм статора I_l . У результаті знизиться величина електромагнітного моменту M' і при обертаючому моменті $M'_l = M_0$ кут $\theta = 0$, тобто генератор буде працювати в режимі холостого ходу ($I_l = 0$) і ЕРС генератора E_0 виявиться в протифазі з напругою мережі U_m . Цьому режиму на кутовій характеристиці відповідає крапка перетинання осей координат (крапка 0 на рис. 10.1). Якщо ж вал синхронної машини від'єднати від приводного двигуна і створити на цьому валу гальмівний момент, тобто момент навантаження M_2 , спрямований зустрічно обертанню ротора, то відбудеться зсув вектора ЕРС E_0 на кут θ'' щодо його положення в режимі холостого ходу у бік відставання

(рис. 10.1, ліворуч). При цьому в колі обмотки статора з'явиться результуюча ЕРС $\Delta \dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{U}_m$, що створить в обмотці статора струм I_l , що відстає по фазі від ЕРС $\Delta \dot{E}$ на кут 90° . Як видно, цей струм відстає по фазі від напруги мережі $\dot{U}_m$ на кут φ_1 (у генераторному режимі струм I_l відстає по фазі від ЕРС $\dot{E}_0$ на кут ψ , а від напруги $\dot{U}_m$ на кут $180^\circ > \varphi_1 > 90^\circ$). Струм I_l створює магнітне поле, що обертається синхронно з ротором, вісь якого $d-d'$ зміщена відносно подовжньої осі $d-d$ на кут $-\theta''$. Припустимо, робота двигуна відбувається в режимі крапки D на

кутовій характеристиці (рис. 10.1, ліворуч), що відповідає куту - θ'' . Виникаючі при цьому тангенціальні складові сил магнітної взаємодії полюсів $F_1'' = F_1' \sin \theta''$ створюють на роторі двигуна електромагнітний момент M'' , спрямований згідно з обертовим магнітним полем, внаслідок чого ротор приводиться в обертання із синхронною n_1 частотою. При цьому синхронна машина буде споживати з мережі електричну енергію ($P_1 = 3U_m c I_1 \cos \varphi_1$) і перетворювати її в механічну енергію обертання. При цьому обертаючий електромагнітний момент M'' переборює момент холостого ходу M_0 і створює на валу двигуна корисний момент M_2'' , під дією якого приводиться в обертання виконавчий механізм.

Усі значення моменту на кутовій характеристиці синхронного двигуна відкладаються в від'ємному напрямку осі координат (M), тому що при переході синхронної машини з генераторного режиму в руховий електромагнітний момент змінює свій напрямок. При цьому потужність синхронного двигуна надходить з мережі в машину, а не з машини в мережу, як це відбувається в генераторному режимі. Оперувати з від'ємними значеннями потужностей і моментів незручно, тому при розгляді синхронних двигунів умовно будемо приймати моменти і потужності позитивними, пам'ятаючи при цьому викладене раніше про напрямок цих параметрів.

Електромагнітна потужність синхронного двигуна визначається виразом (9.12), а електромагнітний момент (9.14).

Кутова характеристика електромагнітного моменту синхронного двигуна $M = f(\theta)$ представлена на рис. 10.2 відрізняється від кутових характеристик синхронного генератора лише тим, що розташовується в третьому квадранті

осей координат, тобто визначаються від'ємними значеннями кутів і моментів при $\theta = 0^\circ + (-90^\circ)$.

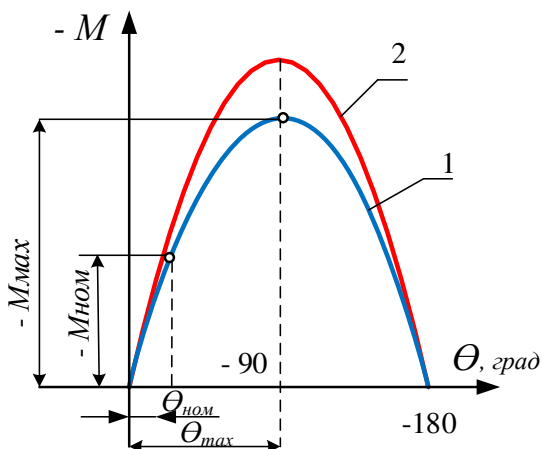


Рис. 10.2 - Кутові характеристики трифазного синхронного двигуна при: 1- нормальному збудженні; 2-перезбудженні

Перевантажувальна здатність синхронного двигуна оцінюється відношенням

$$\lambda = \frac{M_{max}}{M_{ном}} = \frac{1}{\sin \theta_{ном}}$$

що при куті $\theta_{ном} = (15 \div 30)^\circ$ складає відповідно $4 \div 2$.

Таким чином, у загальному виді кутова характеристика синхронної машини являє собою дві напівхвилі електромагнітного моменту M : позитивну, яка відповідає генераторному режиму роботи і негативну, яка відповідає режиму роботи двигуна (рис.10.1). Перехід синхронної машини з одного режиму роботи в інший відбувається при $\theta = 0$.

Як уже відзначалося, ротор синхронного двигуна може обертатися тільки із синхронною частотою $n_1 = 60f_1/p$, це є

характерною рисою цих двигунів і часто визначає область їхнього застосування (наприклад, для приводу пристроїв, що вимагають стабільної частоти обертання).

При змінах навантаження на валу синхронного двигуна змінюється кут θ . При цьому ротор, внаслідок інерції обертових частин електроприводу, не відразу займає положення, що відповідають новому навантаженню, а якийсь час здійснює *коливальні рухи*. Таким чином, у синхронному двигуні, так само як і в генераторі, мають місце коливання (хитання) ротора.

По своїй конструкції синхронні двигуни в принципі не відрізняються від синхронних генераторів, але все-таки мають деякі особливості. Їх виготовляють переважно явно-полюсними з $2p=6 \div 24$ полюсів; повітряний зазор роблять меншим, чим у генераторах такої ж потужності, що сприяє поліпшенню ряду параметрів двигуна, зокрема зменшенню пускового струму; демпферну (заспокійливу) обмотку виконують стрижнями більшого перетину, тому що при пуску двигуна вона є пусковою обмоткою (див. рис.8.4); ширина полюсного наконечника досягає $0,9\tau$ замість $0,7\tau$ у генераторах. Тому, незважаючи на властивість оборотності, синхронні машини, що випускаються промисловістю, мають звичайно цільове призначення - або це синхронні генератори, або синхронні двигуни.

§ 10.2 У-подібні характеристики синхронного двигуна

У процесі роботи синхронного двигуна в його обмотці якоря (статора) наводяться ЕРС, сума яких приблизно дорівнює підведених до обмотки статора напрузі мережі U_m . Ця сума ЕРС визначається результируючим магнітним полем, що викликається

дією двох магніторухливих сил: збудження $F_{зб} \equiv I_{зб}$ і статора $F_1 \equiv I_1$.

При незмінній напрузі мережі $\dot{U}_M \approx -\sum \dot{E} = const$ результуюче магнітне поле незмінне. Тому при зміні МРС збудження $F_{зб}$ (зміні струму збудження $I_{зб}$) МРС статора F_1 змінюється таким чином, щоб їхня спільна дія залишалася незмінною, тобто щоб залишалося незмінним результуюче магнітне поле синхронного двигуна. Ця зміна МРС F_1 може відбуватися тільки за рахунок зміни величини і фази струму статора.

У режимі ідеального холостого ходу при незначному струмі збудження ($I_{зб} \approx 0$) магнітне поле двигуна створюється тільки струмом статора I_{10} . Векторна діаграма синхронного двигуна в режимі холостого ходу при відсутності струму збудження (якщо зневажити активною складовою струму I_{10a} , що покриває втрати в сталі) представлена на рис.10.3, а. Як бачимо, у цьому випадку двигун споживає з мережі значний індуктивний струм. При збільшенні струму збудження $I_{зб}$ зростає МРС ротора, при цьому МРС статора зменшується, що приводить до зменшення індуктивної (стосовно напруги мережі $\dot{U}_M$) складової струму статора I_{10} (рис. 10.3, б). При цьому повний струм статора $I_1 = I_{10} + I_{зб}$ зменшується, а коефіцієнт потужності двигуна $\cos \varphi_1$ збільшується.

