

В.М.Безрученко

Електричні машини

(конспект лекцій для студентів ІІІ-курсу)

Дніпропетровськ 2006р.

Історія розвитку і роль електричних машин в електрифікації народного господарства.

Без використання електричної енергії неможливо уявити собі ні одну галузь народного господарства. Тому, що цей вид енергії, як ні один інший, легко виробляти, транспортувати, передавати на значні відстані та перетворювати в інші види енергії.

Величезну роль у справі побудови комуністичного суспільства віддав електричній енергії В.І.Ленін, що висунув геніальну формулу: *"Комунізм - це Радянська влада плюс електрифікація всієї країни"*.

В здійсненні ленінських ідей про електрифікацію народного господарства значне місце належить електричним машинам як перетворювачам електричної і механічної енергії. Електричні машини використовують в металургії і медицині, в космосі і сільському господарстві, на морському флоті і залізничному транспорті. Вивчення електричних машин входить в програму підготовки практично кожного спеціаліста народного господарства.

Початок історії розвитку електричних машин, а з нею і початок використання їх на транспорті відноситься до 1834 р, коли російським академіком Б. С. Якобі. був створений перший у світі електродвигун постійного струму з якорем, котрий обертається. Двигун живився від гальванічних елементів. Двигун Б. С. Якобі був встановлений на катері, який з 16 пасажирами на борту міг пересуватися по Неві не тільки за течією, але й проти неї. В основу роботи електричного двигуна Б. С. Якобі поклав закон електромагнітної індукції, відкритий у 1831 році англійським фізиком М.Фарадеєм.

Перший час як російські, так і іноземні вчені та інженери працювали над вдосконаленням машин постійного струму, які до кінця 80-х років минулого століття прийняли сучасний вигляд.

У 1883-1889 рр. російський інженер М. О. Доліво-Добровольський розробив систему трифазного струму, винайшов трифазний генератор і асинхронний двигун трифазного струму, а також здійснив передачу енергії трифазного струму на відстань. Праці М. О. Доліво-Добровольського і сербського фізика Н. Тесла стали поштовхом до розвитку електричних машин змінного струму.

Електроенергія, котру споживають електродвигуни на електростанціях, виробляється за допомогою електричних машин великої потужності - генераторів. Для передачі її на відстань служать статичні електромагнітні апарати - трансформатори, які перетворюють електричну енергію змінного струму однієї напруги в таку саму енергію іншої напруги. Трансформатори створили в 1876-1882-рр. російські винахідники П.Н.Яблочков та І. Ф. Усагін. У 1890-1891 рр. М.О.Доліво-Добровольський запропонував конструкцію трифазного трансформатора, яка принципово збереглася до наших днів.

Трансформатори не мають рухомих частин і не є машинами, але їх вивчають разом з електричними машинами тому, що в основу теорії трансформаторів та електричних машин закладені одні й ті ж самі закони, а в їх конструкціях і застосовуються одні, й ті ж самі матеріали.

Перші дослідження по застосуванню електричних машин на залізничному транспорті були проведені у 1876 році російським інженером Ф.А.Піроцьким, котрий використав рейки для передачі електричної енергії і тим: самим здійснив контактне живлення електричного рухомого складу.

У 1903 році російськими інженерами І. Н. Кузнецовим та В. І. Одинцовим були розроблені проекти перших тепловозів з електричною передачею. Але в умовах загальної економічної і технічної відсталості царської Росії зусилля вчених довести потрібність та ефективність нового виду тяги, добитися створення і застосування нових типів локомотивів виявились безрезультатними.

Початок, бурхливому розвитку електроенергетики і електромашинобудування у нашій країні поклав розроблений Леніним у 1920 р. план ТОКРЛО" (Державної електрифікації Росії), цей план, названий автором: "другою програмою партії", передбачав будівництво протягом 10-15 років електростанцій загальною потужністю 1700 тис. кВт. Цей план був виконаний достроково до січня 1931 року.

Електромашинобудування розвивається у тісному зв'язку з електроенергетикою, динаміка росту якої характеризується даними з табл. В.1.

Роки	1950	1965	1970	1975	1980	1985	1990 (план)
Виробництво електричної енергії млрд.	91	507	740,4	1038	1295	1545	1860

XVІІ з'їзд КГХРС поставив задачу довести виробництво електричної енергії у 1990 році до 1840-млрд. кВт/год. Відповідаючі грандіозні задачі були поставлені перед радянськими електроманшнами – і транспортоформуванням: вітчизняні заводи повинні випускати генератори потужністю 1200-1500 МВА. Потрібно налагодити виробництво електричних машин та іншого обладнання з використанням

напівпровідності на основі криогенної техніки, ввести в дію електростанції з магнітогідродинамічними генераторами. Поставлена задача збільшити випуск турбогенераторів єдиної уніфікованої серії потужністю до 800 тис. кВт, турбогенераторів потужністю до 1 млн. кВт для: атомних електростанцій, а також нової серії електродвигунів змінного струму, потужністю до 400 кВт.

Значний внесок в розвиток, теорії електромагнітних явищ, що проходять в електричних машинах внесли радянські вчені Б.А.Введенський, В.К.Ардєєв, Н.С.Акулов, В.Ф.Миткевич, К.А.Круг та ін.. Теорії проектування сучасних електричних машин присвячені праці К.І.Шенфера, М.П.Костенко, А.С.Алексєєва, В.А.Толвинського, Л.М.Піотровського та ін..

Різноманітні типи електричних машин, які називають *тяговими*, застосовують на магістральних і промислових електровозах та тепловозах.

Успішне вирішення задач, поставлених XXVII з'їздом: КПРС, у значній мірі залежить від рівня підготовки працівників, пов'язаних з експлуатацією тепловозів та електровозів промислового залізничного транспорту, Перш за все спеціалістів середньої кваліфікації - техніків, котрі досконало володіють своєю спеціальністю.

В.2. Перетворення енергії в електричних машинах. Найпростіший генератор змінного струму.

Електричне перетворення енергії - одне з найдивовижніших явищ оточуючого нас світу - ґрунтується на використанні закону електромагнітної індукції згідно з якою при переміщенні зі швидкістю провідника довжиною l магнітному полі з індукцією B в провіднику наводиться ЕРС

$$e = Blv \quad (B.1)$$

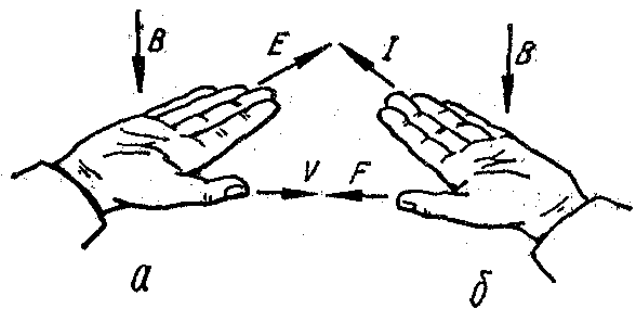
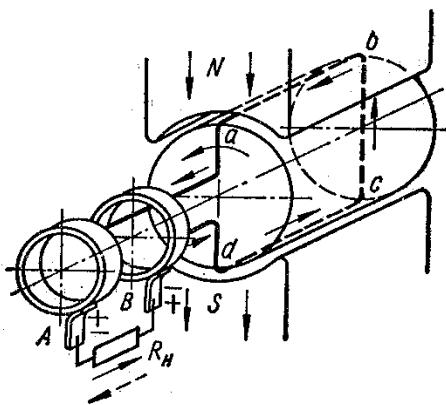
Цей вираз встановлений М.Фарадеєм був перетворений Д.К.Максвелом і для витка, зчепленого з магнітним потоком: Φ , приведений до такого вигляду в диференціальній формі:

$$e = -d\Phi / dt \quad (B.2)$$

Використовуючи вирази (B.1) та (B.2) розглянемо роботу найпростішого генератора змінного струму (рис. B.1), котрий складається з циліндричного каркасу з витком. $abcd$ на ньому, поміщеного в магнітне поле, створене полюсами магніту N та S . Кожна зі сторін витка (ab та cd) з'єднана зі своїм кільцем. До кілець пристають щітки A та B , за допомогою котрих виток електрично з'єднується з зовнішнім кодом, що має опір R_i , у цього найпростішого електричного генератора є всі найважливіші елементи реальної електричної машини.

Домовимося називати лінію, яка проходить через центр ордината по середній між полюсами магніту, *лінією геометричної нейтралі*, а частину кола, що відноситься до одного полюса, - *полюсним поділом* τ .

Рис.В.1. Найпростіший генератор змінного струму
Рис.В.2.Правила правої (а) і лівої (б) рук



Приведемо циліндр з витком: в рух. Напрямок ЕРС визначиться при ньому за правилом правої руки: розмістимо долоню так, щоб в неї входили лінії магнітної індукції; відведений великий палець направимо за рухом: провідника; тоді решта пальців руки покаже напрям ЕРС одного напрямку, а коли під полюсом: I - іншого напрямку.

Отже, в провіднику ab і в витку $abcd$ в цілому наводиться змінна за часом ЕРС, період якої дорівнює T . Число періодів, які виникають за 1 сек, називають частотою f отже $f = 1/T$.

Якщо в машині є p пар полюсів, а частота обертів витка дорівнює n , та за один оберт в ньому буде p періодів частота, що наводиться ЕРС:

$$f = pn \quad (B.3)$$

Коли кільця замкнуті через щітки А і В на зовнішнє коло, по ньому тече струм, що має таку саму частоту f .

Найпростіший генератор змінного струму, що перетворює механічну енергію в електричну (див. Рис В.1) складається з двох основних частин і нерухомої, що називається ротором. Та частина машини, котра створює магнітне поле, називається індуктором, а інша частина, в якій наводиться ЕРС і здійснюється перетворення енергії, - якорем.

В.3. Випрямлення змінного струму в постійний за допомогою колектора. Найпростіший генератор постійного струму.

Щоб примусити отриманий змінний струм протікати по зовнішньому колу в одному напрямі, замінимо кільця генератора на рис. В.1 на ізольовані одне від одного напівкільця (рис. В.3). Такий випрямний пристрій називається колектором, а напівкільця: - його пластинками.

Щітки А і В розмістимо так, щоб вони переходили з одної пластини на іншу, тоді, коли виток $abcd$ знаходиться на лінії геометричної нейтралі, тобто, коли ЕРС у витку дорівнює нулю.

Тепер кожна зі щіток буде дотикатися тільки до тої пластини і провідника, який міститься під далим: полюсом: (щітка А - з провідником, що знаходиться під полюсом М, а щітка В - під полюсом: 8). Отже, в зовнішньому колі, струм: буде текти завжди.» одному напрямку - від щітки А до В - і мати вигляд, що показаний на рис. В.4. Здійснилося випрямлення наведеної у витку змінної ЕРС і струму в ЕРС і струм *одного напрямку у зовнішньому колі.*

Перетворивши змінний струм в постійний за допомогою колектора ми отримаємо *генератор постійного струму*, в якорі якого так само як і в генераторі змінного струму, тече змінний струм.

Колектор є складним пристроєм, а ковзний контакт щітка – колектор, як буде вказано далі, в багатьох випадках ускладнює роботу машини. Тому виникає запитання: чи неможна створити електричний генератор, в якорі якого зразу наводилась би постійна ЕРС? Але якщо ми хочемо отримати постійну ЕРС, тобто мати постійну ліву частину у виразі (В.2), то, отже, повинна бути постійною і його права частина. Однак Знаменником у правій частині виразу (В.2) є час, котрий незворотній і має один вимір. Значить, для того, щоб права частина була постійною, необхідно безперервно, безмежно збільшувати магнітний потік, що, звичайно, неможливо. Таким чином, електрична машина може бути створена на основі закону електромагнітної індукції лиш у тому випадку, якщо у її якорі наводиться змінна ЕРС.

В.4. Зворотність електричних машин. Основні положення енергоперетворення.

Згідно закону Біо-Савара, на провідник зі струмом I , що рухається в магнітному полі діє сила

$$F = BIl \quad (В.4)$$

Напрямок якого визначається за *правилом лівої руки* (рис.В.2.б). Через те, якщо до щіток машини змінного струму (див.рис.В.2) підвести змінний струм, то виникає сила, котра змушує провідники ab і cd рухатися в магнітному полі, і виток $abcd$ починає обертатися. Необхідно тільки, щоб частота f струму відповідала в період запуску частоті обертання n (вираз (В.3)). Аналогічне вище буде мати місце, якщо до щіток машини постійного струму (див. рис. В.3) підвести постійний струм. Колектор в цьому випадку буде грати роль *інвертора*, перетворюючи підведений постійний струм в змінний в середині якоря. Таким чином, ми отримаємо *електричний двигун*, який на відміну від генератора, перетворює електричну енергію в механічну.

За законом: Ленца, індукований струм завжди має такий напрям, при якому виникаюча електромагнітна сила прагне перешкодити тій зміні (руху), завдяки якій індукується струм.

На основі згаданих вище законів і принципу роботи найпростіших електричних машин можемо сформулювати такі основні закони енергоперетворення:

- 1) безпосереднє взаємозворотне перетворення механічної та електричної енергії в індуктивних електричних машинах можливо лише згоді, коли остання є енергією змінного струму;
- 2) для такою енергоперетворення необхідний електричний контур зі змінною індуктивністю (в нашому випадку, це виток, що обертається в магнітному полі);
- 3) для перетворення змінного струму і постійний в електричному контурі має бути змінний-електричний опір (його роль в електричних машинах відіграє контакт щітка - колектор, опір контакту змінюється від нескінченості, коли щітка не дотикається до колекторної пластини, до деякої мінімальної величини, коли щітка повністю перекидає пластину);
- 4) кожна електрична машина енергозворотна, тобто рівноцінно може працювати і як генератор, і як двигун;
- 5) оскільки для виявлення закону електромагнітної Індукції необхідно лиш відносне переміщення провідника і магнітного поля, - кожна електрична машина інвертовно зворотна, тобто у неї може обертатися або якор, або індуктор.

В.5.Елеїстромагнітні співвідношення при енергоперетворенні

Розглянемо: це питання на прикладі найпростішої машини постійного струму (див. рис. В.3), котра як видно з попереднього, є частковим випадком електромагнітного перетворення енергії.

Генератор. Прийнято вважати, що щітка, через яку струм: іде від генератора є додатною(+), а до якої струм підходить з від'ємною(-).

Так, як. ЕРС, що наводиться в провіднику визначається виразом (В.1), то ЕРС у витку, що складається з двох провідників ac і cd буде

$$E = 2e = 2Blv$$

Відомо, що середню індукцію можна подати як магнітний потік, що проходить через одиницю площі, яку він пронизує;

$$B = \Phi / S$$

Швидкість переміщення провідника в магнітному полі при обертанні якоря діаметром D_j , з частотою n дорівнює

$$v = \Omega D_j / 2 = \pi D_j n$$

де кутова швидкість $\Omega = 2\pi n$

Підставивши (В.6) і (В.7) у (В.5) отримаємо

$$E = 2\Phi l \pi D_j n / S \quad (В.8)$$

де $C_e = 2\pi l D_j / S$ - постійна.

З (В.8) випливає, що *середня ЕРС у витку електричної машини пропорційна добутку частоті обертання і магнітного потоку* і не залежить від форми кривої розподілу індукції в повітряному проміжку між витком і магнітом.