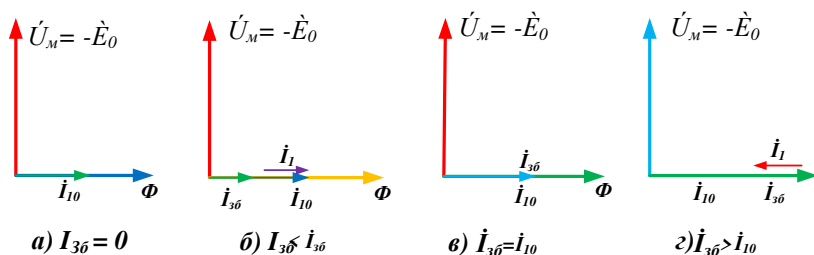


Рис. 10.3 – Векторні діаграми синхронного двигуна в режимі ідеального холостого ходу при різних значеннях струму збудження

При деякій значенні струму збудження $I_{зб}$, коли $I_{зб} = I_{10}$ струм статора $I_1 \approx 0$ (рис. 10.3, в); при цьому реальний двигун при холостому ході споживає з мережі тільки незначний активний струм, що йде на покриття втрат холостого ходу, а коефіцієнт потужності $\cos \varphi_1 = 1$. Такий струм збудження називають нормальним струмом збудження $I_{зб.норм}$.

При збільшенні струму $I_{зб} > I_{зб.норм}$ тобто при перезбудженні двигуна, струм $I_{зб}$ прагне створити магнітне поле більше магнітного потоку синхронного двигуна. Для збереження сталості магнітного потоку струм статора стає таким, що розмагнічує, тобто змінює напрям, випереджаючи напругу мережі $\dot{U}_m$ на 90° , тобто стає ємнісним.

Аналогічні процеси відбуваються при роботі синхронного двигуна під навантаженням. Обертове магнітне поле двигуна створюється результуючої МРС $\vec{F}_{рез}$, що складається з МРС збудження $\vec{F}_{зб}$ і статора $\vec{F}_1$. Векторні діаграми синхронного двигуна в режимі незмінного навантаження ($\theta = const$) при недозбудженні (а) і перезбудженні (б) приведені на рис. 10.4.

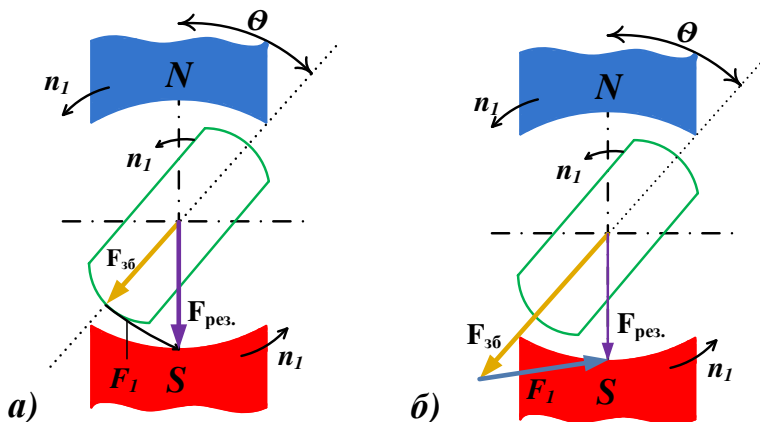


Рис.10.4 - MPC синхронного двигуна під навантаженням при недозбудженому роторі (а) і перезбудженому роторі(б)

Приведені векторні діаграми можна пояснити таким чином, при незмінній напрузі U_M , магнітний потік Φ двигуна також не змінюється, отже, величина струму, який намагнічує, що практично дорівнює струму холостого ходу I_{10} , також не змінюється.

Струм збудження I_{36} відстає на кут θ від струму I_{10} , однак величина його залежить від режиму збудження: при недозбудженні $I_{36} < I_{10}$, а при перезбудженні $I_{36} > I_{10}$. Струм статора навантаженого двигуна $I_1 = I_{10} - I_{36}$ при недозбудженні відстає від напруги $\dot{U}_M$, а при перезбудженні випереджає напругу $\dot{U}_M$.

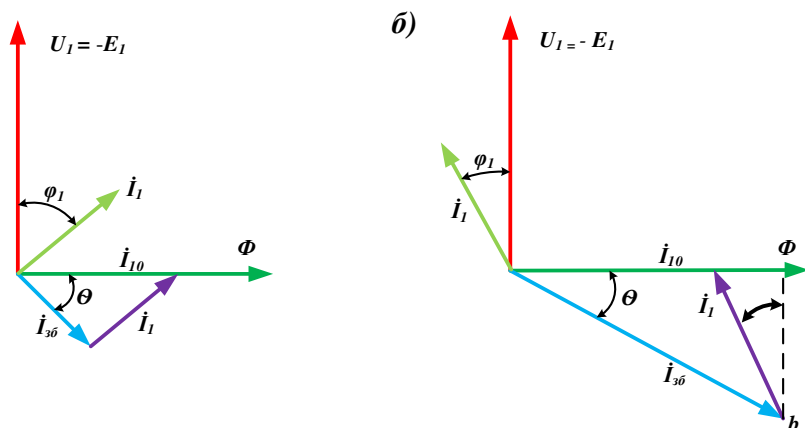


Рис. 10.5 – Векторна діаграма синхронного двигуна під навантаженням при недозбудженні (а) та перезбудженні (б)

Таким чином, при недозбудженні ($I_{зб} < I_{зб.норм}$) синхронний двигун працює з відстаючим струмом, а при перезбудженні ($I_{зб} > I_{зб.норм}$) з випереджальним.

Залежність струму статора від струму збудження для синхронного двигуна називають U-подібними характеристиками (рис. 10.6).

Струм збудження $I_{зб.норм}$ відповідає роботі синхронного двигуна при коефіцієнті потужності $\cos \varphi_1 = 1$; при цьому двигун споживає тільки активний струм. При зміні режиму збудження крім активної складової з мережі споживається також реактивна складова струму статора.

Таким чином, синхронний двигун є генератором реактивного струму: індуктивного стосовно напруги мережі при недозбудженні і ємнісного при перезбудженні.

Зазначена здатність синхронних двигунів є їхньою позитивною якістю, що використовують для підвищення коефіцієнта потужності електричних установок.

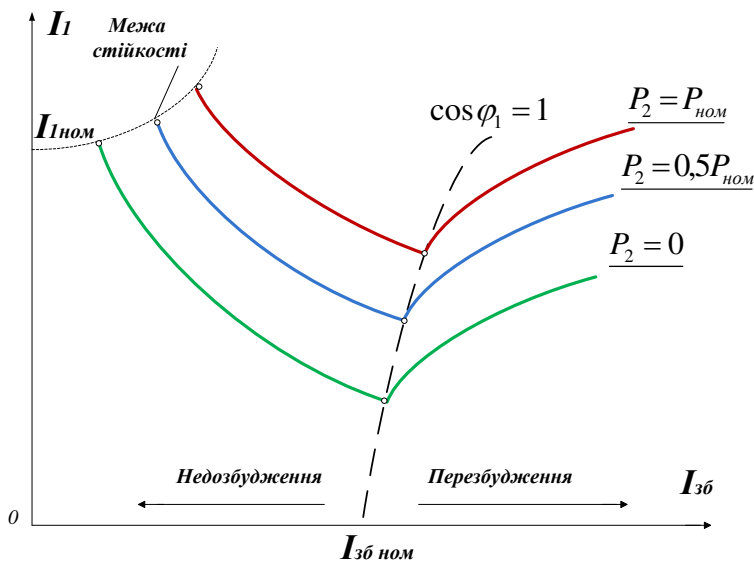


Рис. 10.6 – U-подібні характеристики синхронного двигуна

Асинхронні двигуни, що є найбільш розповсюдженими споживачами електроенергії, працюють з $\cos \varphi_1 < 1$, створюючи в мережах значні індуктивні струми. Якщо паралельно групі асинхронних двигунів ввімкнути один або кілька синхронних двигунів, що працюють з перезбудженням, то виникаюча в мережі ємнісна складова струму буде частково чи цілком компенсувати індуктивну складову струму, обумовлену роботою асинхронних двигунів. При цьому електрична система, розвантажена від реактивних струмів, буде працювати з $\cos \varphi_1 \approx 1$ що сприяє зменшенню втрат електроенергії. Необхідно, однак, відзначити, що при перезбудженні синхронний двигун споживає значний струм статора. Тому синхронні двигуни, призначені для роботи з перезбудженням, мають трохи більші габарити, а їхній ККД менше, ніж у двигунів, призначених для

роботи з $\cos\varphi_1 = 1$, коли струм статора і втрати двигуна мають мінімальні значення. Варто мати на увазі, що синхронний двигун має межу стійкості при незначному струмі збудження (штрихова лінія на рис.10.6). Синхронні двигуни звичайно експлуатують при перезбудженні з метою компенсації реактивної потужності паралельно ввімкнених з ними асинхронних двигунів (рис. 10.7).

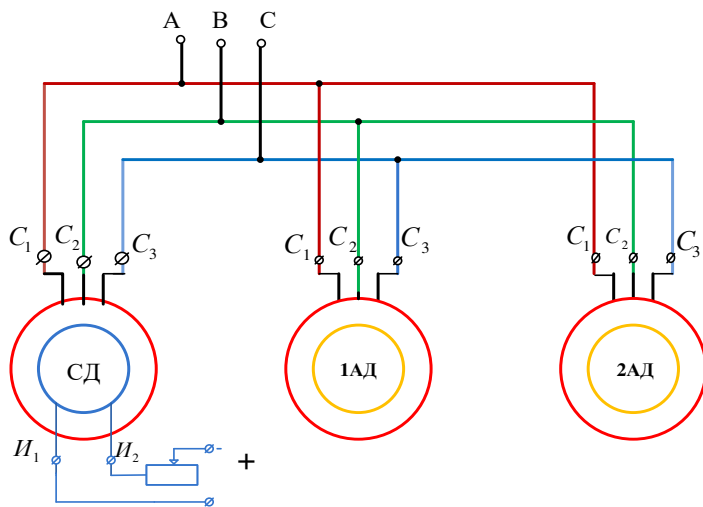


Рис. 10.7- *Схема ввімкнення трифазного синхронного двигуна для компенсації реактивної потужності асинхронних двигунів*

При цьому синхронні двигуни, що працюють з 50 %-вим навантаженням на валу, використовують при коефіцієнті потужності $\cos\varphi_1 = 0.7 \dots 1$, а при навантаженні 100 %-ному - при $\cos\varphi_1 = 0.9 \dots 1$ і зміщенні фаз $\varphi < 0$.

Орієнтовно повну потужність синхронної машини $S_{\text{синхр}}$, що віддає на вал корисну потужність P_2 і реактивну потужність Q у трифазну мережу, при визначеному ККД η , можна розрахувати за формулою (9.23)

$$S_{\text{синхр}} = \sqrt{\left(\frac{P_2}{\eta}\right)^2 + Q^2} \quad (9.23)$$

§ 10.3 Робочі характеристики синхронного двигуна

Робочі характеристики синхронного двигуна являють собою залежність частоти обертання ротора n , споживаної потужності P_1 корисного моменту M_2 , коефіцієнта потужності $\cos\varphi_1$ і струму в обмотці статора I_1 від корисної потужності двигуна P_2 за умови, що напруга живлення U_1 , частота f_1 і струм збудження I_{36} залишаються незмінними (рис. 10.8).

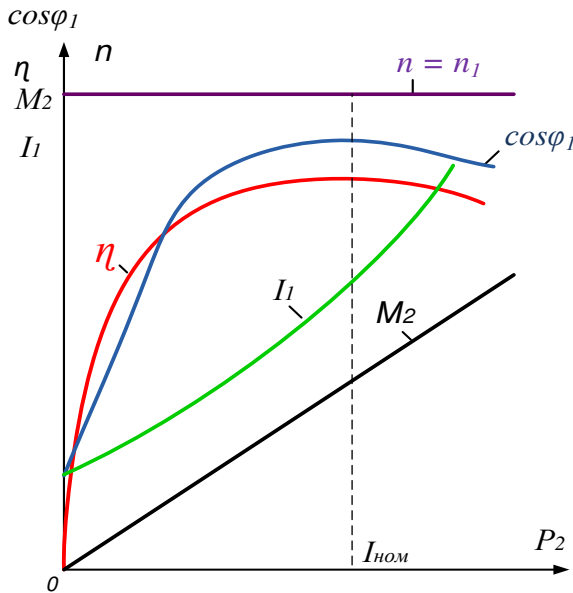


Рис. 10.8 – Робочі характеристики синхронного двигуна

Частота обертання ротора n завжди дорівнює синхронній частоті $n_1 = 60f_1/p$, тому графік $n = f(P_2)$ має вид прямої, що паралельна осі абсцис.

Корисний момент на валу синхронного двигуна $M_2 = f(P_2)$ має

графік вид прямої, що виходить з початку координат.

Потужність на вході двигуна $P_1 = P_2 + \sum p$. З ростом навантаження на валу двигуна збільшуються також і втрати $\sum p$, тому споживана потужність P_1 росте швидше корисної потужності P_2 і графік $P_1 = f(P_2)$ має трохи криволінійний вигляд.

Вигляд графіка $\cos\varphi_1 = f(P_2)$ залежить від виду настроювання струму збудження: якщо в режимі холостого ходу струм збудження встановлений таким, що $\cos\varphi_1 = 1$, то з ростом навантаження коефіцієнт потужності знижується, якщо ж установити $\cos\varphi_1 = 1$ при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун буде забирати з мережі реактивний випереджальний струм, а при перевантаженні - відстаючий. Звичайно встановлюють струм збудження таким, щоб $\cos\varphi_1 = 1$ при середньому навантаженні. У цьому випадку коефіцієнт потужності у всьому діапазоні навантажень залишається досить високим. Якщо ж встановити струм в обмотці збудження синхронного двигуна таким, щоб $\cos\varphi_1 = 1$ був при навантаженні, що трохи перевищує номінальне, то при номінальному навантаженні $\cos\varphi_1 \approx 0,8$ і двигун буде споживати з мережі випереджальний стосовно напруги мережі струм, що приведе до підвищення коефіцієнта потужності цієї мережі. У цьому відношенні синхронні двигуни вигідно відрізняються від асинхронних, які працюють з відстаючим по фазі струмом (особливо при недовантаженні двигуна) і знижують енергетичні показники живлючої мережі. Струм в обмотці статора двигуна становить

$$I_1 = P_1 / (m_1 U_1 \cos\varphi_1)$$

З цього виразу видно що струм I_1 зі збільшенням навантаження на валу двигуна росте швидше, ніж споживана потужність P_1 , внаслідок зменшення $\cos\varphi_1$.

Робочі характеристики синхронного двигуна на рис.10.8 наведені для умов зміни навантаження від холостого ходу ($P_2=0$) до номінального ($P_2=P_{2\text{ном}}$) і деякого перевантаження.

Такий їх вид зберігається до кінця перевантажувальної здатності, яка дорівнює

$$M_{\text{max}}/M_{\text{ном}} = 1/\sin\theta \cong 2\div 4$$

§ 10.4 Пуск і реверсування синхронного двигуна

Синхронний двигун не розвиває початковий пусковий момент. Якщо його підключити до мережі змінного струму, коли ротор нерухомий, а по обмотці збудження проходить постійний струм, то за один період зміни струму ($T = 0,02 \text{ с}$ при $f_1 = 50 \text{ Гц}$) електромагнітний момент буде двічі змінювати свій напрямок, тобто середній момент за період буде дорівнює нулю. При цих умовах двигун не зможе прийти в обертання, тому що його ротор, що володіє значною інерцією, не може протягом одного напівперіоду ($0,01 \text{ с}$) розігнатися до синхронної частоти. У результаті стійкий магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Таким чином, пуск синхронного двигуна безпосереднім ввімкненням у мережу неможливий. Для пуску синхронного двигуна застосовують спеціальні засоби, сутність яких складається в попередньому приведенні ротора в обертання до синхронної чи близької до неї частоти, при якій між статором і ротором установлюється стійкий магнітний зв'язок.

Асинхронний пуск синхронного двигуна. В даний час практичне застосування має спосіб пуску, який називають асинхронним. При цьому способі синхронні двигуни пускаються в хід як асинхронні, для чого застосовують спеціальні короткозамкнені

пускові обмотки, які виконані аналогічно обмоткам роторів асинхронних двигунів і укладені в полюсних наконечниках ротора (рис. 8.4). Схема ввімкнення двигуна при цьому способі пуску приведена на рис. 10.9. Незбуджений синхронний двигун включають у мережу.