Якщо щітка генератора (див. рис. В.3) опір якірної обмотки якого підключити навантаження опором R_j через яку проходить струм I_j , то згідно закону Кірхгофа для контуру якір – навантаження, можна записати

$$E = I_j R_j + I_j R_n = I_j R_j + U_r \quad (В.9)$$

Звідси напруга на щітках генератора

$$U_r = R I_j R_j \quad (В.10)$$

Електромагнітний момент, діючий на якір найпростішого генератора з витком $abcd$ дорівнює

$$M_{эм} = F D_j \quad (В.11)$$

Підставивши у (В.11) значення сили з (В.4) і індукції з (В.6) після об'єднання: всіх постійних величин отримаємо

$$M_{эм} = D_j \Phi I_j / S = c_m \Phi I_j \quad (В.12)$$

Вираз (В.12) дозволяє сформулювати дуже важливий висновок: електромагнітний моменті електричної машини виникає в результаті *взаємодії магнітного потоку полюсів і струму в якорі*, які є двома сторонами одного особливого виду матерії - електромагнітного поля.

Згідно першого закону Ньютона, підведений до валу якоря генератора обертальний момент за виключенням частин, що витрачається на подолання моменту опору, про який буде детально сказано нижче, урівноважується електромагнітним моментом:

$$M_{вал} - M_{опор} = M_{эм} \quad (В.14)$$

Двигун. Щітка двигуна, до якої підходить струм, вважається додатною (+), а від котрої струм відходить від'ємною (-). Коли по якорю проходить струм, з'являється електромагнітний момент і якір двигуна починає обертатися, а в провідниках його обмотки наводиться ЕРС, напрям якої, згідно закону Ленца, повинен бути таким:, щоб перешкоджати тій дії, в результаті якої вона виникає. Отже, ЕРС в якорі двигуна називається також проти - ЕРС.

До якоря двигуна прикладається напруга $U_{ог}$ і в ньому протікає струм I_j тобто підведена потужність дорівнює $U_{ог} I_j$. Частина цієї потужності витрачається на нагрів обмотки якоря. Внутрішня потужність, розвинута якорем, $P_j = E I_j$, отже, $U_{ог} = E + I_j R_j$ звідки

$$U_{ог} = E + I_j R_j \quad (В.14)$$

Тобто, напруга, що підводиться до якоря урівноважується проти -ЕРС і спадом напруги в його обмотці, що складає звичайно 5-10% напруги $U_{ог}$.

Якщо з розвинутого якорем: елеїстромагнітного моменту вирахувати частину, витрачену на подолання: моменту опору, то залишиться цей корисний механічний момент, якийдвигун має на валу:

$$M_{вал} - M_{опор} = M_{эм} \quad (B.15)$$

Загальний вираз. З механіки відомо, що потужність є добуток моменту на кутову швидкість, тоді електромагнітна потужність

$$P_{эм} = M_{эм} \Omega \quad (B.16)$$

де

$$\Omega = 2\pi n = 2v / D_я \quad (B.17)$$

Підставивши (B. 12) і (B. 1.7) у (B. 16) отримаємо

$$P_{эм} = D_z \frac{\Phi}{S} I_z \frac{2v}{D_я} = 2BlvI_я = EI_я = P_я \quad (B.18)$$

Такий чином., електромагнітна потужність дорівнює внутрішній потужності якоря, і. це відображає процес взаємозворотного перетворення електричної і механічної енергії в електричних машинах.

В.6 Класифікація електричних машин і їх номінальні величини

Основним: призначенням електричних машин є електромеханічне перетворення енергії. Сучасні електричні машини виготовляють з дуже широкими діапазонами потужностей (від частин вата до півтора мільйона кіловат) і частот обертання (від одного оберту в годину до 100 000 об/хв.). Все це накладає відповідні вимоги до конструкції і матеріалів, що застосовуються, тому діапазони потужностей електричних машин умовно поділяють на чотири групи:

Мікромашини	до 500 Вт
Машини:	
Малої потужності.....	0,5-50 кВт
Середньої потужності.....	50-500 кВт
Великої потужності.....	більше 500 кВт

Електричні машини можуть використовуватися для підсилення потужності електричних сигналів в різних системах управління. Такі машини називають *електромашинами підсилювачами*. Для перетворенні частоти обертів в електричні сигнали служать *тахогенератори*, а для отримання електричних сигналів, пропорційних куту повороту вала - *сельсини*. Всі ці види електричних машин знаходять застосування на транспорті.

За принципом: дії електричні машини поділяють на дві групи - *колекторні і безколекторні*.

Колекторні машини використовують головним чином: на постійному струмі в якості, генераторів або двигунів. Але існують і колекторні двигуни змінного струму, котрі в сучасних умовах застосовують в системах, де необхідна висока частота обертання (більше 3000 об/хв).

Безколекторні. машини ділять на *синхронні* та *асинхронні*. Це машини змінного струму. Синхронні машини працюють в якості, генераторів і, рідше, як двигуни. Асинхронні машини - це головним чином електродвигуни. Обидва цих типи машин змінного струму використовують на локомотивах.

Номінальний режим роботи електричної машини, тобто режим при умовах, для яких вона призначена, характеризується такими величинами: потужністю, напругою, струмом, частотою обертання, ККД і електромагнітним моментом.

Потрібно розрівняти номінальну *електричну* потужність генератора і *механічну* потужність на валу двигуна.

В.7. Матеріали, що застосовуються в електромашинобудуванні

Для отримання електромагнітного моменту моменту в електричній машині необхідна наявність магнітного потоку (його створюють полюси) і струму в обмотці якоря. Отже, основу електричної машини мають складати магнітні і струмопровідні матеріали. Ізоляцію струмопровідних матеріалів від корпусу і одні від одного виконують ізоляційними матеріалами.

Для виготовлення вузлів і. деталей, головним, призначенням яких є сприйняття і передача механічних навантажень (ваги, станини, підшипникові щити, кріпильні деталі і т. ін.) застосовують конструктивні матеріали.

Магнітопровідні матеріали. Найважливішими сортами листової електротехнічної сталі є сорти, у склад яких для зменшення: збитків на вихрові струми і гістерезис вводять кремній.

Електротехнічні сталі виготовляють товщиною 0,5 і 0,35 мм і розрізняють за двома найважливішими ознаками. Сталь може бути ізотропною, що має практично однаковою магнітопровідність в напрямку і поперек прокату, або анізотропною, у якій намагнічувана провідність різко відрізняється у вказаних напрямках.

Позначення марок сталі складається з чотирьох цифр, які умовно характеризують основні властивості, сталі: перша - клас за структурним: станом і видом прокату (1 - гаряча прокатка ізотропна, 2 - холоднокатана ізотропна, 3 - холоднокатана анізотропна); друга - вміст кремнію (0 - не легована, 1 - вміст кремнію від 0,4 до 0,8 %, 2 - більше 0,8 до 1,8 %, 3 - більше 1,8 до 2,8 і тощо); третя - основна нормована характеристика (питомі втрати при даній індукції і частоті 50 Гц); четверта - порядковий номер сталі.

Раніше для виготовлення осердь якорів застосовувалась гарячекатана ізотропна сталь (в більшості марки 1312). Останнім часом: її замінює холоднокатана ізотропна сталь, що володіє більш високими магнітними показниками, наприклад, марки 2312.

Для виготовлення шихтованих осердь полюсів, що не підлягають періодичному перемагнічуванню застосовують холоднокатану анізотропну сталь марки 3411.

Струмopовідні матеріали. Завдяки гарній електропровідності, відносній дешевизні і достатній механічній міцності, основним струмопровідним матеріалом є мідь. Але її запаси порівняно обмежені і тому ведуться роботи по її заміні, в першу чергу алюмінієм і його сплавами.

Питомий опір при температурі 20° С для електролітичної відпаленої міді складає $(17,24 \div 17,54) \cdot 10^{-9}$ Ом·м, а для рафінованого алюмінію - $28,2 \cdot 10^{-9}$ при густині відповідно 8,9 т/м³ і 2,65 т/м². Істотно більший (практично в 1,6 рази) питомий опір алюмінію і гірші механічні властивості перешкоджають його широкому використанню в електричних машинах.

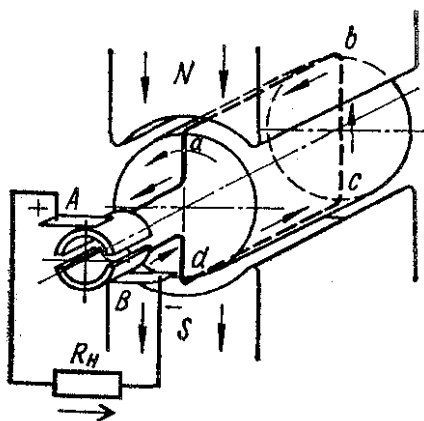


Рис. В.3. Найпростіший генератор постійного струму

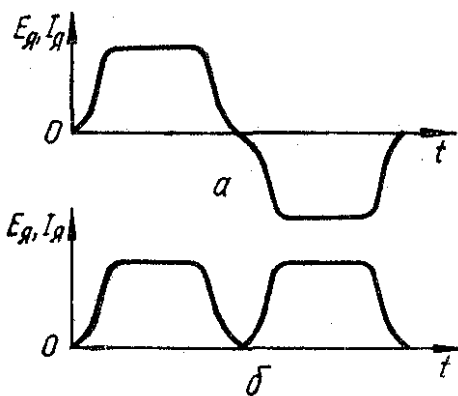


Рис. В.4. Криві ЕРС і струму якоря (а) і у зовнішньому колі (б) найпростішого генератора постійного струму

Ізоляційні матеріали. Ці матеріали повинні, володіти достатньою електричною і механічною міцністю, теплопровідністю і стійкістю до нагрівання. В основному ізоляційні матеріали можуть виготовлятися на основі природних органічних матеріалів (папір, деревина, шовк), неорганічних матеріалів (слюда, скловолокно, азбест), різних синтетичних матеріалів (плівки, емалі, лаки). Рідкі або газоподібні діелектрики частіше застосовуються в трансформаторах.

При роботі електричних машин і трансформатори нагріваються, що веде до виходу із ладу їх електричної ізоляції. Ізоляційні матеріали під дією температури висихають, тріскають, втрачають свої електричні механічні властивості; ізоляція старіє. Тому, коли говорять про допустиме навантаження машини або трансформатора, то мають на увазі, що вона насамперед визначається *допустимою температурою* для ізоляційних матеріалів. І якщо машину розраховують на термін служби 16-20 років, то стійкість до нагріву ізоляції, яку використовують, повинна забезпечувати економічно доцільний до ремонту термін служби.

Звичайно на, і машину, і трансформатор можна виконати такими, що не нагріватимуться в процесі експлуатації. Але використання їх матеріалів при цьому буде надзвичайно неефективним, виріб буде тяжким і дорогим. Потрібно побудувати вискоефективну машину з довгим терміном служби.

Всі ізоляційні матеріали на стійкість до нагріву поділяються: на класи. Допустима температура для кожного з класів така.

Класи ізоляції	Y	A	E	B	F	H	C
Допустима температура, °С	90	105	120	130	155	180	вище 180

Термін служби ізоляції навіть при невеликому перевищенні температури, що допускається, що допускається для данного класу різко падає. Тому в умовах експлуатації температура ніколи не повинна перевищувати допустиму.

Конструктивні матеріали. В якості таких матеріалів використовують сталь, чавун, кольорові матеріали і їх сплави, а також пластмаси. До них висуваються вимоги, загальні в машинобудуванні.

РОЗДІЛ 1

МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

ЧАСТИНА 1. Принцип дії і будова машини постійного струму.

1.1 Принцип, дії. машини постійного струму. Електричні градуси.

Характерною ознакою машини постійного струму (за винятком особливих уніполярних машин) є наявність у них *колектора* - механічного перетворювача змінного струму в постійний і навпаки. Найпростіший колектор, що складається з двох пластин, показаний на рис. В.3. З його допомогою у зовнішньому колі генератора тече струм одного напрямку, що змінюється від нуля до максимального значення, а потім знову до нуля (див. рис. В.4,б). Звичайно, це ще не «справжній» постійний струм.

Уявімо собі, що на якорі генератора вкрито два витка під кутом 90° один до одного; тоді колектор буде складатися з чотирьох пластин. Тепер вигляд кривої випрямленого струму у зовнішньому колі, на відміну від рис. 4.б буде виглядати так, як на рис. 1.1 товстою лінією. Як бачимо, струм у зовнішньому колі тепер хоча і змінюється за значенням (пульсує), але не до нуля, а лише дещо відрізняється від максимуму. Отже, якщо й якорі буде багато витків, а на колекторі багато пластин, пульсація струму буде невелика. Можна показати, що при восьми пластинах, які приходяться на один полюс, пульсація не перевищує 1%, тобто стає непомітною, а струм - практично постійним.

В електричній машині може бути багато полюсів, але основою у вивченні теорії роботи є машина *двополюсна*, бо пара полюсів - північний і південний - неподільна. Тому говорять, що машина має p пар полюсів. Очевидно у двополюсної машини полюси протилежної полярності розміщені під кутом: 180° по відношенню один до одного. А якщо полюсів $2p$, то як визначити кут між ними? Який вид мали б криві випрямленого струму на рис. 1.1., якщо в машині було б дві пари полюсів, тобто $p=2$ або $2p=4$ (чотириполюсна машина)?

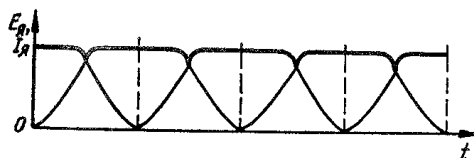


Рис. 1.1, криві ЕРС і струму у зовнішньому колі найпростішого генератора постійного струму з двома витками на якорі.

Картина на рис. 1.1. не змінилася б справа в тому, що кут повороту якоря у такому випадку потрібно вираховувати в *електричних градусах*. Що ж таке електричний градус?

У кривій ЕРС і струму на рис. В.4. *a* повний період відповідає 360° повороту якоря. Він відповідає подвійній полюсній поділці 2τ . Але, якщо $2p=4$, то один оберт відповідає 4τ . Таким чином, якщо машина має $2p=2$ полюси, то число електричних градусів відповідає числу електричних градусів; за один оберт будуть пройдені 360° ел. Якщо ж $2p=4$, то за один оберт (360° геометричних) будуть пройдені 720° ел. Відповідно *один градус геометричний відповідає p електричним*.

Магнітний потік машини постійного струму (рис. 1.2.) створюється обмотками збудження 1, розміщеними на полюсах 2 статора. На роторі розміщена обмотка, в якій індукуються ЕРС. Таким чином, індуктор машини постійного струму розташований на статорі а якір 3 і його обмотка 4 - на роторі.

Як видно з рис. 1.2. у всіх провідниках, розміщених під одним полюсом, напрямком. ЕРС однаковий і зберігається таким незалежно від частоти обертів. Отже. ЕРС провідників, що лежать вище геометричної нейтралі завжди напрямлена в одну сторону, а ЕРС провідників, що лежать нижче геометричної нейтралі - в інший бік.