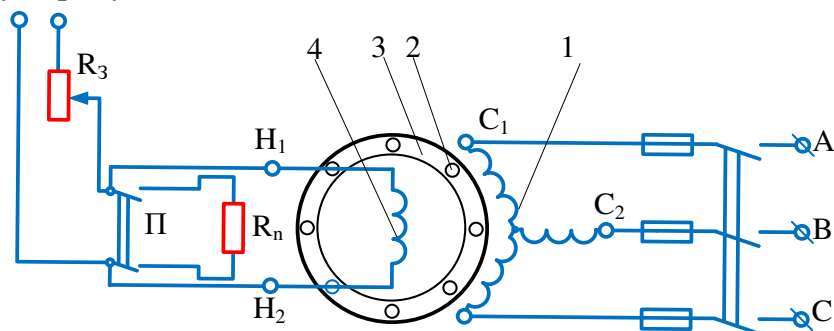


Рис. 10.9 – Електрична схема пуску синхронного двигуна:

1 – трифазна обмотка якоря; 2,3 –пускова обмотка ротора що включає стержні(2) і замикаючі кільця (3); 4 – обмотка ротора

Обертове магнітне поле статора, що виникає при цьому, наводить у стержнях пускової обмотки ЕРС, що створюють струми I_2 . Взаємодія цих струмів з полем статора викликає появу на стержнях пускової клітки електромагнітних сил F_m . Під дією цих сил ротор приводиться в обертання. Після розгону ротора до частоти обертання, близької до синхронної ($n \approx 0,95n_1$), обмотку збудження підключають до джерела постійного струму. Виникаючий при цьому синхронний момент втягує ротор двигуна в синхронізм. Після цього пускова обмотка двигуна виконує функцію заспокоюючої (демпферної) обмотки, обмежуючи хитання ротора.

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополосні двигуни малої потужності, що пускаються без навантаження на валу, іноді входять у синхронізм

лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без ввімкнення обмотки збудження.

Зі збільшенням навантажувального моменту на валу входження двигуна в синхронізм ускладнюється. Найбільший навантажувальний момент, при якому ротор синхронного двигуна ще втягується в синхронізм, називають моментом входу двигуна в синхронізм M_{ex} . Величина асинхронного моменту M_a при частоті обертання $n \approx 0,95n_1$ залежить від активного опору пускової клітки, тобто від перетину стержнів і питомого електричного опору матеріалу, з якого вони виготовлені.

В процесі асинхронного пуску обмотку збудження залишати розімкнутою не можна, тому що магнітний потік статора, що перетинає її в початковий період пуску із синхронною частотою, індукуює у ній ЕРС. Внаслідок великого числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає 3000 - 4000 В і більш, що становить небезпеку як для цілості самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Для запобігання цього обмотку збудження на період розгону ротора замикають на активний опір R_n , приблизно в десять разів більший опору обмотки збудження. Переключення затискачів H_1 та H_2 обмотки збудження з опору R_n на клеми збудника здійснюється за допомогою перемикача П (рис. 10.9).

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім ввімкненням у мережу на номінальну напругу застосовується при достатній потужності мережі, здатної витримати без помітного спадання напруги кидки пускового струму п'яти - чи навіть семиразового значення (у порівнянні з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі:

автотрансформаторний або реакторний, в окремих випадках використовують інші способи пуску.

Пуск у хід за допомогою допоміжного двигуна.

Синхронний двигун і синхронний компенсатор, що є власне кажучи синхронним двигуном, що працює без навантаження в перезбудженому режимі, можуть включатися в мережу за допомогою синхронізуючих пристроїв такими ж способами, як і синхронний генератор. Для цього машина повинна мати на одному валу спеціальний пусковий двигун, що міг би розігнати її до синхронної частоти, при якій можливо зробити синхронізацію машини з мережею. В якості допоміжного двигуна звичайно застосовується асинхронний двигун порівняно малої потужності на те ж число полюсів, що і синхронна машина. За допомогою цього двигуна синхронна машина приводиться в обертання майже із синхронною частотою, після чого здійснюється ввімкнення її на паралельну роботу з мережею методом самосинхронізації. Іноді для цієї мети застосовують асинхронний двигун, що має число полюсів на одну пару менше, ніж синхронна машина. Завдяки цьому двигун може розігнати синхронну машину до частоти навіть трохи вищою за синхронну частоту. Якщо після цього допоміжний двигун вимикається з мережі, то агрегат починає сповільнюватися, проходячи плавно через синхронну частоту, що дозволяє здійснити, в потрібний момент, ввімкнення синхронної машини в мережу.

Недоліком даного способу є неможливість пуску двигуна під навантаженням, тому що нераціонально мати пусковий двигун великої потужності, який робить установку дорожчою та складнішою.

Частотний пуск. При застосуванні частотного пуску синхронного двигуна частота живильної напруги плавно змінюється від $f_1 \approx 0$ до $f_1 \approx f_n$. При цьому ротор обертається синхронно з магнітним полем статора, частота обертання якого плавно підвищується від $n_1 \approx 0$ до $n_1 = 60f_1/p$. Недоліками частотного пуску є великі масогабаритні і вартісні показники джерела живлення — перетворювача частоти, а також необхідність реалізації складних законів регулювання вихідної напруги і частоти в процесі розгону двигуна. Частотний пуск синхронних двигунів застосовується в приводах спеціальних установок.

Так як ротор синхронного двигуна обертається в той же бік, що і магнітне поле статора, то напрямок обертання ротора визначається порядком чергування фаз лінійних проводів, підведених до виводів обмотки статора, і порядком розташування фаз обмотки статора. Для зміни напрямку обертання (реверсування) трифазного синхронного двигуна необхідно переключити два лінійних проводи, підведених з мережі до виводів обмотки статора.

§ 10.5 Переваги і недоліки синхронних двигунів

Синхронні двигуни мають наступні переваги:

- постійність частоти обертання незалежно від механічного навантаження на валу;
- менша, ніж в асинхронних двигунів, чутливість до коливань напруги, тому що їхній максимальний момент пропорційний напрузі в першому ступені, а не квадрату напруги, як в асинхронних;

- можливість роботи при $\cos\varphi_1 = 1$ мережі, а також до скорочення розмірів. Це призводить до поліпшення $\cos\varphi$ самого двигуна, тому що його струм менше струму асинхронного двигуна тієї ж потужності.

При роботі з випереджуючим струмом синхронні двигуни служать генераторами реактивної потужності, яка надходить в асинхронні двигуни, що знижує споживання цієї потужності від генераторів електростанцій.

Недоліками синхронних двигунів є:

- складність конструкції в порівнянні з асинхронними;
- порівняльна складність пуску в хід;
- труднощі з регулюванням частоти обертання, що можливо тільки шляхом зміни частоти живильної напруги.

Зазначені недоліки синхронних двигунів роблять їх менш вигідними, ніж асинхронні двигуни при обмежені потужності порядку до 100 кВт. Однак при більш високих потужностях, коли особливо важливо мати високий $\cos\varphi$, зменшені габаритні розміри машини, синхронні двигуни вигідніше асинхронних.

Контрольні запитання

1. Чому машина називається синхронною, як створюється в ній результуючий магнітний потік?
2. Які існують конструктивні типи синхронних машин і в чому їх відмінність?
3. Як змінюється реакція якоря синхронного генератора в залежності від характеру навантаження?
4. Чим визначається напруга синхронного генератора? Напишіть рівняння рівноваги генератора.

5. Поясніть вигляд зовнішніх характеристик синхронного генератора при різних навантаженнях; що таке зміна, його напруги?

6. Що таке кутова характеристика?

7. Як змінюється взаєморозміщення магнітних осей ротора і результуючого поля при роботі в режимі двигуна і генератора?

8. Як змінюється реактивна потужність синхронної машини при зміні струму збудження? Чому можна регулювати коефіцієнт потужності мережі?

9. Які існують способи запуску в хід синхронних двигунів?

Розділ 4 НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Частина 11 ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ І ККД ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ТРАНСФОРМАТОРІВ

§ 11.1 Класифікація втрат

Перетворення енергії в електричних машинах і трансформаторах супроводжується втратами значної її частини. Ці втрати енергії можна поділити на *основні і додаткові*.

Основні втрати в електричних машинах складаються з механічних втрат, магнітних втрат (у сталі) і втрат електричних (або, як їх ще називають) втрат у міді. В трансформаторах наявні лише два останні види втрат.

Додаткові втрати виникають як у сталевих, так і в мідних частинах машин і трансформаторів і викликані вторинними процесами електромагнітного характеру. До них відносяться втрати на вихрові струми від полів розсіювання, поверхневі втрати у сталі, пульсаційні втрати в зубцях тощо.

Всі виникаючі втрати перетворюються у теплоту і викликають нагрівання машин і трансформаторів.

Питання, що розглядаються у цій частині є загальними для всіх машин і трансформаторів з тією лише відмінністю, що в залежності від типу машини в ній можуть бути чи не бути ті чи інші види втрат.

Механічні втрати складаються з втрат у підшипниках p_{II} , втрат на тертя щіток об колектор або контактні кільця p_k та втрат на тертя об повітря, а також вентиляційні втрати $p_{в.н}$. Механічні втрати від навантаження машин не залежать, а залежать лише від частоти обертання. Вони визначаються за відповідними, відомими з механіки, формулами і складають близько 1% номінальної потужності машини. Таким чином

$$p_{mx} = p_{\Pi} + p_{\kappa} + p_{в.н} \quad (11.1)$$

Втрати в сталі включають в себе втрати на гістерезис і вихрові струми, викликані перемагнічуванням сталі осердя. Ці втрати в кожній частині машини, що має і масу G_c , при будь-яких частотах f і індукції B розраховують за формулою

$$p_c = p_{1/50} (f / 50)^8 B^2 G_c \quad (11.2)$$

де $p_{1/50}$ - питомі втрати для даної марки сталі при $B = 1 \text{ Тл}$ і $f = 50 \text{ Гц}$; $\beta \approx 1,5$ або трохи менше в залежності від марки сталі.

Електричні втрати складаються з втрат у міді

$$p_m = I^2 R \quad (11.3)$$

і перехідних втрат в контакті щіток

$$p_{щ} = \Delta U_{щ} I \quad (11.4)$$

де $\Delta U_{щ}$ - падіння напруги на щітковому контакті, який, згідно ГОСТ 2582-81, дорівнює $3 \div 2 \text{ В}$ відповідно для щіток без шунтів чи з шунтами.

Додаткові втрати практично не можуть бути розраховані через дуже складний характер їх виникнення. Тому для всіх електричних машин їх приймають згідно ГОСТ 11828-75, рівними $0,5\text{-}1\%$ номінальної потужності. При зміні навантаження можна вважати, що додаткові втрати змінюються пропорційно квадрату струму.

Повні втрати представляють собою суму всіх втрат

$$\sum p = p_{mx} + p_c + p_m + p_{щ} + p_{доd} \quad (11.5)$$

і їх можна розділити на три групи:

- втрати, що не залежать від струму, $p_0 = p_{mx} + p_c$,
- втрати, що залежать від струму, $p_{щ}$;
- втрати, що залежать від квадрату струму, $p_m + p_{доd}$.

Нехай $p_{щ,ном}$ - номінальне значення втрат, пропорційних

струмові, а $p_{м.ном}$ - номінальне значення втрат, пропорційних квадратові струму. Тоді

$$\sum p = p_0 + \frac{I}{I_{ном}} p_{щ.ном} + \left(\frac{I}{I_{ном}}\right)^2 p_{м.ном} = p_0 + k_n p_{щ.ном} + k_n^2 p_{м.ном} \quad (11.6)$$

де $k_n = I / I_{ном}$ - коефіцієнт навантаження.

Перехідні втрати в контакті щіток навіть у машин постійного струму відносно малі. Їх значення у високовольтних машин невеликої потужності складає звичайно частину відсотка, а у порівняно низьковольтних машин - $2 \div 5\%$ повних втрат. Ця обставина дозволяє знехтувати цим видом втрат. Тоді вираз (11.6) приймає вигляд

$$\sum p = p_0 + k_n^2 p_{м.ном} \quad (11.7)$$

§ 11.2 ККД і його визначення

ККД машини чи трансформатора представляє собою відношення корисної потужності P_2 до підведеної P_1 , його можна виразити у відносних одиницях $\eta = P_2 / P_1$ або у відсотках $\eta = (P_2 / P_1) \cdot 100$.

Сучасні електричні машини і трансформатор мають дуже високий ККД. У машин потужністю 50 кВт він складає $85 \div 90\%$, потужністю 200 кВт - $90 \div 92\%$, потужністю 400÷700 кВт - $93 \div 95\%$. Потужні трансформатори мають ще вищий ККД, що досягає $99 \div 99,5\%$.

Таким чином, різниця між значеннями P_2 і P_1 порівняно невелика, що накладає певні труднощі при дослідному чи аналітичному визначенні ККД. Тому для різноманітних умов зручніше визначити ККД за видозміненими формулами, маючи на увазі, що $P_1 = P_2 + \sum p$.

Для двигуна, у якого легко виміряти підведену електричну

потужність $P_1 = U_{\text{дв}} I$, ККД

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_1 - \Sigma p}{P_1} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_1} \quad (11.8)$$

Для генератора, що віддає потужність $P_2 = U_{\Gamma} I$, вираз (11.8) можна представити у вигляді

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \quad (11.9)$$

при цьому отримується більш правильний результат, бо значення втрат Σp складає лише незначну частину корисної потужності P_2 .

Корисна потужність генератора, що має номінальну потужність $P_{2\text{ном}} = U_{\Gamma} I_{\text{ном}}$, при довільно вибраному струмі I складає

$$P_2 = U_{\Gamma} I = U_{\Gamma} I_{\text{ном}} = k_n P_{2\text{ном}}$$

Вираз (11.9) з урахуванням (11.6) при цьому набуде вигляду

$$\eta_{\Gamma} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{k_n P_{2\text{ном}}}{k_n (P_{2\text{ном}} + p_{\text{щ.ном}}) + p_0 + k_n^2 p_{\text{м.ном}}} \quad (11.10)$$

З (11.10) слідує, що при холостому ході ($k_n=0$) ККД дорівнює нулеві, так як корисної потужності немає. Зі зростанням навантаження ККД швидко підвищується за рахунок збільшення корисної потужності $P_2 = k_n P_{2\text{ном}}$, але одночасно швидше, ніж P_2 зростають втрати, пропорційні квадратів струму, $k_n^2 p_{\text{м.ном}}$. Тому зростання ККД сповільнюється і після досягнення максимуму при деякому значенні k_n ККД поступово спадає. Залежність ККД від коефіцієнта навантаження показана

на рис. 11.1.

ККД досягає максимуму, коли втрати, що залежать від квадрату струму, дорівнюють втратам, що не залежать від струму.

При проектуванні машин або трансформаторів співвідношення їх втрат вибирають таким, щоб ККД був максимальним в межах навантажень, при яких машина чи трансформатор працює довший час.

Згідно ГОСТ 11828-75, втрати і ККД можна визначити двома методами.

Метод безпосереднього визначення, який полягає у вимірюванні потужностей P_2 і P_1 , наприклад для машин, що мають $\eta \leq 75\%$, оскільки похибки вимірювання можуть значно спотворити справжній результат через близькість значень P_2 і P_1 . Для трансформаторів через це такий метод визначення ККД взагалі неприйнятний.

Метод непрямого визначення полягає в тому, що за даними вимірювання окремих втрат розраховують повні втрати. Наприклад, при проведенні досліду холостого ходу вимірюють струм I_0 і напругу U ; тоді $P_0 = UI_0$. Інші втрати ($P_m, P_{sc}, P_{доо}$) визначають вираховуванням згідно відповідних формул.