При обертанні якоря: індукуються в провідниках ЕРС змінює знак, коли провідники переміщуються від одного полюса до іншого. Оскільки кількість провідників, з'єднаних відповідним чином і розміщених під одним полюсом, залишається незмінною, їх сумарна ЕРС також - незмінна. Ці ЕРС знімаються з обмотки якоря за допо-

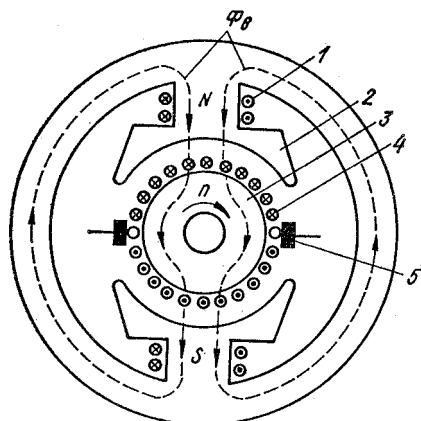


Рис. 1.2. Електромагнітна схема машини постійного струму.

могою щіток 5, встановлених на колекторі, до якого під'єднані, привідники якоря.

Якщо щітки не замкнені на зовнішнє коло, то струм по обмотці якоря не проходить, так як ЕРС індуковані у різних частинах обмотки, взаємно компенсуються. Очевидно ЕРС E на щітках буде найбільшою, якщо щітки розміщені так, що дотикаються з провідниками, розміщеними на лінії геометричної нейтралі.

Якщо до щіток, під'єднати навантажувальний резистор, то по тому потече струм: I_0 , напрям: якого відповідатиме напрямку ЕРС E . В обмотці якоря цей струм розгалужується і проходить в даному конкретному випадку по двох паралельних витках.

1.2. Будова машини постійного струму

Загальний вигляд машини постійного струму показаний на рис. 1.3.

Статор. Складається з станини, яка служить для проведення магнітного потоку від полюса до полюса і одночасно несе в собі всі конструктивні елементи машини. Станини виготовляють (виливають) звичайно зі сталі. Круглі станини великих машин виготовляють на вальцях зі сталевого листа. Тягові електродвигуни локомотивів мають станини з гранями, які також, називають *остовами*. Така конструкція їх дозволяє зменшити габаритні розміри чотириполюсних машин.

З торців до станини кріплять підшипникові щити, у яких встановлені якірні підшипники. В середині станини встановлюють головні полюси з обмотками збудження, а між ними, точно на лінії геометричної нейтралі - додаткові полюси, котрі слугують для зменшення іскріння між щітками (див. гл.5).

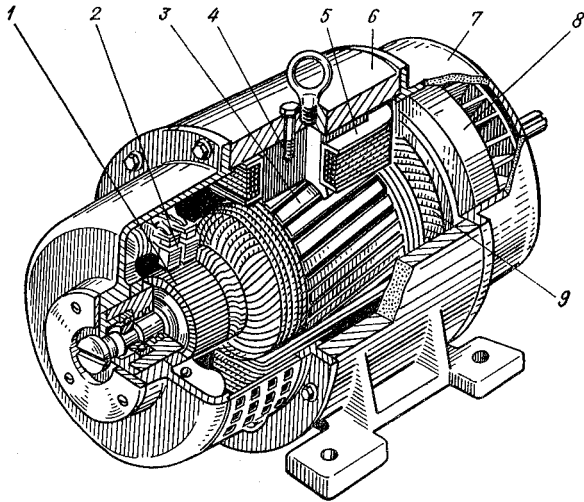


Рис.1.3. Будова машини постійного струму: 1-колектор; 2 - щітки; 3 - осердя якоря; 4 - головний полюс; 5 - полюсів з'єднують звичайно послідовно, як і додаткових. обмотка збудження; 6 - станина; 7 - підшипниковий щит; 8 - вентилятор; 9 - обмотка якоря

На рис. 1.4. показаний головний полюс машини, що складається з осердя, і обмотки 2, по котрій проходить струм. Полюс являє собою електромагніт. Осердя полюсів набирають з листів електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм, наприклад анізотропної марки 3411, деколи використовують сталь Ст3 товщиною 1,5-2 мм. Осердя стягають шпильками 3, котрі на кінцях розклепують.

Нижня, розширена частина осердя називається *полюсним, наконечником, або башмаком*. Полюси кріплять до станини болтами. Для виготовлення болтів додаткових полюсів деколи застосовують немагнітну (нержавіючу) сталь з метою зменшення магнітного насичення полюсу.

Обмотки полюсів виготовляють з ізолюваного мідного круглого або прямокутного дроту. Обмотки всіх головних

Якір. Осердя якоря (рис.1.5) збирають на валу з ізолюваних (для зменшення, збитків від вихрових струмів)

листів електротехнічної сталі. Зібране осердя спресовується і закріплюється натискними шайбами, котрі можуть одночасно служити тримачами обмоток. Простамповані в листах отвори утворюють в зібраному осерді аксіальні вентиляційні канали.

Обмотку якоря виготовляють з дроту круглого чи прямокутного перерізу; звичайно вона складається з окремих наперед сформованих і ізолюваних якірних котушок 1 (рис. 1.6), що розміщуються в пазах осердя 2 якоря. Обмотку виконують двохшаровою; в кожному пазу розміщують дві сто-

рони різноманітних якірних котушок - одну поверх іншої з прокладкою між ними. Кожна якірна котушка складається з декількох секцій, кінці яких припаюють до відповідних пластин колектора 3. Секції можуть бути одно-, або багатовитковими. Прикладом одновиткової секції може служити виток на якорі найпростішого генератора (див. рис. В.3).

Колектор. Це один з основних і найскладніших вузлів електричної машини постійного струму. Зазвичай у сучасних машин, особливо у тягових двигунів локомотивів, колектори знаходяться на

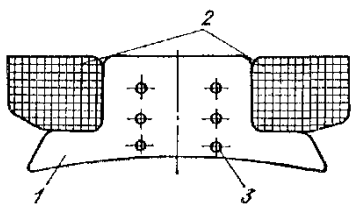


Рис.1.4. Головний полюс машини постійного струму

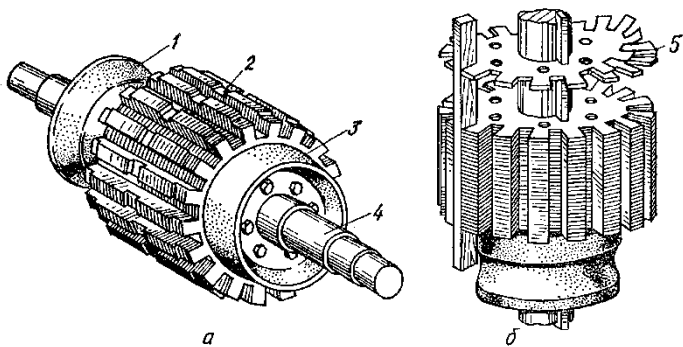


Рис.1.5. Осердя якоря (а) і процес його збирання (б); 1, 3 - натискні шайби; 2 - виточки для накладання бандажу; 4 - місце для пресування колектора; 5-ізопшійна плівка; 6 - сталевий лист.

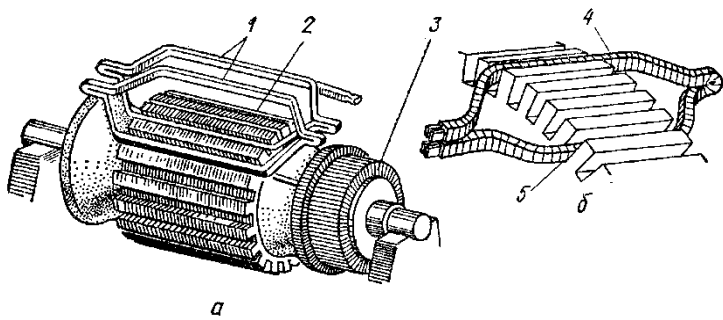


Рис.1.6 Накладання обмотки на осердя якоря (а) і розташування якірних котушок в пазах

межі використання матеріалів і технологічних можливостей.

Колектори збирають з мідних пластин 4 трапецеїдальної форми, ізольованих одна від одної ізоляційними прокладками 5, а від корпусу 1, 2 - міканітовими ізоляційними манжетами 3 (рис. 1.7). Пластини закріплюють на «ластівчиних хвостах», і після ряду запресувань в гарячому стані колектор обточують і шліфують, надаючи його поверхні суворо циліндричної форми. Кінці обмоток якоря припаюють до закінчень колекторних пластин,

котрі називають "півниками". При великій різниці між діаметрами якоря і колектора "півники" виготовляють окремих мідних шин, що приварюються до колекторних пластин.

В машинах порівняно невеликих розмірів, у тому числі тих, що застосовуються на транспорті, колектор виготовляють з пластмасовим корпусом б, закріплюваним на втулці 7.

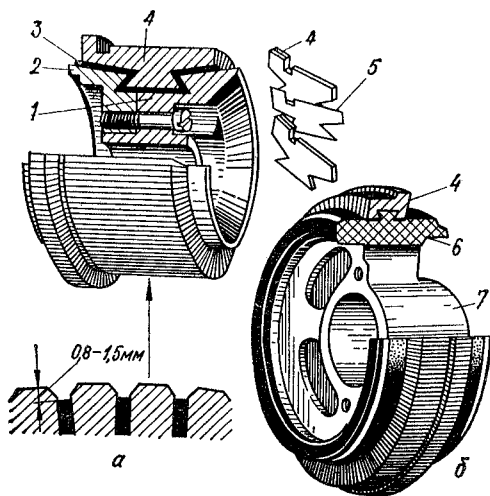


Рис. 1.7 Колектори з металічним (а) і пластмасовим (б) корпусами.

Для забезпечення довготривалої роботи ковзного контакту по колектору без ударів у виступаючі ізоляційні прокладки, колектори в процесі виготовлення піддаються продорожці, під час котрої знімають верхню частину ізоляційних прокладок так, щоб вони виявились втопленими на глибину до 1,5 мм.

У швидкохідних машин довгі колектори кріплять додатково за допомогою кованих бандажних кілець, що насаджуються зверху на колектор та ізольовані від його поверхні. Ці кільця перешкоджають випаданню колекторних пластин, під дією доцентрових сил нагріву колектора.

Щітковий апарат. Служить для під'єднання чи від'єднання струму від колектора, котрий обертається. Щітковий апарат тягового двигуна (рис. 1. 8) складається зі сталевого кронштейна

тунний корпус щікотримача 11 за допомогою болта і гайки 5 кріпиться до кронштейна, їх дотичні поверхні, виготовлені у вигляді гребінця для надійного кріплення і регулювання проміжку між щікотримачем і робочою поверхнею колектора 10. Нажимні пружинні пальці 6 за допомогою пружин 8 здійснюють практично постійний натиск, на щітку 9 при її спрацьовуванні в процесі експлуатації.

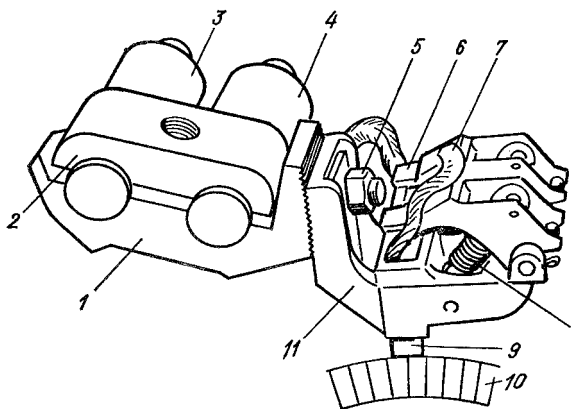


Рис.1.8.Кронштейн з пальцями і щікотримач

на 1, 2, що кріпиться на двох ізоляційних пальцях 3 і 4, що представляють собою шпильки, опресовані пластмасою АГ-4В. Латунний корпус щікотримача 11 за допомогою болта і гайки 5 кріпиться до кронштейна, їх дотичні поверхні, виготовлені у вигляді гребінця для надійного кріплення і регулювання проміжку між щікотримачем і робочою поверхнею колектора 10. Нажимні пружинні пальці 6 за допомогою пружин 8 здійснюють практично постійний натиск, на щітку 9 при її спрацьовуванні в процесі експлуатації.

Якщо ж щітка спрацьована більше допустимої межі тиск нажимного пальця на неї автоматично припиняється, що відкидає можливість пошкодження поверхні колектора щітковою арматурою. Щітки представляють собою прямокутні бруски з композиції, виготовлюваної на основі графіту. В залежності від складу, способу виготовлення і фізичних властивостей вони мають різне маркування. Всі-

марки об'єднуються в шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-, бронзо- і срібло-графітові. Для кожної машини варто застосовувати тільки щітки такого типорозміру, що вибрані заводом виробником.

Щітки сучасних великих машин, виконують розрізаними в радіально-осьовому напрямі зі спеціальною гумовою накладкою для вирівнювання тиску пальця б¹ на обидві половини щітки. Такий розділ щіток на дві частини забезпечує краще прилягання до колектора.

Для кращого проходження струму до щікотримача від щіток, останні часто комплектують мідними плетеними канатиками (шунтами) 7, один кінець яких закріпленний в арматурі щітки, а інший під'єднують до корпусу щікотримача.

Щітковий апарат закріплюють на підшипникових щитах.

Контрольні запитання:

1. Чому виникає пульсація струму у зовнішньому колі і як її зменшити?
2. Що таке електричні, градуси, як вони відрізняються від геометричних?
3. Де необхідно встановлювати щітки?
4. Яке призначення станини?
5. Чому осердя якоря збирають з ізольованих листів електротехнічної сталі?
6. Для чого роблять продорожку колектора?
7. Як влаштований щіткотримач? Які бувають типи конструкції щіток?

Частина 2. Магнітне коло електричної машини при холостому ході.

2.1. Основний магнітний потік і потік розсіювання. Індукція у повітряному проміжку.

Магнітне коло і методи його розрахунку однакові для будь-якої електричної машини постійного струму. Відмінність між магнітними колами машин і трансформаторів полягає лиш у тому, що в перших є повітряний проміжок між статором і ротором і конфігурація магнітного кола складніша.