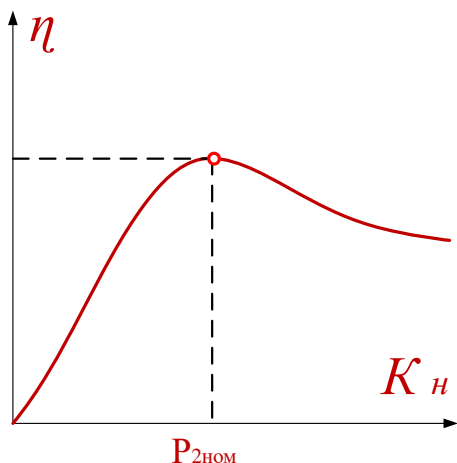


Рис. 11.1 – Залежність ККД від коефіцієнту навантаження

ККД трансформатора визначають за формулою (11.9), вважаючи, що

$$P_2 = U_{2ном} k_n I_{2ном} \cos \varphi_2 = k_n S_{ном} \cos \varphi_2 \quad (11.12)$$

$$\Sigma p = p_c + k_n^2 p_{м.ном} = P_0 + k_n P_k \quad (11.13)$$

де $S_{ном} = U_{2ном} I_{2ном}$ - номінальна потужність трансформатора, а P_0 і P_k - відповідно потужності холостого ходу і короткого замикання.

Контрольні запитання

1. Які існують види втрат енергії і як вони виникають?
2. Як можна класифікувати втрати в залежності від струму навантаження?
3. Що таке ККД і за якими формулами його варто визначати для двигуна, генератора і трансформатора?
4. Поясніть характер зміни залежності ККД від значення навантаження. За яких умов ККД максимальний?
5. Які існують методи визначення ККД?

Частина 12 **НАГРІВ І ОХОЛОДЖЕННЯ** **ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ТРАНСФОРМАТОРІВ**

§ 12.1 Перегрів і його визначення

В електричних машинах і трансформаторах в результаті виділення теплоти найбільше страждають ізоляційні матеріали. Однак висока температура впливає на працездатність і інших елементів; колектор може втратити циліндричну форму і може навіть статися виплавлення "півників", можуть вийти з ладу підшипники, статися термічне розширення і псування стержнів обмотки тощо.

Передача теплоти від більш нагрітих частин машин до менш нагрітих і у навколишнє середовище здійснюється шляхом теплопровідності, конвенції і випромінювання.

Температура тієї чи іншої частини машини залежить не тільки від режиму роботи, але й від температури навколишнього середовища і температури охолоджувальних агентів, якщо мова йде про спеціальні замкнені цикли охолодження. Тому на практиці оперують *температурою перегріву* τ частини машини над охолоджуючим середовищем. При цьому стандартом встановлена допустима гранична температура охолоджуючого середовища (найчастіше це оточуюче повітря) $\vartheta_0 = +40^\circ\text{C}$. Якщо машина працює в середовищі, де $\vartheta_0 > +40^\circ\text{C}$, то для уникнення небажаного перегріву її навантаження повинно бути зниженим.

Таким чином, абсолютна температура нагрітої машини

$$\vartheta_{\text{ГПР}} = \tau + \vartheta_0 \quad (12.1)$$

Температуру різних частин машин і трансформаторів можна визначити за допомогою термометра; методом опору, що полягає у зміні опору провідника при зміні температури та термоіндикаторами.

Термометром вимірюють температуру колектора;

термоіндикатори вмонтовують у заховані частини машини і використовують в основному з дослідницькою метою.

В умовах експлуатації найбільше застосування знайшов метод опору, недоліком якого є те, що він дозволяє визначити середню температуру обмотки чи провідника.

Згідно (12.1) перегрівання визначається

$$\tau = \vartheta_{\text{зар}} - \vartheta_0 = \frac{r_{\text{зар}} - r_{\text{хол}}}{r_{\text{хол}}} (230 + \vartheta_{\text{хол}}) + \vartheta_{\text{хол}} - \vartheta_0 \quad (12.2)$$

Якщо за опір обмотки в холодному стані приймати його значення приведенне до 20°C, то

$$\tau = 250 \frac{r_{\text{зар}} - r_{20}}{r_{20}} 20 - \vartheta_0 \quad (12.3)$$

§ 12.2 Нагрівання і охолодження твердого тіла

Як показує практика, нагрівання окремих частин електричних машин і трансформаторів добре узгоджується з теорією нагрівання твердого тіла, що володіє нескінченно великою теплопровідністю і рівномірно розсіює теплоту зі всієї поверхні. Дійсно частини машин монолітні, а матеріали, з яких вони зроблені (мідь і сталь), мають високу теплопровідність. Доволі монолітна і ізоляція сучасних машин і трансформаторів.

Нехай за одиницю часу в тілі виділяється Q одиниць теплоти. Тоді за нескінченно малий час dt виділяється теплота Qdt , а температура тіла підвищується на $d\tau$ градусів. Якщо маса тіла G , а питома теплоємність c (кількість теплоти, необхідна для нагрівання 1 кг речовини на 1°C), то тіло вбере $Gcd\tau$ одиниць теплоти.

Нехай за цей же час перевищення (перегрівання) температури тіла по відношенню до навколишнього середовища

дорівнює τ градусів. Значить з поверхні тіла, площею S при коефіцієнті тепловіддачі λ (кількість теплоти, що розсіюється з одиниці поверхні за 1с при підвищенні температури на 1°C) в навколишнє середовище буде розсіяно $S\lambda\tau dt$ теплової енергії. Тому диференціальне рівняння нагрівання тіла можна записати так:

$$Qdt - S\lambda\tau dt = Gcd\tau \quad (12.4)$$

З часом перегрівання τ підвищується, другий член у лівій частині рівняння зростає, тому його права частина зменшується. Процес нагрівання постійно сповільнюється і, нарешті, при деякому кінцевому нагріванні τ_k , вся теплота буде розсіюватися у навколишнє середовище, тобто підвищення температури закінчиться ($d\tau = 0$). В цьому випадку рівняння (12.4) матиме вигляд

$$Qdt - S\lambda\tau_k dt = 0 \quad \text{звідки:}$$

$$\tau_k = Q/(S\lambda) \quad (12.5)$$

З рівняння (12.5) випливає, що кінцевий перегрів тіла від його маси і теплоємності не залежить, а прямо пропорційний тепловому потокові Q , і обернено пропорційний площі поверхні тіла S і коефіцієнту тепловіддачі λ .

Розділивши (12.5) на $S\lambda$, отримаємо

$$\frac{Q}{S\lambda} dt - \tau dt = \frac{Gc}{S\lambda} d\tau \quad (12.6)$$

Виявляється, що множник $\frac{Gc}{S\lambda}$ у правій частині рівняння (12.6) має розмірність часу. Дійсно, якщо $S\lambda = Q/\tau_k$, то

$$T = Gc/(S\lambda) = Gc\tau_k / Q \quad (12.7)$$

Величини, що входять в (12.7) мають такі розмірності:

$$G - \text{кг}, \quad c - \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C} \cdot \text{кг}}, \quad \tau_k = ^\circ\text{C}, \quad Q - \text{Вт};$$

тому величина T вимірюється в секундах. Вона називається *постійною часу нагрівання*, і являє собою час, впродовж якого, тіло масою G і питомою теплоємністю c нагрівається до кінцевої температури τ_k , якщо в ньому виділяється тепловий потік Q і розсіювання теплоти не відбувається.

Оскільки маса G пропорційна кубові розмірів тіла, а площа, S - квадратові його розмірів, постійна T пропорційна лінійним розмірам тіла. Величина T характеризує *швидкість протікання теплових процесів*.

Остаточну температуру перегріву знаходимо як функцію часу t :

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-t/T}\right) + \tau_0 e^{-t/T} \quad (12.8)$$

де $e = 2.718$ - основа натуральних логарифмів.

Якщо в початковий момент часу ($t = 0$) тіло мало температуру навколишнього середовища, тобто ($\tau_0 = 0$), то

$$\tau = \tau_k \left(1 - e^{-t/T}\right)$$

У цьому вигляді рівняння для визначення перегрівання тіла представляє собою найбільший практичний інтерес. Крива 1, побудована за рівнянням (12.8), зображена на рис. 12.1. З рівняння (12.8) випливає, що $\tau = \tau_k$ при $t = \infty$, тобто тіло досягає встановленого перегріву через нескінченно довгий час.

Таким чином, можна вважати, що при $i = (4 \div 5)T$ тепловий процес встановився.