Магнітний потік в електричній машині протікає по магнітному колі так, як зображено на рис. 2.1. Скільки не було б у машині полюсів, магнітне коло завжди вбирає в себе два полюси W-S (одну пару) різної полярності. Але не весь магнітний потік проходить через проміжок δ в якорі. Частина його замикається по повітрі навколо обмотки збудження і носить назву потоку розсіювання Φ_δ , на відміну від основного магнітного потоку Φ_0 , що входить в якорь машини. Таким чином, весь потік полюса

$$\Phi_n = \Phi_0 + \Phi_\delta = \Phi_0(1 + \Phi_\delta/\Phi_0) \quad (2.1)$$

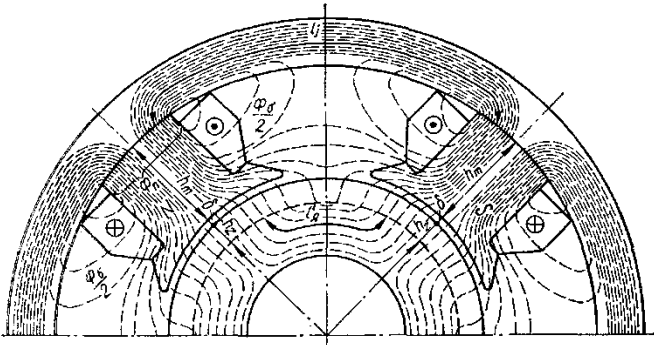
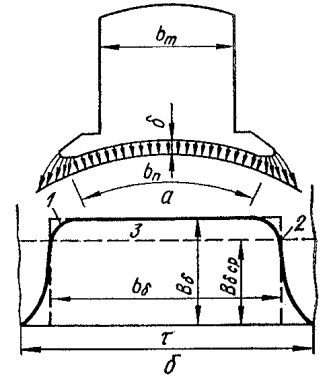


Рис.2.1. Магнітне коло електричної машини постійного струму

Рис.2.2. Магнітні силові лінії (а) і розподіл магнітної індукції (б) в повітряному проміжку



Коефіцієнт $k_\sigma = 1 + \Phi_\delta/\Phi_0$ носить назву *коефіцієнта розсіювання*, Звичайно в тягових електричних машинах $k_\sigma = 1.12 + 1.22$

Розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку на довжину полюсного ділення τ має складну форму (крива 1 на рис 2.26). Для розрахункової мети її заміняють еквівалентним за площею прямокутником і, що відповідає рівності потоків, обмежених лініями 1 і 2. Висоту прямокутника приймають рівною значенню дійсної індукції B_δ ; тоді його основа, що називається *розрахунковою полюсною дугою*, буде b_δ .

В реальних машинах розрахункова і дійсна полюсні дуги приблизно дорівнюють одна одній, тобто $b_\delta = b_n$. На довжині полюсної дуги основний магнітний потік входить в якорь. Відношення $a = b_\delta/\tau \approx b_n/\tau = 0.65 + 0.72$ називається *коефіцієнтом полюсного перекриття*.

2.2 Ділянки магнітного кола. Принцип визначення основної МРС.

В основу розрахунку магнітного кола покладені закон повного струму

$$\sum H \Delta l = \sum i$$

Де H - напруженість магнітного поля, Δl - елемент довжини магнітної лінії; $\sum i$ - повний струм, що з'єднується магнітною лінією.

Магнітне коло машини складається з п'яти послідовно з'єднаних ділянок, що відрізняються один від одного своїми магнітопровідними властивостями та мають різні довжини шляху для магнітного потоку (див. рис. 2.1) повітряного проміжку δ ; 2) зубців якоря h_2 ; 3) тіла якоря l_n 4) тіла полюса h_m ; 5) тіла станини l_j .

Внаслідок падіння магнітного потенціалу на кожній з ділянок для проходження основного магнітного потоку потрібна певна МРС F_0 , яку можна визначити, просушувавши МРС кожної з ділянок:

$$F_0 = F_\delta + F_z + F_y + F_m + F_j$$

МРС ділянки магнітного кола дорівнює добутку напруженості магнітного поля $H_{\text{дїл}}$ (ділянки) і довжини ділянки $l_{\text{дїл}}$:

$$F_{\text{дїл}} = H_{\text{дїл}} \cdot l_{\text{дїл}}$$

Напруженість і індукція пов'язані між собою співвідношенням

$$B_{\text{дїл}} = \mu_{\text{дїл}} H_{\text{дїл}} = \Phi_{\text{дїл}} / S_{\text{дїл}}$$

звідки

$$H_{\text{дїл}} = \frac{\Phi_{\text{дїл}}}{\mu_{\text{дїл}} S_{\text{дїл}}}$$

Де $\mu_{\text{дїл}}$ - магнітна проникливість матеріалу, яка змінюється на сталевих ділянках із зміною індукції $B_{\text{дїл}}$ (рис.2.3), а $S_{\text{дїл}}$ - площа поперечного перерізу ділянки.

На ділянках з немагнітних матеріалів (мідь, ізоляція, повітря) магнітна проникливість постійна і порівнює $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м

Підставивши (2.4) в (2.3), отримаємо

$$H_{\text{дїл}} = \frac{\Phi_{\text{дїл}} l_{\text{дїл}}}{\mu_{\text{дїл}} S_{\text{дїл}}}$$

Отж% основна МРС, розрахована на пару полюсів, дорівнює

$$F_0 = \Phi_0 \frac{2\delta}{\mu_{\text{дїл}} S_\delta} + \Phi_0 \frac{2h_z}{\mu_z S_z} + \frac{\Phi_0 l'_y}{2\mu_y S_y} + k_\delta \Phi_0 \frac{2h_m}{\mu_m S_m} + k_\delta \frac{\Phi_0 l_j}{2\mu_j S_j} \quad (2.6)$$

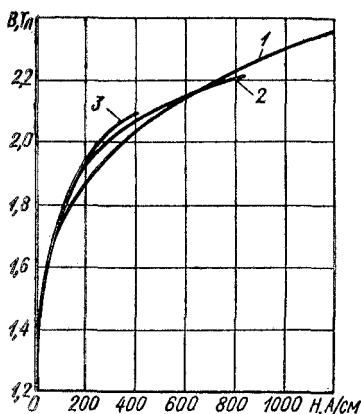


Рис. 2.3. Характеристики намагнічування:

1 - сталі 3212; 2 - листової сталі товщиною 1,5 мм, 3 - стального литва

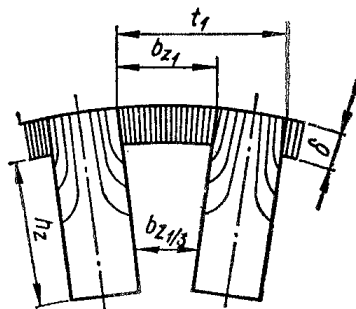


Рис. 2.4. Магнітні силові лінії в повітряному проміжку зубчатого якоря

Таким чином, розділивши магнітний потік на площу поперечного перерізу ділянки, можна визначити індукцію $B_{\text{дїл}}$. Використовуючи характеристику намагнічування для матеріалу ділянки (див. рис. 2.3), знаходять напруженість $H_{\text{дїл}}$ помноживши на довжину шляху ділянки $l_{\text{дїл}}$ отримують МРС ділянки $F_{\text{дїл}}$. З врахуванням (2.3)-(2.5) рівняння (2.6) приймає вигляд

$$F_0 = 2H_\delta \delta + 2H_z h_z + H_y l'_y + 2H_m l_m + H_j l_j \quad (2.7)$$

Розрахунки МРС окремих ділянок магнітного кола машини при їх принципові ідентичності мають деякі особливості. Завдяки зубчатій будові якоря середня довжина шляху магнітного потоку в повітряному проміжку δ' трохи більша, ніж заміряний зазор δ (рис. 2.4)

$$\delta' = k_\delta \delta \quad (2.8)$$

Для визначення коефіцієнту повітряного зазору можна використовувати емпіричну формулу

$$k_\delta = \frac{t_1 + 10\delta}{b_{z1} + 10\delta} \quad (2.9) \cdot I$$

де $t_1 = \pi D_y / z$ - крок, зубців; z - число зубців (пазів) якоря; b_{z1} - ширина зубця по зовнішньому діаметру якоря (див. рис. 2.4).

Якщо довжина сталю пакету дорівнює $l_{\text{я}}$, то

$$S_{\delta} = \alpha \tau l_{\text{я}} \quad (2.10)$$

Через те, що зуб має форму клина, індукція в його різних перерізах по висоті неоднакова. Тому в якості розрахункового приймають переріз на висоті $h_z/3$ від основи зубця, тоді

$$S_z = \frac{0.97 b_{z_{1/3}} z \alpha l_{\text{я}}}{2p} \quad (2.11)$$

де коефіцієнтом заповнення пакету сталлю, 0,97 враховують ізоляцію одного листа пакету від другого.

При визначенні площі перерізу тіла якоря між дном пазу і внутрішнім діаметром D враховують наявність вентиляційних канатів: число їх рядів n_k і діаметр d_k . При цьому

$$S_{\text{я}} = \frac{0.97 l_{\text{я}} (D_z - D_i - 2h_z - 4n_k d_k / 3)}{2} \quad (2.12)$$

Величини S_m і S_j знайти легко.

Оскільки МРС визначається добутком струму в обмотці і її числа витків, то, знаючи МРС F_0 , що приходить на дару полюсів, можна розрахувати число витків обмотки збудження одного полюса машини:

$$w_{\text{е}} = 0.5 F_0 / I_{\text{е}} \quad (2.13)$$

де $I_{\text{е}}$ - струм в обмотці машини.

2.3 Магнітна характеристика і 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 $\Phi_0 = f(I_{\text{е}})$ котра називається *магнітною характеристикою машини* (рис. 2.5, суцільна лінія). 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) 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*.

$$k_{\text{нс}} = \frac{F_0}{F_{\delta}} = \frac{ac}{bc} = 1 + \frac{bc}{ab} \quad (2.14)$$

який є найважливішим параметром машини. За значенням $k_{\text{нс}}$ можна робити висновки про деякі техніко-економічні показники і регульовальні властивості машини. Згідно виразу (В. 8) основний магнітний потік

$$\Phi_0 = E / c_{\text{е}} n \quad (2.15)$$

Отже, залежність $\Phi_0 = f(I_{\text{е}})$ є одночасно залежністю

$E/n = f(I_{\text{е}})$. Значить, змінюючи струм збудження $I_{\text{е}}$, можна змінювати ЕРС або частоту обертання. Якщо генератор має постійну частоту обертання n , то при зміні струму збудження зміниться ЕРС і, згідно (В. 10), напруга $U_{\text{Г}}$. Характер цієї зміни визначиться магнітною характеристикою.

Слабонасичені машини мають кращі регульовальні властивості, ніж сильнонасичені. Але машини зі слабо насиченим магнітним колом, маючи більші площі поперечного перерізу ділянок кола, більші, за розмірах, важчі і 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 з великими витратами міді.

В залежності від умов роботи, для яких призначена машина, її магнітне коло може бути: слабо насиченим ($k_{\text{нс}} < 1,5$), середньо насиченим ($k_{\text{нс}} - 1,6 \div 1,8$) і сильно насиченим ($k_{\text{нс}} > 1,9$).

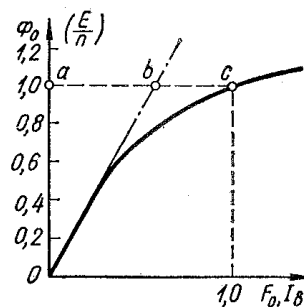


Рис.2.5 магнітна характеристика машини

Для отримання таких значень коефіцієнтів насичення в машинах постійного струму індукції на окремих ділянках кола мають знаходитися в межах:

Повітряний зазор B_g , Тл.....	0,8-1,1
Зубці якоря $b_{z_{1/3}}$, Тл.....	2,1-2,4
Тіло якоря B_y , Тл.....	1,2-1,6
Тіло полюса B_m , Тл.....	1,3-1,7
Тіло станини B_j , Тл.....	1,1-1,4

Контрольні запитання і задача

1. Що таке-магнітне коло? Які конструктивні елементи машин постійного струму утворюють магнітні кора? Що таке основний магнітний потік?
2. На основі якого закону і в якій послідовності виконується розрахунок магнітних кіл?
3. Що таке коефіцієнт полюсного перекриття? Як він визначається?
4. Основний магнітний потік в шестиполюсному тяговому двигуні електровозу $\Phi_0 = 1.2$ Вб; коефіцієнт полюсного перекриття $\alpha = 0.72$, число пазів у якорі $z = 123$; розрахункові ширина і висота, зубця якоря $b_{z_{1/3}} = 0.01$ м і $h_{z_{1/3}} = 0.035$ м; довжина пакету якоря $l_y = 0.38$ м. Чому дорівнюють: 1) індукція в зубцях якоря $B_{z_{1/3}} = 0.035$; 2) МРС зубців F_z (використовувати характеристику на рис.2.3)?

Частина 3. Якірні обмотки машин постійного струму.

3.1 Будова обмоток

Сучасні електричні машини виконують в основному з зубчатими барабанними якорями, в пази котрих вкладають *двошарові* обмотки.

Основним елементом обмотки якоря є *секція*, що складається з одного або декількох послідовно з'єднаних витків. У кожному пазові знаходиться, як правило, декілька секцій (рис. 3.1а), ізольованих загальною корпусною ізоляцією від стінок, паза Вони утворюють котушку якоря. В цьому випадку говорять, що кожному реальному пазові відповідає декілька двошарових *елементарних* пазів.

Секція якоря має дві активні сторони - верхню і нижню. Перехід з верхнього шару в нижній виконують за допомогою *головки* в заданій лобовій частині секції, Кінці передньої лобової частини секції приєднують (припаюють) до колекторних пластин (див. рис. 1.6), причому початок наступної секції під'єднують до тої ж колекторної пластини, що і кінець попередньої. Це створює неперервність обмотки. Загальна кількість секцій S завжди дорівнює числу колекторних пластин K і числу елементарних пазів z_e :

$$S = K = z_e = u_n z \quad (3.1)$$

де u_n - число колекторних пластин або елементарних пазів, які приходяться на один реальний паз,

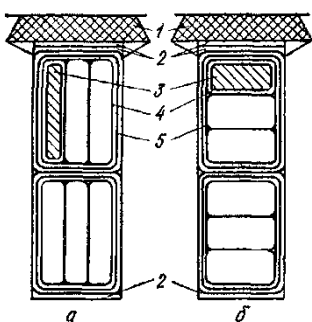


Рис.3.1 Розташування провідників у пазах якоря «на ребро» (а) і «лежачи» (б): 1-клин; 2-прокладки; 3-виткова; 4-корпусна; 5-покрівельна ізоляція.

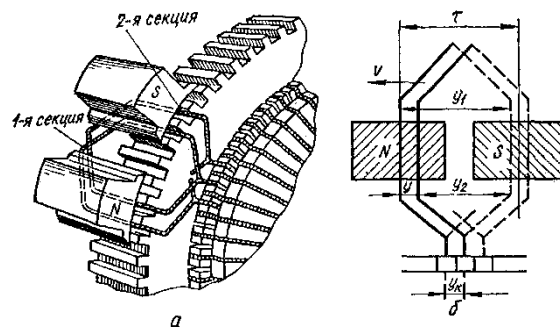


Рис.3.2 Загальний вигляд петлевої обмотки (а) і схема з'єднання її секцій

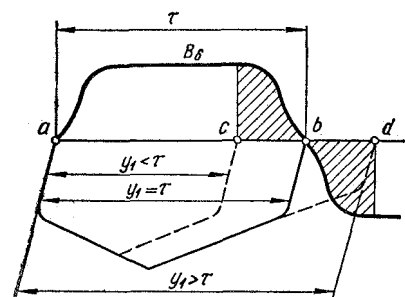


Рис.3.3 Схема розташування діаметральної, вкороченої і подовженої секцій в магнітному полі електричної машини

Оскільки кожен виток секції утворений її двома сторонами (провідниками), то повне число провідників в якорі

$$N = 2Kw_c = 2Sw_c \quad (3.1,a)$$

де w_c - число витків в секції.

В останні роки, особливо в тягових електричних машинах, широке розповсюдження дістала *багатошарова* конструкція пазу (рис. 3.1б), в якій більше заповнення міддю і краща віддача теплоти кожним провідником стінками пазу, хоча принципової різниці між пазами на рис. 3.1а і 3.1б немає: другий можна отримати, розмістивши провідники першого "лежачи"; В обох $u_n = 3$, тому обмотка, виконана конструктивно за рис. 3.1б, також є двошаровою.