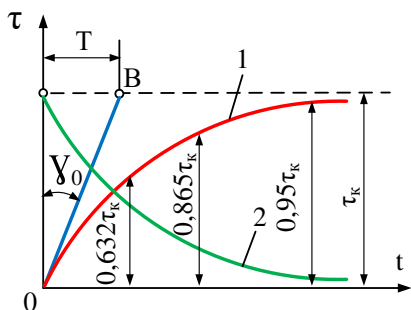


Рис. 12.1- Криві нагрівання (1) і охолодження (2) твердого тіла

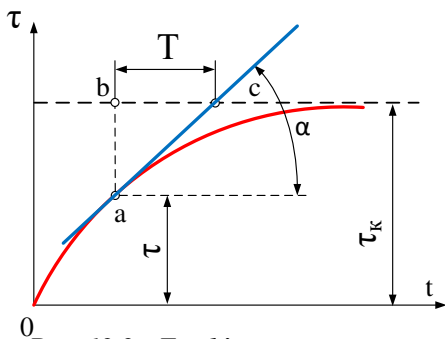


Рис. 12.2 - Графічне визначення сталої часу нагрівання

$$bc = \frac{ab}{\operatorname{tg} \alpha} = \frac{\tau_k - \tau}{d\tau / dt}$$

Інакше кажучи, постійна часу нагрівання T є піддотична, що відрізається дотичною на прямій кінцевого перевищення температури. Значить T можна визначити, провівши дотичну до кривої нагрівання через початок координат (рис. 12.1).

Якщо до тіла, що досягло перегріву τ_k потік тепла припинився ($Q = 0$), то починається процес охолодження, що може бути описаний, виходячи з таких уявлень. У початковий момент охолодження $\tau_{0ox} = \tau_k$ а в кінці охолодження температура, тіла досягне температури навколишнього середовища, тобто кінцеве перегрівання в процесі охолодження $\tau_{к.ох}$.

Рівняння охолодження тіла має вигляд

$$\tau = \tau_k e^{-t/T}$$

Крива 2, побудована за рівнянням показана на рис. 12.1. Як бачимо, вона представляє собою дзеркальне відображення кривої 1.

§ 12.3 Нагрівання машин при різних номінальних режимах роботи

Правильно вибраний тепловий режим навантаження електричної машини буде таким, коли її ізоляційні матеріали використовуються хоча і на межі, але без перевищення допустимих перегрівів, тобто коли кінцева температура нагрівання одночасно є і допустимою ($\tau = \tau_{\text{дон}}$).

На основі цих уявлень ГОСТ 183-74 встановлює три основних номінальних режими роботи електричної машини: довготривалий; короткочасний; повторно-короткочасний.

При *довготривалому режимі* роботи частини машини, яка працює як завгодно довго, досягають встановленої температури, що не перевищує заданої допустимої для даного класу ізоляції. Процес нагрівання описується рівнянням (12.8) і графічно зображується кривою I нарис. 12.1.

Короткочасним режимом називається режим, що включає в себе час роботи t_p і час паузи t_n . Час t_p вибирається з умови, що впродовж нього температура досягне допустимого, але не кінцевого значення, після чого настане пауза, в кінці якої температура машини буде дорівнювати температурі навколишнього середовища.

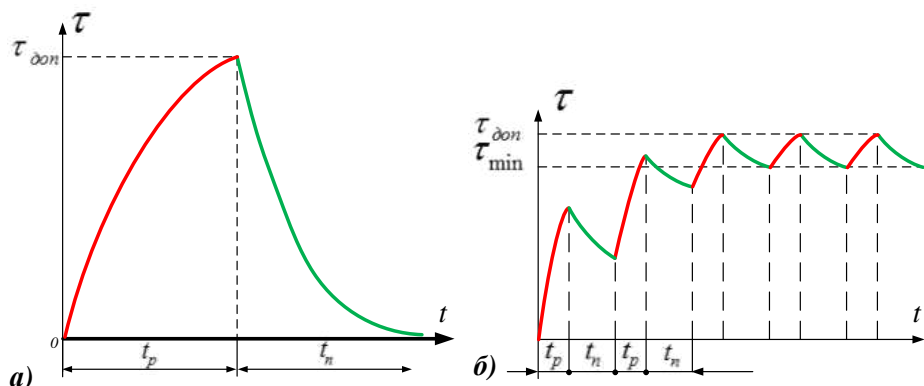


Рис. 12.3 - Криві нагрівання при короткочасному (а) і повторно-короткочасному (б) режимах роботи електричної машини

Відповідний графік теплового процесу зображено на рис. 12.3, а. При навантаженні машини, що відповідає короткочасному режиму, $\tau_{кр} = \tau_{дон} < \tau_k$, тобто при заданих розмірах потужність машини в короткочасному режимі більша, ніж в довготривалому. Якщо б по закінченні часу t_p машина продовжувала б працювати, то її кінцеве перегрівання перевищувало б допустиме ($\tau_k > \tau_{дон}$), що сприяло б прискореному старінню ізоляції і її псуванню. ГОСТ 2582-81 встановлює термін робочого часу $t_p = 15; 30; 40; 60$ хв (часовий режим) і 90 хв.

Повторно-короткочасний режим характеризується наявністю циклів, що складаються з робочого часу t_p і паузи t_n . Співвідношення між ними вибирають так, щоб за час роботи перегрів не перевищив допустимого, а за час паузи температура трохи знизилася, але не до температури навколишнього середовища. Режим характеризується відносною тривалістю ввімкнення (%);

$$TB = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100$$

Графік теплового процесу у цьому режимі зображений на рис. 12.3,б. Почавши роботу при $\tau_0 = 0$, машина поступово нагрівається поки не досягне деякого встановленого режиму, що характеризується зигзагоподібною кривою. При цьому температура машини коливається між максимальним значенням $\tau_{\max} = \tau_{\text{доп}}$ і мінімальним $\tau_{\min}$.

Тривалість робочого циклу $t_p + t_n \leq 10$ хв, в іншому випадку двигун вибирають, як при довготривалому режимі. Згідно ГОСТ 2582-81 значення TB складають 15, 25, 40, 50 і 60%.

Очевидно, в повторно-короткочасному режимі потужність машини буде меншою, ніж в короткочасному, але більшою, ніж в довготривалому.

§ 12.4 Охолодження машин і трансформаторів

Велике навантаження сучасних машин вимагає застосування інтенсивних охолоджуючих систем. У переважній більшості машини охолоджують атмосферним повітрям, і тільки в потужних синхронних генераторах в якості охолоджуючого агента використовують водень і навіть воду.

Ведуться роботи по створенню великих електричних машин із застосуванням рідкого гелію. В цих машинах використовується явище надпровідності, тобто властивість провідника втрачати опір при температурах, що близькі до абсолютного нуля (-273°C).

Такі машини отримали назву *криогенних*, від грецького слова "кріос", що значить холод. Зниження втрат у криогенних машинах дозволяє істотно підвищити їх ККД і зменшити

розміри, створюючи машини дуже значної одиничної потужності.

Необхідним елементом кріогенної машини є кріостат, тобто ізольований від зовнішнього середовища резервуар, заповнений рідким гелієм. Всередині кріостату розміщують охолоджувану обмотку або навіть повністю всю машину.

Силові трансформатори, як правило, мають масляне охолодження. Масло циркулює в резервуарі або охолоджувачах або у випадку інтенсивного охолодження, в спеціальних радіаторах, які піддаються обдуванню. Але існують також силові трансформатори із повітряним або газовим охолодженням. Тут охолоджуючим газом є шестифториста сірка (SF_6), коефіцієнт теплопередачі якої у 2.18 рази більший, ніж у повітрі.

За способом охолодження машини поділяються на декілька, груп. Машини дуже малої потужності мають *звичайне* охолодження. Машини з внутрішньою само вентиляцією охолоджується за допомогою *вмонтованих вентиляторів*, які насаджені на вал і обертаються разом з ротором машини. Існує і *зовнішня* самовентиляція, коли зовнішня поверхня обдувається за допомогою насадженого на виведений кінець валу вентилятора, а внутрішні частини машини закриті для доступу зовнішнього повітря.

Потужні машини мають *незалежне* або *примусове* охолодження. Повітря при цьому подається всередину машини спеціальним вентилятором, що має незалежний привід. Незалежна вентиляція може бути *протяжною* або *замкнутою*. В останньому випадку значно простіше попередити забруднення машини пилом, що завжди є в повітрі.