ЕРС, що виникають в кожній з активних сторін секцій повинні додаватися, тому сторони секцій розміщують під полюсами різної полярності на відстані y_1 що дорівнює довжині полюсного поділу x (рис. 3.2). Обмотки, у яких $y_1 = \tau$, тобто сторони секцій знаходяться під кутом 180° ел. по відношенню одна до одної, отримали назву *діаметральних*, на відміну від *хордових*, де $y_1 \neq \tau$.

Нарис. 3.3 показані три секції, у яких: $y_1 = \tau$ (секція ab); $y_1 < \tau$ (секція ac) і $y_1 > \tau$ (секція ad). Контур діаметральної секції охоплює весь магнітний потік Φ_0 , що відповідає площі, яка обмежена кривою індукції у повітряному проміжку. Контур хордової вкороченої секції ac охоплює тільки частину цього потоку; тому ЕРС, що виникає у ній буде менша, ніж у секції ab , на величину пропорційну заштрихованій площі, відповідній вкороченню bc . Подовжена секція ad отримує від'ємний приріст потоку, що відповідає заштрихованій площі на відстані bd . Якщо вкорочення bc та подовження bd дорівнюють одне одному, то ЕРС в секціях ac і ad також дорівнюватимуть одна одній; але для виготовлення подовженої секції потрібно більше міді та ізоляції на виконання її лобових частин. Тому на практиці подовжені обмотки не використовують.

Основним типом обмотки є вкорочена ($y_1 = \tau$) і тільки у невеликих машинах можна зустріти діаметральні обмотки. Необхідність вкорочення обмоток буде обґрунтована в част.5.

3.2 Проста петлева обмотка

Простою петлевою обмоткою називають таку обмотку, у якої кінець і початок секції приєднані до лежачих поруч пластин, тобто її крок по колектору

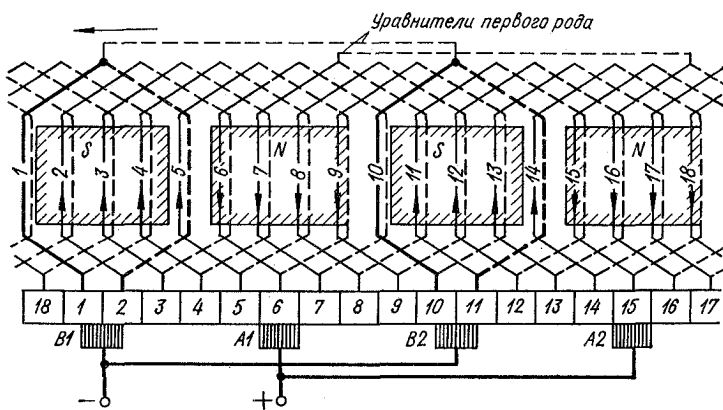
$$y_k = 1 \quad (3-2)$$

Свою назву ця обмотка отримала тому, що її секція нагадує петлю (див. рис. 3.2)

Відстань між активними сторонами одної секції, виражена через число колекторних пластин, називається *першим частковим кроком* y_1 . Так як на довжину одного полюсного поділу приходиться $K/(2p)$ колекторних пластин, то у вкороченої обмотки

$$y_1 = K/(2p) - \varepsilon \quad (3.3)$$

де ε - величина, вкорочення. Отже, величина ε має бути такою, щоб значення кроку y_1 дорівнювало цілому числу. Як правило вона мінімальна. У діаметральної обмотки $\varepsilon = 0$.



Друга секція зсунута вправо від першої на крок y_k . Відстань між кінцевою стороною попередньої секції і початковою стороною наступної називається *другим частковим кроком* y_2 . Його відрахунок в петльовій обмотці йде справа на ліво (проти підрахунку y_1) тому y_2 є від'ємною величиною.

Результуючий крок петлевої обмотки

$$y = y_1 + y_2 = y_k = 1 \quad (3.4)$$

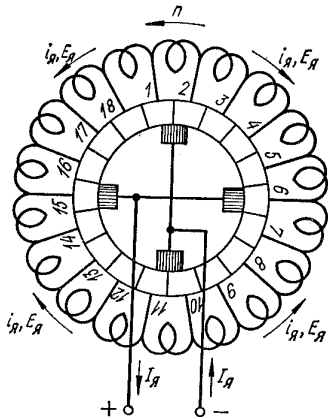
тоді

$$y_2 = 1 - y_1 \quad (3.4a)$$

Рис. 3.4. Схема простої петлевої обмотки ($2p = 4, z = z_e = S = K = 18, y_1 = 4, y_2 = -3, y_3 = 1, \varepsilon = 0.5$)

Розглянемо приклад простої петлевої обмотки генератора, схема і основні дані якої наведені на рис. 3.4. Покладемо число елементарних пазів $z_e = z$, тобто $u_p = 1; w_c = 1$. Щітки на колекторі стоять на

Рис. 3.5. Спрощена схема простої петлевої обмотки



однаковій відстані одна від одної і встановлені суворо по осі полюсів., замикаючи накоротко колекторні пластини секцій, сторони яких розміщені симетрично відносно середини полюса, коли ЕРС в них приблизно дорівнює нулю (ці секції № 1 і 10 виділені на рисунку товстими лініями). Якщо величина вкорочення $\varepsilon = 0$, то сторони цих секцій лежать суворо на геометричній нейтралі, а їх ЕРС дорівнює нулю.

Оскільки секції № 1 і 10 закорочені щітками В1 і В2, вони не приймають участі у створенні ЕРС в обмотці. Верхні 16 секцій кожної паралельної гілки знаходяться під одним полюсом, а нижні - під іншим. Спрощена схема простої петлевої обмотки, показаної на рис. 3.4 зображена на рис. 3.5, де кожний її виток, відповідає реальній секції обмотки.

Як видно з рисунка, струм якоря $I_я$ складається зі струмів паралельних гілок $i_я$ всередині обмотки, і до кожної щітки підходить (чи відходить) струм $2i_я$ двох паралельних гілок. При обертанні якоря секція переходить з однієї паралельної гілки в іншу, замикаючись накоротко щіткою в момент переходу. Кожній парі полюсів відповідають пара щіток і пара паралельних гілок, обмотки.

З розглянутих схем простої петлевої обмотки (рис. 3.4 і 3.5) випливає, що у машини з числом полюсів $2p=4$ число паралельних гілок обмотки $2a = 4$. Але це число полюсів було вибрано в розглянутому прикладі випадково. Відповідно, в загальному випадку число пар паралельних, гілок простої петлевої обмотки дорівнює чісл| пар полюсів, тобто

$$a = p \quad (3.5)$$

а струм якоря

$$I_я = 2ai_я \quad (3.6)$$

Відзначимо, що ЕРС в одній паралельній гілці $E_я$ є також і ЕРС у всій обмотці E число щіток на колекторі машини, з петлевою обмоткою завжди повинно дорівнювати числу її полюсів.

Приклад розрахунку простої петлевої обмотки. Вихідні дані (див. рис. 3.4): число полюсів машини $2p=4$, число пазів $z=18$, число колекторних пластин $K=18$, число витків в секції $w_c = 1$.

Оскільки $K = z_e = z$, то $u_n = 1$, тобто в кожному реальному пазові знаходиться один елементарний, що складається з двох сторін (верхньої і нижньої) секцій.

Згідно (3.3), перший частковий крок $y_1 = 18/4 - \varepsilon$. Щоб уї дорівнювало цілому числу, мінімальна величина вкорочення $\varepsilon=0,5$, тоді $y_1=4$ (провідник, котрий лежить в першому пазові, з'єднується лобою частиною з провідником п'ятого паза. Повне число провідників згідно (3.1а) $N = 2 \cdot 18 = 36$.

Оскільки $y_n = 1$, то з (3.4а) другий частковий крок $y_2 = 1 - 4 = -3$ (його відрахунок на схем проводиться, на відміну від першого часткового кроку не зліва направо, а справа наліво).

Нанесемо на креслення контури полюсів, вкажемо (довільно) їх полярність, а також пронумеруємо всі пази (див. рис. 3.4), Верхній провідник в пазові наведений суцільною, а нижній штриховою лінією. Вважатимемо, що полоси, контури яких нанесено на кресленні, знаходяться над якірною обмоткою, тобто магнітні силові лінії, наприклад «північного» - полюса, входять в площину креслення.

Потім необхідно зобразити колекторні пластини і приєднати верхній провідник першого паза до колекторної пластини, якій присвоїмо №1. Цей провідник задньою лобою частиною з'єднується з нижнім провідником п'ятого паза. Утворилась перша секція; її кінець під'єднаний до колекторної пластини №2, від якої починається друга секція (верхній провідник другого паза). Подальша побудова схеми виконується аналогічно. Остання (18-а) секція повинна замкнута обмотку тобто її кінець (нижній провідник четвертого паза) під'єднується до колекторної пластини №1.

Далі треба зобразити на схем щітки. Відстань між щітками протилежної полярності А і В повинна дорівнювати $K/(2p) = 18/4 = 4.5$ колекторних пластин щітки встановлюються суворо по осі полюсів. Оскільки обмотка виконується для машини з $2p = 4$, щіток має бути чотири. Полярність щіток визначають виходячи з Припущення, що машина працює в режим генератора, а якір обертається в напрям стрілки. Скориставшись правилом правої руки знаходимо напрям ЕРС (струму), яка виникає в секціях, і вказують його стрілками В підсумку виявилось, що щітки А1 та А2, від яких відводиться струму

зовнішнє кало є додатні, а щітки В1 та В2 - від'ємними. Щітки однакової полярності під'єднують паралельно до відповідних виводів.

Розставлення врівноважуючих з'єднань першою роду потрібно виконати, користуючись виразом (3.18).

3.3 Проста хвильова обмотка

Секції хвильової обмотки, під'єдані до колектора, нагадують стилю; звідси і назва обмотки - хвильова (рис. 3.6).

Умова її виконання така: почавши з першої колекторної пластини, потрібно здійснити один обхід якоря, уклавши при цьому p секцій; кінець p -ї секції слід приєднати до пластини, яка розташована поряд з першою. На практиці в більшості зустрічаються обмотки, які не перетинаються. У них обхід якоря закінчується на пластині, що лежить зліва від першої, тобто на K -й пластині. В такій обмотці секції при укладанні послідовно зсуваються на одну колекторну поділку, а остання секція замкнена через першу колекторну пластину з початком обмотки.

У відповідності зі сказаним, за один обхід якоря здійснюється переміщення на $K-1$ колекторних пластин, але так як при цьому укладається p секцій то $py_k = K - 1$, звідки

$$y_k = (K - 1) / p \quad (3.7.)$$

Оскільки $y_k = y$ не може бути дробовим числом, число K повинне бути суворо узгоджене з p .

Другий частковий крок хвильової обмотки відраховують у тому ж напрямі, що і перший; тому тут y_2 - додатна величина: $y_2 = y - y_1 = y_k - y_1$

Ознайомимося з властивостями простої обмотки на прикладі схеми, зображеної на рис. 3.7:

$$y_k = y = (K - 1) / p = (17 - 1) / 2 = 8$$

$$y_1 = K / (2p) - \varepsilon = 17 / 4 - 1 / 4 = 4$$

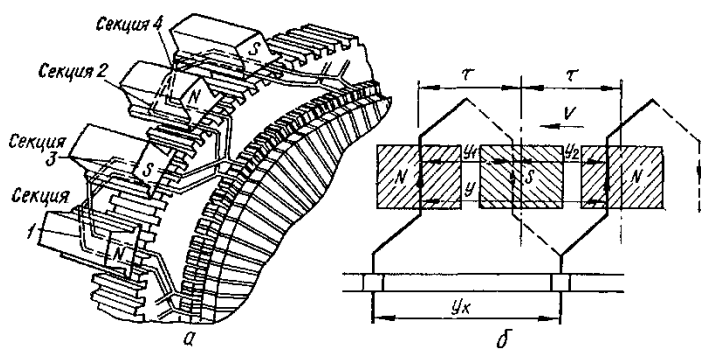


Рис.3.6. Загальний вигляд хвильової обмотки (а) і схема з'єднання її секцій (б)

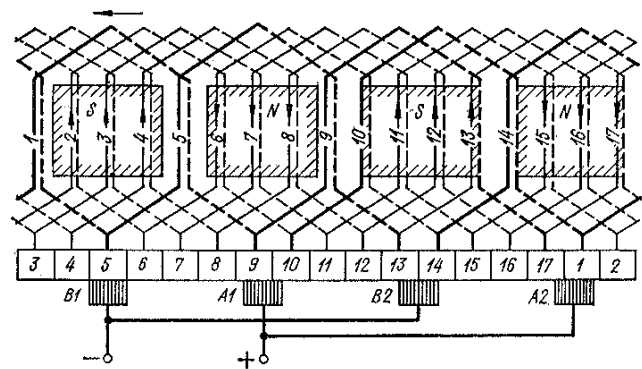


Рис.3.7.Схема простої хвильової обмотки ($2p = 4$
 $z = z_a = S = K = 17$, $y_1 = y_2 = 4$, $y_k = 8$)

Секції № 1, 5, 9, 10 і 14, виділені на рис. 3.7 товстими лініями, на відміну від секцій, петлевої обмотки замикаються накоротко через дві щітки одної полярності і з'єднуювальні проводи між ними.

Прослідкувавши на схемі обмотки за напрямом ЕРС можна побачити, що воно зберігається незмінним в усіх сторонах секцій, розміщених в межах полюсного поділу, тобто в $K / (2p) = S / (2p)$ сторонах секцій. За один обхід якоря, при намотуванні вкладається (з'єднується послідовно) $2p$ сторін секцій; отже, кількість секцій в одній паралельній гілці $S_a = pS / (2p) = S / 2$, а число паралельних гілок обмотки не залежить від числа полюсів машини і дорівнює $2a = S / S_a = 2$, тобто

$$a = 1 \quad (3.9)$$

ЕРС в якорі, як і в петлевої обмотці, визначається ЕРС в одній паралельній гілці, а струм якоря

$$I_a = 2i_a \quad (3.10)$$

На колекторі якоря з хвильовою обмоткою можна встановити лише дві щітки. Наприклад А1 і В1 (див. рис. 3.7) оскільки всі щілини даної полярності з'єдані, між собою секціями, замкнутими накоротко. Ці дві щітки візьмуть на себе весь струм, а секцій, замкнутих накоротко, не буде. А для збереження густини струму під щітками при цьому треба буде вдвічі подовжити решту щіток, що потягне за собою збільшення осьової довжини колектора.

Крім цього при неповному числі щіток можлива деяка несиметрія паралельних гілок обмотки, у котрих різне число секцій $K / (2a)$. Тому звичайно ставлять повний комплект $(2a)$ щіток, маючи на увазі, що у випадку виходу з ладу, наприклад одног щіткотримача в машині, можливо продовжити її

роботу з неповним числом щіток, зменшеними при цьому навантаження струму до значення, що допускається по густині струму щіток для щіток, що залишилися.

3.4. Складні обмотки

Складні, або багатопарові, обмотки можна розглядати як сполучення декількох ($m=2, 3, \dots$) простих обмоток. Кількість паралельних гілок в таких обмотках відповідно в m разів більше кількості гілок в простих обмотках.

Складна петлева обмотка. Кількість пар паралельних гілок в такій обмотці

$$A = mp \quad (3.11)$$

а крок по колектору

$$y_k = m$$

На рис.3.8 зображений елемент обмотки $m = 2$.

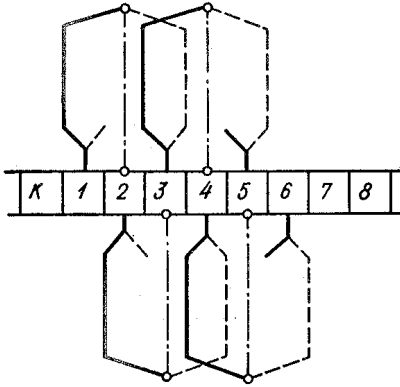


Рис.3.8. Схема складної петлевої обмотки з вирівнювачами третього ряду

Якщо машина має парну кількість колекторних пластин, то така обмотка являє собою сукупність двох окремих обмоток, суміщених на якорі і працюючих паралельно. На рис.3.8. для підкреслення самостійності обох обмоток вони показані по обидві сторони від колектора. Одна обмотка замикається тільки по непарних, а друга – по парних пластинах. Кількість щіток залишається однакою з кількістю полюсів $2p$. Але ширина кожної щітки повинна бути збільшена, щоб дві обмотки могли працювати одночасно. Розглянута обмотка називається *двоходовою двократнозамкненою*.

Якщо кількість колекторних пластин в машині непарна, то закінчивши перший обхід колектора на K -й пластині і перериваючи намотування, виконаємо другий обхід по парних пластинах. В ре-

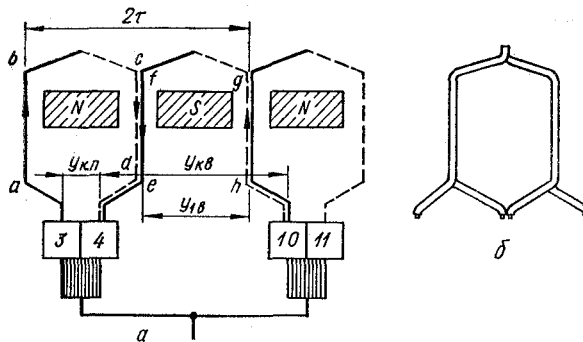


Рис.3.9. Схема «жаб'ячої» обмотки (а) і форма її якірної катушки (б)

зультаті отримаємо обмотку, яку називають *двоходовою однократнозамкненою*.

Складна хвильова обмотка. Якщо, виконуючи хвильову обмотку, після одного обходу колектора прийти до пластини, яка відстає від вихідної на m поділок, то можна отримати m самостійних хвильових обмоток, котрі утворюють одну складну хвильову обмотку. У ній крок по колектору

$$y_k = (K - m) / p \quad (3.13)$$

а число пар паралельних гілок

$$a = m \quad (3.14)$$

Комбінована («жаб'яча») обмотка. Це комбінація промтої петлевої і складної хвильової обмоток, загальна секція яких нагадує жабу (рис.3.9). Обидві обмотки приєднуються до одного і того ж колектора, лежать в одних пазах і складаються з одної кількості секцій. Для того, щоб ЕРС в паралельних гілках, що утворюються петлевою і хвильовою обмотками, дорівнювала одна одній, кількість паралельних їхніх гілок повинна бути однакою. Тому, якщо у петлевої обмотки $a_n = p$, то хвильова повинна мати число ходів $m_{xв} = p$, тоді згідно виразу (3.14) $a_n = a_{xв}$. Крок по колектору має відповідати результуючому, тобто

$$y_{к.п} + y_{к.хв} = K / p$$

3.5. Умови симетрії обмоток.

Кожна пара паралельних гілок обмотки ніби утворює найпростішу машину, що працює паралельно з іншими. Отже, ЕРС в кожній парі паралельних гілок повинні дорівнювати одна одній, що досягається при виконанні таких умов:

кожна пара гілок повинна бути утворена з однакового числа секцій, тобто

1) кожна пара гілок повинна бути утворена з однакового числа секцій, тобто

$$S / a = K / a = \text{ц.ч.} \quad (3.15)$$

2) паралельні гілки повинні розміщуватися в однаковій кількості пазів, тобто

$$z / a = \text{ц.ч.} \quad (3.17)$$

3) паралельні гілки повинні симетрично розміщуватися в магнітному полі полюсів, тобто

$$2p/a = \text{ц.ч.}$$

Як видно зі складних петлевих обмоток умовам симетрії відповідає тільки двоходова двократнозамкнена. Всі інші обмотки у яких $m > 2$, є несиметричні і застосовуються лише у виняткових випадках.

3.6. Зрівнювальні з'єднання.

Теоретично при симетричній обмотці і рівності магнітних потоків всіх полюсів ЕРС у всіх гілках обмотки мають бути однакові, а гілки – рівномірно завантажені трумами. Досвід показує, що звичайно, через ряд причин виникає асиметрія обмотки. Повітряні проміжки під полюсами через неякісне складання, чи звичайний прогин валу машини виходять різними, щітки зміщуються на колекторі, матеріал магнітопроводу станини чи осердь неоднорідний і т.ін.

Неоднакова ЕРС в окремих обмотках веде до появи всередині обмотки зрівнювальних струмів, які протікають через щітку від точок з більшим потенціалом до точок з меншим потенціалом.

Урівнювачі першого порядку. Для прикладу розглянемо обмотку, що показана на рис.3.4. і 3.5. її секції №1 і 10, котрі беруть початок їх пластин у тих самих номерів, що вказані вище, пластина №10 буде мати великий потенціал, від неї до пластини №10 потече зрівнювальний струм, який додатково навантажує обмотку й щітки.

Оскільки опір кола для зрівнювального струму незначний, то струм може досягнути великого значення. Необхідно відвести зрівнювальні струми по іншому, незалежному шляху. Для цієї мети існують зрівнювачі, що з'єднують всередині пельової обмотки екіпотенціальні точки (див.рис.3.4). Вони отримали назву *зрівнювачів першого роду*.

Відстань між екіпотенціальними точками визначає крок зрівнювальних з'єднань

$$Y_{mp} = K/a = K/p \quad (3.18)$$

Урівнювачі можна розміщувати або збоку колектора, з'єднуючи безпосередньо колекторні пластини, або з боку задніх лобових частин. Перше з багатьох міркувань краще.

Теоретично машину треба забезпечити повністю кількістю зрівнювачів, але практично цього ніколи не роблять. Досвід показує, що достатньо мати один, а в великих машинах з важкими умовами роботи – два урівнювача на один реальний паз. Площу поперечного перерізу зрівнювального дроту беруть такою, щоб вона приблизно дорівнювала 25% площі поперечного перерізу обмотки якоря.

Зрівнювальні струми, які протікають, оскільки це струм якоря, є змінним і закон Ленца створюють симетрію основного поля машини, під дією якої воно виникло, що у свою чергу, сприяє послабленню зрівнювальних струмів.

У простих хвилевих обмоток ($a=1$) кожду паралельну гілку входять секції, сторони яких розміщені під усіма полюсами, тому нерівність потоків окремих полюсів не викликає нерівності ЕРС в паралельних гілках. Отже, ці обмотки не потребують зрівнювальних з'єднань.

Урівнювачі другого роду. Складні обмотки, що мають число пар паралельних гілок $a > 1$, являють собою фактично декілька простих обмоток. І якщо навіть забезпечена повна рівність ЕРС у всіх гілках обмотки, все ж таки в результаті нестабільності опору контакту щітка – колектор струми між окремими ходами обмотки можуть розподілятися нерівномірно, внаслідок чого рівномірний розподіл потенціалу по колектору порушується.

Щоб уникнути цього, з'єднують зрівнювачами такі точки різних ходів складної (петлевої або хвильової) обмотки, котрі теоретично мають бути екіпотенціальними. Ці зрівнювачі отримали назву *урівнювачів другого роду*. Їхнє завдання – вирівнювати несиметричний розподіл напруги по колектору.

Складні петлеві обмотки, таким чином, повинні мати обидва види зрівнювачів: першого роду – в кожному ході, другого роду – між ходами.

Урівнювачі третього роду. Завдання цих вирівнювачів, що застосовується в петлевих двоходових обмотках, зводиться до того, щоб при обертанні колектора, щітка закорочувала зразу не всю секцію обмотки, а спочатку одну її половину, а потім – другу. Для цього середину секції з'єднують з екіпотенціальною точкою – колекторною пластиною, розміщеною між кінцями секції (штрих пунктирні лінії на рис.3.8).

Урівнювачі третього порядку значно полегшують роботу щіток, так як індуктивність контуру, що закорочується або розмикається зменшується вдвічі (див. част.5). В складній петлевій обмотці, яка показана на рис.3.8, зрівнювачі третього порядку одночасно відіграють роль зрівнювачів другого роду. Встановленні їх повної кількості, пов'язана зі з'єднанням головок задніх лобових частин з колекторними пластинами, надзвичайно складне.

3.7 ЕРС і електромагнітний момент

ЕРС. В п. 3.2 було встановлено, що ЕРС всієї обмотки якоря дорівнює ЕРС в одній його паралельній гілці: $E = E_{\text{я}}$. Кількість активних провідників обмотки в одній паралельній гілці дорівнює $M/(2a)$. Отже, для визначення $E_{\text{я}}$ необхідно просумувати ЕРС, що наводиться у всіх провідниках, які складають гілку обмотки:

$$E_{\text{я}} = e_1 + e_2 + e_3 + \dots + e_{N/(2a)} = \sum e_i \quad (3.19)$$

ЕРС у провіднику залежить від індукції $B_{\delta x}$ в тому місці повітряного проміжку, де знаходиться провідник:

$$e_x = B_{\delta x} l_{\text{я}} \nu \quad (3.20)$$

Згідно рис. 2.2, умова рівності площ, обмежених лініями 1, 2 і 3 $\alpha \tau B_{\delta} = \tau B_{\delta \text{сеп}}$, де $B_{\delta \text{сеп}}$ - середнє значення індукції на протязі полюсного поділу τ . При достатньо великій кількості провідників під полюсом (див. п. 1.1) можна вважати, що всі провідники перетинаються полем індукцією

$$B_{\delta \text{сеп}} = \alpha B_{\delta} = \Phi_0 / \tau l_{\text{я}} \quad (3.21)$$

З урахуванням (3.20) і (3.21) рівняння (3.19) набуває вигляду

$$(3.22)$$

Довжина полюсної поділки

$$\tau = \pi D_{\text{я}} / (2p) \quad (3.23)$$

Підставивши тепер в (3.22) значення ν з (В.7) і τ з (3.23), після перетворення отримаємо

$$E_{\text{я}} = pnN\Phi_0 / a = E \quad (3.24)$$

Об'єднавши всі стани в (3.24) і позначивши $c_e = p / Na$, отримаємо

$$E = c_e n \Phi_0 \quad (3.25)$$

На значення ЕРС машини, крім вкорочення або подовження обмотки (див. рис. 3.3) впливає і положення щіток: якщо вони розміщені на осі полюсів, тобто контактують зі сторонами секцій, що знаходяться на лінії геометричної нейтралі, то ЕРС найбільша, тому що у всіх секціях кожної паралельної гілки обмотки ЕРС має однаковий напрям. При повороті щіток на деякий кут α від осей полюсів, в паралельних гілках виявляться секції з протилежним напрямом ЕРС, через це, значення $E_{\text{я}}$ зменшиться і буде

$$E_{\text{я}} = E = c_e n \Phi_0 \cos \alpha \quad (3.26)$$

Електромагнітний момент. Якщо позначити через $F_{\text{рез}}$ результуючу електромагнітну силу, що виникає в результаті взаємодії магнітного потоку зі струмом якоря, то електромагнітний момент, що діє на якір зі струмом $I_{\text{я}}$,

$$M_{\text{ем}} = 0.5 F_{\text{рез}} D_{\text{я}} \quad (3.27)$$

Якщо індукція $B_{\delta \text{сеп}}$, струм у провіднику $i_{\text{я}}$ і довжина провідника (якоря) $l_{\text{я}}$, то згідно (В.4), на кожний провідник діє сила $f_{\text{сеп}} = B_{\delta \text{сеп}} I_{\text{я}} i_{\text{я}}$ і тоді

$$F_{\text{рез}} = N f_{\text{сеп}} = B_{\delta \text{сеп}} I_{\text{я}} i_{\text{я}} \quad (3.28)$$

Підставивши тепер (3.28) у (3.27) з урахуванням (3.6) та (3.21) отримаємо

$$(3.29)$$

де - стала.

Електромагнітний момент при роботі машини в режимі двигуна є обертальним, а при роботі в режимі генератора - гальмівний. Електромагнітна потужність визначається за формулами (В.16) - (В.18).

Як бачимо, загальні вирази для ЕРС і електромагнітного моменту (3.25) і (3.29) машини принципово нічим не відрізняються від раніше отриманих виразів (В.8) і (В.12) для найпростішої машини з якірною обмоткою у вигляді одного витка, який обертається в магнітному полі.

3.8 Співставлення обмоток різних типів

При проектуванні електричних машин приходиться зважати на необхідність вибору раціональних розмірів перерізу провідників якоря, щіток і колекторних пластин.

Практикою електромашинобудування встановлено, що струм в паралельній гілці великих машин повинен бути обмежений значенням $i_{\text{я}} = 300 \div 500 \text{ А}$, В тягових машинах звичайно $i_{\text{я}} < 200 \text{ А}$. Через умови виготовлення колекторів поділка не може бути меншою за 4 мм, тобто

$$\beta_k = \pi D_k / K \geq 4 \text{ мм} \quad (3.30)$$

де D_k - діаметр колектора.

Чим вища напруга машини, тим при даній потужності менше її струм і тим більше, згідно (3.24), повинно бути провідників N і, як наслідок, - колекторних, пластин K , тому в таких машинах застосовують обмотку з $a=1$, тобто просту хвильову. Її перевага перед іншими типами обмоток - відсутність зрівнювальних з'єднань.

При підвищенні струму машини виникає необхідність поділу, його на більшу кількість паралельних гілок. Тому в машинах середньої потужності низької напруги (100-300 кВт, 200-600 В) і великої потужності високої напруги (500-1000 кВт, 750-1500 В) застосовують прості петлеві обмотки.

Складні петлеві обмотки використовують в потужних машинах середньої потужності пониженої напруги (більше 1200 кВт і менше 750 В), коли необхідно збільшити кількість паралельних гілок якоря, а кількість полюсів зберегти незмінним. Складні хвильові обмотки застосовують порівняно рідко в машинах середньої потужності підвищеної напруги.

Тягові двигуни електроприводів потужністю до 450 кВт при напрузі 1500 В мають прості хвильові обмотки, а низьковольтні тягові двигуни тепловозів і їх генератори. - прості петлеві обмотки. В потужних тягових двигунах електровозів (більше 500 кВт) використовують петлеві обмотки.