В машинах постійного струму повітря, як правило, подається зі сторони колектора. При цьому досягається найкращий ефект охолодження такого відповідального вузла, як колектор. Щітковий пил, наявність якого сприяє виникненню колового вогню, також найкраще видаляється при подачі

повітря в першу чергу на колектор.

Витрати охолоджуючого середовища, необхідного для відведення тепла з машини або трансформатора, знаходять по формулі

$$Q = \frac{\Sigma p}{c(\vartheta_{\text{гар}} - \vartheta_0)}$$

де c - теплоємність охолоджуючого середовища;

$\vartheta_{\text{гар}}$ - температура нагрітого охолоджуючого середовища, що виходить, з машини.

Для повітря $c = 1100 \frac{\text{Вт} \cdot \text{с}}{^\circ\text{C} \cdot \text{м}^3}$; в залежності системи вентиляції, конструкції машини і її потужності $(\vartheta_{\text{гар}} - \vartheta_0) = 15 \div 25^\circ\text{C}$. Отже, на 1000 Вт втрат необхідна кількість повітря

$$Q = \frac{1000}{1100(15 \div 25)} = 0.036 \div 0.06 \text{ м}^3/\text{с}$$

Контрольні запитання

1. Що таке перегрів і які існують способи його визначення?
2. Чим визначається кінцевий перегрів частини машини?
3. Що таке стала часу перегрівання, що вона характеризує і чим визначається? Через скільки сталих часу можна, вважати тепловий процес встановленим?
4. Які існують основні номінальні режими роботи, чим вони відрізняються за допустимим навантаженням від електричних машин?
5. Як охолоджують електричні машини і трансформатори?

Перелік використаних джерел

1. Безрученко В.Н. , Хотян А.С. Электрические машины. – Киев: Высш. шк., 1979. – 192с.
2. Вольдек А.И. Электрические машины. Л.: Энергия, 1979. – 839 с.
3. Л.В. Дубинець, О.І. Момот, О.Л. Маренич. Електричні машини.– Д.: видавництво ДНУЗТ ім. акад..В. Лазаряна, 2004. – 208 с.
4. Загірняк М.В., Невзлін Б.І. Електричні машини. – К: Знання, 2009. – 399с.
5. Кацман М.М. Электрические машины. - М.: Высш. шк., 1990. – 463с.

Зміст

ВСТУП	5
В. 1 Історія розвитку та роль електричних машин	5
В. 2 Класифікація електричних машин	9
В. 3 Номінальні дані електричних машин	12
В. 4 Вимоги, що висуваються до електричних машин	14
 Розділ 1 МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
 Частина 1 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ МПС	
§ 1.1 Області застосування машин постійного струму	15
§ 1.2 Принцип дії машини постійного струму	16
§ 1.3 Будова машин постійного струму	22
§ 1.4 Якірні обмотки машин постійного струму	32
§ 1.5 Вибір типу обмотки якоря	41
§ 1.6 Магнітне коло машини постійного струму	42
§ 1.7 Магнітна характеристика і коефіцієнт насичення	45
§ 1.8 Реакція якоря машин постійного струму	47
§ 1.9 Комутація машин постійного струму	53
§ 1.10 Шкала іскріння та негативні наслідки комутації	66
 Частина 2 ГЕНЕРАТОРИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
§ 2.1 Способи збудження електричних машин постійного струму	71
§ 2.2 Особливості роботи генератора з незалежним збудженням	77
§ 2.3 ГПС з паралельним збудженням	80
§ 2.4 Генератори послідовного збудження	84
§ 2.5 Генератор змішаного збудження	85
§ 2.6 Робота генераторів на загальну мережу	87
 Частина 3 ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	
§ 3.1 Основні рівняння та характеристики	90
§ 3.2 Запуск двигунів в хід	95
§ 3.3 Двигун паралельного збудження	98
§ 3.4 Двигун незалежного збудження	102

§ 3.5 Двигун послідовного збудження	103
§ 3.6 Двигун змішаного збудження	108
§ 3.7 Регулювання частоти обертання ДПС	110
§ 3.8 Електричне гальмування двигунів постійного струму	113
§ 3.9 Втрати потужності в електричних машинах	116

Розділ 2 ТРАНСФОРМАТОРИ

Частина 4 РОБОЧИЙ ПРОЦЕС ТРАНСФОРМАТОРА

§ 4.1 Призначення області використання трансформаторів	120
§ 4.2 Принцип дії трансформатора	121
§ 4.3 Будова трансформаторів	124
§ 4.4 Рівняння ЕРС трансформатора	128
§ 4.5 Рівняння МРС трансформатора	131
§ 4.6 Приведений трансформатор	133
§ 4.7 Схема заміщення приведенного трансформатора	136
§ 4.8 Режим холостого ходу трансформатора	138
§ 4.9 Режим короткого замикання трансформатора	140
§ 4.10 Режим навантаження трансформатора	143
§ 4.11 Зміна напруги і зовнішня характеристика трансформатора	147

Частина 5 ТРИФАЗНІ І СПЕЦІАЛЬНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

§ 5.1 Призначення і принцип виконання трифазного трансформатора	150
§ 5.2 Групи з'єднань трифазних трансформаторів	153
§ 5.3 Паралельна робота трансформаторів	155
§ 5.4 Автотрансформатор	158
§ 5.5 Зварювальний трансформатор	161
§ 5.6 Вимірювальні трансформатори	162

Розділ 3 МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 6 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ МАШИН ЗМІННОГО СТРУМУ

§ 6.1 Принцип виконання обмоток статора	166
§ 6.2 Створення магнітного поля, що обертається	172

Частина 7 АСИНХРОННІ МАШИНИ

§ 7.1 Будова асинхронних машин	177
§ 7.2 Принцип дії асинхронного двигуна. Ковзання	180
§ 7.3 Режими роботи асинхронних машин	183
§ 7.4 Основні рівняння заміщення асинхронного двигуна	185
§ 7.5 Робочий процес і енергетична діаграма асинхронного двигуна	188
§ 7.6 Обертальний момент асинхронного двигуна	191
§ 7.7 Механічна характеристика асинхронної машини	193
§ 7.8 Запуск в хід асинхронних двигунів	196
§ 7.9 Робочі характеристики асинхронного двигуна	200
§ 7.10 Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів	203
§ 7.11 Короткозамкнені асинхронні двигуни з підвищеним пусковим моментом	206
§ 7.12 Однофазні асинхронні двигуни	210
§ 7.13 Конденсаторні асинхронні двигуни	212
§ 7.14 Основні типи асинхронних двигунів, що випускаються серійно	214

Частина 8 ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ СИНХРОННИХ МАШИН

§ 8.1 Основні визначення і поняття	222
§ 8.2 Типи синхронних машин та їх конструкція	224

Частина 9 ТРИФАЗНІ СИНХРОННІ ГЕНЕРАТОРИ

§ 9.1 Принцип дії синхронного генератора	230
§ 9.2 Реакція якоря синхронного генератора	233
§ 9.3 Векторні діаграми і характеристики трифазного синхронного генератора	239
§ 9.4 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора	246
§ 9.5 Втрати і коефіцієнт корисної дії синхронних генераторів	249
§ 9.6 Особливості роботи генератора на мережу	252
§ 9.7 Умови включення генератора на паралельну роботу з мережею	252

§ 9.8 Регулювання активної потужності	256
§ 9.9 Регулювання реактивної потужності	259

Частина 10 СИНХРОННІ ДВИГУНИ

§ 10.1 Принцип дії синхронного двигуна	262
§ 10.2 U-подібні характеристики синхронного двигуна	268
§ 10.3 Робочі характеристики синхронного двигуна	274
§ 10.4 Пуск і реверсування синхронного двигуна	276
§ 10.5 Переваги і недоліки синхронних двигунів	281

Розділ 4 НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ

Частина 11 ВТРАТИ ЕНЕРГІЇ І ККД ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ТРАНСФОРМАТОРІВ

§ 11.1 Класифікація втрат	283
§ 11.2 ККД і його визначення	285

Частина 12 НАГРІВ І ОХОЛОДЖЕННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН І ТРАНСФОРМАТОРІВ

§ 12.1 Перегрів і його визначення	289
§ 12.2 Нагрівання і охолодження твердого тіла	291
§ 12.3 Нагрівання машин при різних номінальних режимах роботи	294
§ 12.4 Охолодження машин і трансформаторів	296
Перелік використаних джерел	300

Для нотаток