Комбінована ("жаб'яча") обмотка не вимагає зрівнювальних з'єднань: секції складеної хвилевої обмотки виконують у ній роль урівнювачів першого роду для петлевої обмотки, а секції петлевої - є урівнювачами другого роду для складної хвилевої обмотки (див. рис. 3.9). Вважалось також, що вона менш схильна до іскріння і дугоутворення на колекторі. Тому, не дивлячись на відомі труднощі її виготовлення, гірше заповнення пазу, підвищені витрати ізоляційних матеріалів і більш високі робочі температури, "жаб'яча" обмотка широко застосовувалась в потужних електричних машинах.

Приведені всесторонні дослідження показали, однак, що "жаб'яча" обмотка не простою петлевою, зрівнювальні з'єднання першого оду в якій легко виконати. При цьому вартість матеріалів простої петлевої обмотки з урівнювачами не перевищує вартості еквівалентної "жаб'ячої".

Контрольні запитання і задачі

1. Що таке секція якоря? Як пов'язані-між собою кількості, секцій і колекторних пластин в машині постійного струму?
2. Якими параметрами характеризується обмотка якоря?
3. У чому полягає принципова, відмінність між простими петлевими і хвилевими обмотками?
4. У чому полягає відмінність складних обмоток від простих?
5. Які бувають зрівнювальні з'єднання і де вони застосовуються?
6. Якір чотириполюсної машини постійного струму має просту петлеву обмотку з кількістю активних сторін секцій $N=28$ і кількістю витків в секції $w_c = 1$, Визначити кроки обмотки, число колекторних пластин, намалювати її розвернуту схему і розставити щітки. (аналогічно рис. 3.4). Чому дорівнює струм паралельної гілки, якщо струм якоря $I_a=40A$? Вказати екві- потенціальні точки і з'єднати їх урівнювачами.
7. Виконати те ж, що і попередній-задачі, для простої хвилевої обмотки $N = 30$. Чому в цій обмотці є потрібне застосування урівнювачів ?
8. Користуючись даними задачі 4 до част. 2 визначити ЕРС E і напругу U тягового двигуна, якщо в якорі його укладена проста петлева обмотка з кількістю активних сторін секцій $N=738$, спільним опором $K_a=0,012 \text{ Ом}$; частота обертання $n=11 \text{ об/с}$, а струм якоря $I_a=1000 \text{ А}$. Які струм в паралельній гілці і струм в одному щіткотримачі?
9. Як зміниться ЕРС машини, якщо щітки зсунути з осей полюсів на кут $\alpha=18^\circ$
10. Якими міркуваннями слід керуватися при виборі тину обмотки?
11. У чотириполюсного двигуна постійного струму з хвилевою обмоткою кількість пазів якоря $z = 25$, кількість витків в секції $w_c = 4$, кількість елементарних пазів в одному реальному $u_p = 3$ магнітний потік $\Phi = 0.65 \cdot 10^{-2} \text{ Вб}$, струм якоря $I_a = 27 \text{ А}$, частота обертання $n = 25 \text{ об/с}$ Визначити обертальний електромагнітний момент і електромагнітну потужність.

Пояснення; при розв'язанні задачі слід скористатися формулами (3.1), (3.1а), (3.29) і (В.18). Всі величини виражаються в одиницях СІ.

Часина 4. РЕАКЦІЯ ЯКОРЯ МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Магнітне поле машини при навантаженні. Поперечна та повздовжня реакції якоря.

Коли машина працює вхолосту, магнітне поле індуктора симетричне відносно осі її полюсів. Картина цього поля в двополісній машині показана на рис. 4.1а,

Відключимо тепер обмотку збудження, а через явір, щітки встановлені умовно на лінії геометричної нейтралі 1-1 (тобто замикають секції, що знаходяться на цій лінії, як зображено на рис.3.4) пропустимо струм. Поле, яке створюється даним струмом, буде симетричним відносно лінії геометричної нейтралі (рис 4.1б) Отже, явір по обмотці якого тече струм є *електромагнітом*, і його вісь перпендикулярна осі головних полюсів.

В умовах реального навантаження поле індуктора та якоря утворюють результуюче поле, яке можна отримати накладанням обох колів, показаних на рис. 4.1а і б. Характер цього поля представлений на рис.4.1в, де стрілками вказані напрями обертання якоря в режимі генератора (Г) і двигуна (Д).

Вплив поля якоря на поле індуктора називається *реакцією якоря*. При встановленні щіток умовно на лінії геометричної нейтралі 1-1 (див. рис. 4.1) має місце поперечна реакція якоря, та як магнітний потік якоря направлений впоперек поля головних полюсів.

Як видно з рис.4.1в, поперечна реакція якоря послаблює поле індуктора під одним краєм полюса і посилюється під іншим. Внаслідок цього вісь результуючого поля 2-2, яку називають *лінією фізичної нейтралі*, повертається на кут ρ в генераторі у напрямку обертання якоря, а у двигуні – навпаки. Її положення на площині креслення непостійне і залежить від значення реакції якоря, тобто кут β збільшується або зменшується разом зі струмом якоря.

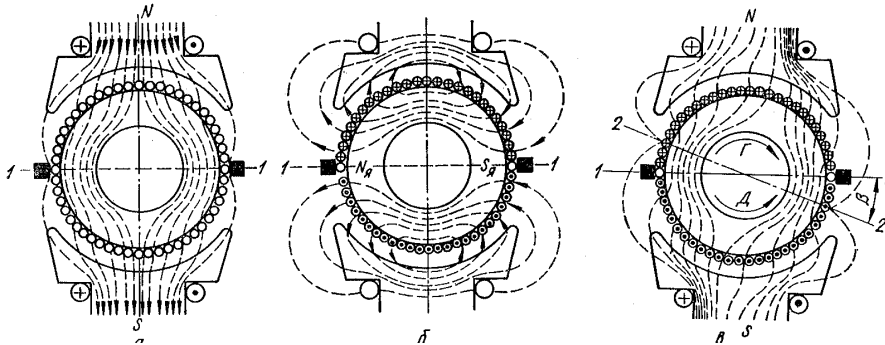


Рис.4.1. Магнітні поля індуктора (а), якоря (б) і результуюче (в) при встановленні щіток умовно на лінії геометричної нейтралі

Індукована при цьому ЕРС на щітках машини буде рівна нулеві, тому практично такий випадок є нереальним. Однак якщо в результаті неточного збирання або внаслідок інших причин щітки будуть зміщені з їх умовного положення на геометричній нейтралі, то буде мати місце як поперечна так і повздовжня реакції якоря.

У сучасних тягових електричних машинах щітки звичайно встановлюють так, щоб вони замикали секції обмоток, що знаходяться на лінії геометричної нейтралі. У цьому випадку має бути тільки поперечна реакція якоря, котрій приділимо особливу увагу.

4.2 Лінійне навантаження та МРС якоря

Найважливішою характеристикою, яка визначає ступінь використання машини, її струмове завантаження, є *лінійне навантаження якоря*. Якщо число провідників якоря N а струм в кожному провіднику (в паралельній гілці) - i_a , то лінійне навантаження

$$A = \frac{Ni_a}{\pi D_a} = \frac{NI_a}{2a\pi D_a} = \frac{NI_a}{4a\pi\tau} \quad (4.1)$$

Величина A , яка вимірюється в амперах на одиницю довжини, кола якоря, обмежується в першу чергу умовами нагріву якоря і досягає значень $(450 \div 500) \cdot 10^2$ А/м.

Визначимо МРС якоря, вважаючи, що його провідники рівномірно розподілені по колу. На рис.12 зображена розвернута машина на подвійній довжині полюсного поділу. Лінії поля якоря розміщені симетрично відносно середньої точки кожної області струму одного напрямку. Нехай одна з таких ліній знаходиться на відстані x від середньої точки, тоді утворений нею контур охоплює повний струм

Якщо щітки на рис.4.1б уявно повернути на 90° , то вісь поля якоря співпадає з віссю полюсів. В цьому випадку буде мати місце *повздовжня* реакція якоря. Вона може намагнічувати якщо щітки на рис.4.1б повернути проти годинникової стрілки, або розмагнічувати - при повороті щіток у зворотній бік.

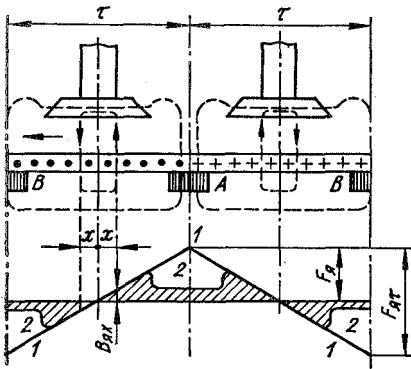


Рис.4.2 Лінії MPC і індукції якоря в машині без додаткових полюсів

$A \cdot 2x$ ампер-провідників, і MPC для цієї лінії дорівнює

$$F_{яx} = A \cdot 2x \quad (4.2)$$

Звідси випливає, що MPC якоря на довжині полюсного поділу змінюється лінійно (лінія 1-1 нарис. 4.2). На осі полюса $x=0$ і $F_{яx} = 0$. Максимуму МДС якоря досягає на лінії геометричної нейтралі ($x = \tau/2$) і на парі полюсів (два зазори):

$$F_{яx} = A \cdot 2\tau/2 = A\tau \quad (4.3)$$

а один полюс (один зазор)

$$F_{яx} = \tau A/2 \quad (4.4)$$

Під краєм полюсного наконечника MPC [аналогічно (4.4)]

$$F_{яb} = b_n A/2 = \alpha\tau A/2 \quad (4.5)$$

Якщо магнітним опором сталі з опором повітряного проміжку знехтувати, то лінія індукції в межах полюсної дуги $B_{яx}$ повторить лінію $F_{яx}$; при відповідному виборі масштабу вони співпадуть.

Дійсно, в цьому випадку

$$F_{яx} = 2xA = B_{яx} \cdot 2\delta_x / \mu_0$$

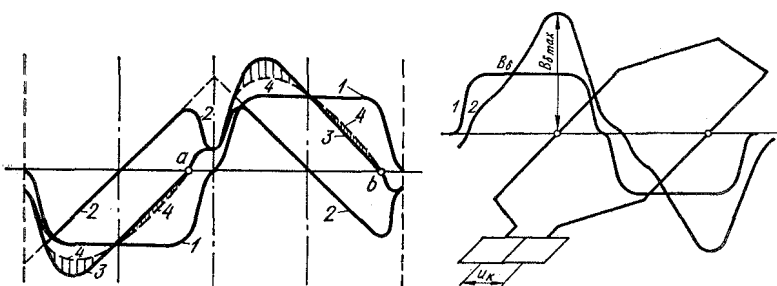
де δ_x - значення повітряного проміжку на відстані x від середньої точки. Звідси

$$B_{яx} = \mu_0 xA / \delta_x \quad (4.6)$$

тобто індукція поля якоря в точці з координатою x обернено пропорційна повітряному проміжку в цій точці. В між полюсному просторі ($x > b_n/2$) внаслідок збільшення довжини магнітних силових ліній в повітрі індукція різко зменшиться, тому і лінія 2 прийме сідлоподібну форму.

4.3 Спотворююча і розмагнічуюча дія поперечної реакції якоря

Результуюче магнітне поле при навантаженні машини (див. рис. 4.1) було отримане накладанням полів якоря і полюсів. Побудуємо тепер криву індукції, результуючого поля. Для цього на рис. 4.3 складемо ординати кривих індукції поля полюсів і поля якоря 2. Результуюча крива 3 має складний вигляд і проходить через нуль не на лінії геометричної нейтралі, а в точках a і b , які визначають положення фізичної нейтралі. Обмежена цією кривою площа (тобто магнітний потік) порівняно з площею, яка обмежена кривою 1, при цьому залишається незмінною. Дійсно, адже на скільки магнітний потік полюса послаблений під одним краєм полюсного наконечника (рис. 4.16), на стільки посилений під другим. Так є, коли магнітне коло машини насичене.



В реальних електричних машинах окремі ділянки магнітного кола, особливо зубці, дуже насичені. Це призводить до того, що зменшення основного магнітного потоку під одним краєм полюса буде більше, ніж його збільшення під іншим: при відсутності насичення вона викликає лише *спотворення кривої індукції в зазорі*, в реальній насиченій машині одночасно зменшується потік полюсів, тобто має місце і *розмагнічуюча дія реакції якоря*.

4.4 Напряга між колекторними пластинами, їх кількість і діаметр колектора

Спотворююча дія поперечної реакції якоря - дуже небажане за своїми наслідками явище. Воно веде перш за все до збільшення напруги між суміжними колекторними пластинами.

Розглянемо секцію простої петлевої обмотки (рис. 4.4). Якщо крива індукції 1 не спотворена, то на більшій частині довжини полюсної поділки напруга між пластинами

$$u_k = 2B_\delta l_y v \quad (4.7)$$

При навантаженні, коли секція знаходиться під краєм полюса, де індукція досягає максимуму

($B_{\delta\max}$ на кривій 2) напруга між пластинами збільшується:

$$u_{k\max} = 2B_{\delta\max} l_y v \quad (4.8)$$

З порівняння виразів (4.7) та (4.8) випливає, що

$$u_{k_{\max}} / u_k = B_{\delta_{\max}} / B_{\delta} \quad (4.9)$$

Нарис. 2,2 справжня крива індукції 1 замінена прямою 3, причому площі, обмежені цими лініями, рівновеликі і згідно (3.21) $B_{\delta_{\text{сєр}}} = \alpha B_{\delta}$. Тому середня напруга між суміжними колекторними пластинами, яке є найважливішою розрахунковою величиною,

$$u_{k_{\text{сєр}}} = 2B_{\delta_{\text{сєр}}} l_{\text{я}} \nu = 2\alpha B_{\delta} l_{\text{я}} \nu$$

Відношення

$$u_{k_{\max}} / u_{k_{\text{сєр}}} = B_{\delta_{\max}} / (\alpha B_{\delta}) = k_{\text{спотв}} \quad (4.11)$$

назвемо *максимальним коефіцієнтом спотворення поля*. В тягових машинах при деяких режимах роботи $k_{\text{спотв}} \approx 2$.

Дослід показує, що при $u_{k_{\max}} = 36 \div 38 \text{ В}$ між колекторними пластинами може виникнути глек і дуга. Тому кількість їх повинна вибиратися так, щоб значення $u_{k_{\text{сєр}}}$ не перевищувало $18-19 \text{ В}$.

Якщо на один полюс машини припадає $K/(2p)$ колекторних пластин, а напруга між щітками дорівнює U , то

$$u_{k_{\text{сєр}}} = \frac{U}{K/(2p)} = \frac{2pU}{K} \quad (4.12)$$

Звідки

$$K = 2pU / u_{k_{\text{сєр}}} \quad (4.13)$$

Таким чином, число колекторних пластин залежить від значення напруги. З виразу (3.30) з урахуванням (4.13) знаходимо

$$D_k = \frac{\beta_k 2pU}{\pi u} \quad (4.14)$$

тобто при заданому значенні β_k діаметр колектора залежить від напруги U .

Дійсно, якщо прийняти згідно (3.30) $\beta_k = 4,5 \text{ мм}$, а для $u_{k_{\text{сєр}}} = 17,2 \text{ В}$, то у чотириполюсного тягового двигуна з напругою $U = 1500 \text{ В}$ діаметр колектора має бути не менше

$$D_k = \frac{4,5 \cdot 4 \cdot 1500}{\pi \cdot 17,2} = 500 \text{ мм}$$

причому ця величина від потужності машини не залежить. Звідси слідує, що напруга U в значній мірі визначає і радіальні розміри машини.

4.5 Заходи по боротьбі зі спотворюючою дією поперечної реакції якоря

Повітряний проміжок. Зі сказаного в п. 4.2 і 4.3 випливає, що спотворення поля в повітряному проміжку тим менше, чим він більший, так як зі збільшенням повітряного проміжку його магнітний потік якоря збільшується.

Але просте збільшення повітряного проміжку веде до збільшення опору основному магнітному потоку. З виразу (4.6) видно, що важливо не просто збільшити проміжок, а збільшити його у тій точці де x , де реакція якоря найбільша, тобто під краєм полюса. У деяких випадках під дією реакції якоря взагалі можлива зміна напрямку ("перекидання") магнітного потоку під одним краєм полюса.

Щоб цього не сталося, повітряний проміжок по формі виготовляють не рівномірним, а таким, що збільшується від центра до країв полюсного наконечника. Під центром полюса, де МРС дорівнює нулю, проміжок роблять невеликим, і тоді його опір основному магнітному потоку практично не збільшується;

Найбільше розповсюдження дістав ексцентричний повітряний проміжок, розмір якого під краєм полюса вдвічі більший, ніж під центром. Проміжки можуть мати іншу форму. Підбираючи їх розміри і конфігурацію можна в тій чи іншій мірі зменшити спотворюючу дію реакції якоря.

Компенсаційна обмотка. Якщо на довжині полюсної поділки створити МРС, що являє собою дзеркальне відображення МРС, то спотворення поля полюсів, а з ним і небезпечного збільшення, напруги між суміжними колекторними пластинами не буде. Таку МРС на довжині полюсної дуги можна отримати за допомогою компенсаційної обмотки, ввімкненої послідовно в коло якоря і вкладеної в пази, виштампувані в наконечниках полюсів (рис. 4,5).

Витки компенсаційної обмотки утворюють стержні, розміщені симетрично відносно лінії геометричної нейтралі в різнополярних полюсах машини. Якщо лінійні навантаження якоря і

компенсаційної обмотки будуть рівними, то вплив реакції якоря на довжині, полюсного наконечника повністю усувається.

Машини, обладнані компенсаційними обмотками, називаються *компенсованими*. Повітряний проміжок в таких машинах по формі роблять рівномірним – концентричним, за значенням мінімальним.

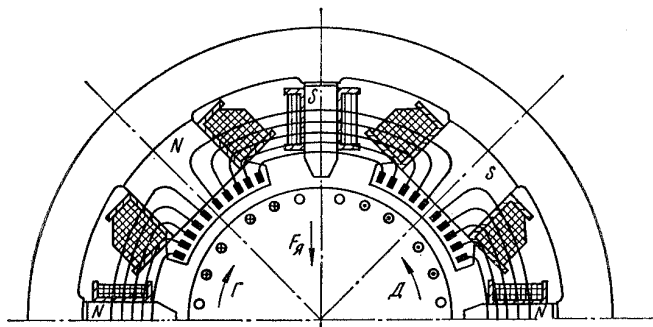


Рис. 4.5 Коштівсацннга обмотка, і додаткові полюси, які встановлюються на електричній машині

компенсаційної обмотки, в цілому кількість міді статора в компенсованих машинах менша, ніж у машинах без компенсаційної обмотки.

додаткові витрати міді на виготовлення

Контрольні запитання і задача

1. Що таке реакція якоря? Яка вона може бути?
2. В яких випадках виникає повздовж?
3. Що таке лінійне навантаження і що воно характеризує?
4. 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. Що таке коефіцієнт спотворення поля?
8. Чим визначається кількість колекторних пластин в машині і діаметр колектора?
9. Визначити діаметр колектора тягового двигуна, користуючись даними і результатами рішення задач 4 до част. 2 і 8 до част. 3.
10. Які можливі заходи по боротьбі із спотворюючою дією поперечної реакції якоря?

Частина 5. Комутація

5.1 Іскріння на колекторі

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 тягових 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, щ вартість ремонту в експлуатації колекторних машин, пов'язана із заміною щіток, обточуванням і шліфуванням колекторів, дуже велика і складає, наприклад у тягових двигунів локомотивів, за один рік близько $\frac{1}{3}$ вартості самої машини. Через це, усунення іскріння чи хоча б зменшення, його інтенсивності може дати істотний техніко-економічний ефект.

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. Слід пам'ятати, що колова швидкість колекторів сучасних двигунів досягає $u_c = 55$ м/с, що висуває надзвичайно високі вимоги до механіки ковзаючого контакту.

б) *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, необхідні визначена температура, вологість, наявність кисню тощо. При цих умовах 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 колек-

тор і щітки швидко зношуються. Ось чому при транспортуванні локомотива в "холодному" стані на довгі відстані необхідно зняти щітки з тягових двигунів;

в) *електромагнітні*, коли має місце, розрив струму в секції, яка під'єднана до двох сусідніх колекторних пластин, по яких ковзає щітка;

г) *потенціальні*, викликані підвищенням напруги між сусідніми колекторними пластинами (див. п. 4.4). Таке іскріння може перерости у *коловий вогонь* (див. п. 5.3).

Всі ці причини, в кінцевому підсумку, пов'язані з обертанням якоря колектора, під час якого секція перемикається з одної паралельної гілки в іншу (див. рис. 3.5). Під час цього перемикання секція замикається щіткою накоротко. А так як напрями струму в паралельних гілках по обидва боки від щітки протилежні, то струм в секції під час зокорочування 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 183-74, якість комутації оцінюють *ступенем іскріння під збігаючим краєм щітки*, з під якого виходять пластини колектора при його обертанні. Бали ступеня іскріння приведені у табл.4.1.

Таблиця 4.1

Ступінь іскріння	Характеристика ступеня іскріння	Стан колектора і щіток
1	Відсутність іскріння (темна комутація)	Відсутність почорніння на колекторі і нагару на щітках.
1 ¼	Незначне точкове іскріння під невеликою частиною щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, які легко видалили протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.
1 ½	Незначне точкове іскріння під великою частиною щітки	Поява слідів почорніння на колекторі, які легко видалили протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.
2	Іскріння під усім краєм щітки. Дозволяється лише при короткочасних поштовхах навантаження і перевантаження.	Поява слідів почорніння на колекторі, які не можна видалили протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.
3	Значне іскріння щітки з наявністю іскор, що вилітають. Дозволяється лише для моментів прямого пуску (без реостатних ступенів) ввімкнення чи реверсування машини, якщо при цьому колектор і щітка залишаються у стані, придатному для роботи.	Значне почорніння на колекторі, яке не можна видалили протиранням поверхні колектора бензином, а також слідів нагару на щітках.

У відповідності до ГОСТ 2582-81 - "Машини електричні обертальні тягові", 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.

5.2 Процес комутації і ЕРС в комутованій секції

Розглянемо процес комутації в секції, що показана на рис. 5.1, вважаючи, що:

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

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. 5.1а), струм в секції $i = +i_a$, струм в першому "півнікові" $i_1 = 2i_a$, 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. 5.1в), при цьому $i = -i_a$, $i_1 = 0$, $i_2 = 2i_a$.

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

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

$$e_L = -L_c di / dt \quad (5.1)$$

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 (див. рис. 5.3а). Крім того, якщо щітка перекриває кілька колекторних пластин ($b_{\omega} > \beta_k$), 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 самоіндукції

$$e_M = M di / dt \quad (5.2)$$

де M - взаємна індуктивність.

Сума ЕРС само- і взаємоіндукції називається *реактивною* ЕРС:

$$e_p = e_L + e_M = -(L_c + M) di / dt = -L_p di / dt \quad (5.3)$$

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

$$L_p = \omega^2 \Lambda \quad (5.4)$$

Щітка закорочує секцію в тому випадку, коли остання знаходиться на лінії геометричної нейтралі машини; тому в секції індуктується ЕРС обертання e_k від зовнішнього магнітного поля. Це зовнішнє поле є результуючим 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 (рис. 5.16), на основі закону Кірхгофа:

$$i_1 r_{\omega 1} - i_2 r_{\omega 2} = e_p + e_k \quad (5.5)$$

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

Рівняння (5.5) 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 (5.5) може бути отриманий при різних спрощуючих умовах.

5.3 Прямолінійна комутація

Уявімо собі, що МРС додаткових полюсів вибрана таким чином, що комутаційна ЕРС дорівнює за значенням і " протилежна за напрямком до реактивної, тобто $e_k = -e_p$. Тоді сума ЕРС в комутаційній секції дорівнюватиме нулеві, а рівняння (5.5) прийме вигляд $i_1 r_{\omega 1} - i_2 r_{\omega 2} = 0$, або

$$i_1 r_{\omega 1} / i_2 r_{\omega 2} = i_2 / i_1 \quad (5.6)$$

Таким чином, нелінійне диференціальне рівняння (5.5) перетворилося у лінійне алгебраїчне рівняння.

Очевидно, опори $i_1 r_{\omega 1}$ і $i_2 r_{\omega 2}$ обернено пропорційні площам контактів щітки з пластинами 1 і 2; відповідно, з урахуванням (5.6)

$$\frac{r_{\omega 1}}{r_{\omega 2}} = \frac{b_{\omega 2} l_{\omega}}{b_{\omega 1} l_{\omega}} = \frac{b_{\omega 2}}{b_{\omega 1}} = \frac{i_2}{i_1} \quad (5.7)$$

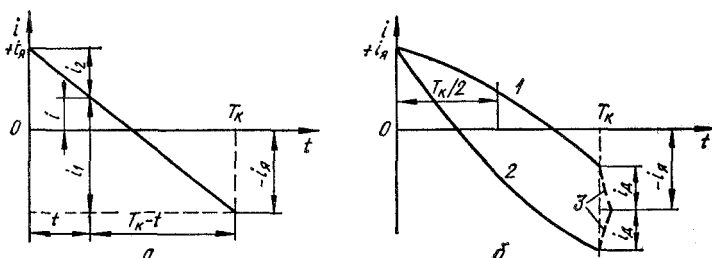


Рис.5.2 Прямолінійна (а), сповільнена і прискорена (б) комутації струму

де $l_{щ}$ - довжина щітки, а $b_{щ1}$ і $b_{щ2}$ відповідно частини ширини щітки, які контактують з пластинами 1 і 2 в якийсь момент часу $0 < t < T_k$. (див. рис. 5.16)

При швидкості v_k будь-яка точка на колі колектора за час T_k проходить шлях $b_{щ}$; значить, для даного моменту часу t справедлива рівність $b_{щ2}t = b_{щ} / T_k$, або

$$b_{щ2} = b_{щ}t / T_k \quad (5.8)$$

Аналогічно $b_{щ1} / (T_k - t) = b_{щ} / T_k$

$$b_{щ1} = b_{щ}(T_k - t) / T_k \quad (5.8)$$

Як видно, струми в "півниках", тобто на відповідних колекторних пластинах, розподіляються прямо пропорційно до часу комутації.

Для цього ж моменту часу, згідно закону Кірхгофа,

$$i_1 = i_a + i; i_2 = i_a - i \quad (5.11)$$

Спільне рішення відносно i (5.10) і (5.11) дає такий результат

$$i = i_a \left(1 - \frac{2t}{T_k} \right) \quad (5.12)$$

Залежність *перехідного струму* секції і від i , згідно виразу (5.12), є лінійною (рис. 5.2а), тому така комутація називається *прямолінійною*.

Відзначимо її основні особливості. Під час $t = T_k / 2$, тобто коли щітка знаходиться суворо посередині на пластинах 1 і 2, $i_1 = i_2$ [це слідує з рівняння (5.10)], а струм в секції в цей час $i = 0$. Потім, при $t > T_k / 2$, змінивши свій напрямок, починає збільшуватись і в останній момент комутації, коли $t = T_k$, колекторна пластина 1 входить з-під збігаючого краю щітки без розриву струму, бо згідно рівнянь (5.11) і (5.12), $i_1 = i_a + i = i_a + i_a(1 - 2T_k / T_k) = 0$. Весь струм в цей час проходить через пластину 2. Оскільки немає розриву струму, не буде іскріння.

Отже у випадку прямолінійної комутації, коли сума ЕРС в секції дорівнює нулеві ($e_k = -e_p$), іскріння через електромагнітні причини відсутнє.

При прямолінійній комутації швидкість зміни струму $di/dt = const$; за час T_k струм в секції змінився на $2i_a$; отже, $di/dt = 2i_a / T_k$.

Реактивна ЕРС при цьому також є постійною і, згідно виразу (5.3), дорівнює

$$e_p = L_p \frac{2i_a}{T_k} \quad (5.13)$$

5.4 Сповільнена і прискорена комутація

В загальному випадку, сума ЕРС в комутуваній секції не дорівнює нулеві, тобто в рівнянні (5.5) $e_p + e_k \neq 0$. Але якщо в короткозамкненій секції є ЕРС, значить в ній з'явиться і струм. Цей струм, який накладається на основний і замикається через колекторні пластини поперек щітки, називається *одатковим поперечним струмом комутації* (струм i_D на рис. 5.16).

Очевидно, при сходженні щітки з пластини 1 відбудеться розрив електричного кола зі струмом i_D , що і викличе іскріння під щіткою. Напрями додаткового поперечною струму комутації і характер комутації при цьому залежать від співвідношення між ЕРС e_p і e_k .

Нехай $|e_p| > |e_k|$, тоді в комутуваній секції залишається небалансна ЕРС Δe_p . За законом Ленца, напрямок ЕРС e_p , а значить і Δe_p повинні бути таким, щоб протидіяти тому явищу, в результаті якого вона виникла. Отже, ЕРС Δe_p і обумовлений нею струм i_D будуть напрямлені так, щоб підтримати протікання в попередньому напрямку струму в секції (див. рис. 5.1б), внаслідок чого лінія зміни струму викривляється, а струм змінює свій напрям пізніше часу $t = T_k / 2$. Така комутація називається

сповільненою (крива 1 на рис. 5.2б). Розривання щіткою струму i_d призводить до іскріння між збігаючим краєм щітки і колекторною пластиною 1.

Якщо $|e_p| < |e_k|$ то додатковий поперечний струм, обумовлений наявністю не балансної ЕРС прагне прискорити процес комутації. Комутація буде *прискореною* (крива 2 нарис. 5.2б), тобто зміна напрямку струму в секції пройде швидше, ніж це вимагається для безіскрової роботи щіток (раніше часу $t = T_k / 2$). Збігаючий край щітки при прискореній комутації розриває струм i_d , отже і в тому випадку буде спостерігатись іскріння під щітками.

В обох випадках комутації (сповільненої і прискореної) в комутованій секції встановлюється струм паралельної гілки ($-i_a$) пізніше часу T_k : перехідний струм i продовжує текти через дугу, що горить (штрихові лінії 3 на рис.5.2б). Ступінь іскріння залежить від значення струму, що розривається, яке в свою чергу визначається значенням не балансової ЕРС Δe_p або Δe_k .

Очевидно, застосування щіток з більшим перехідним опором в місці контакту з колектором зменшує значення струму i_d і ступінь іскріння. В цьому ж напрямку діє розділення щітки на дві частини (див. п.1.2), оскільки перехідний опір між двома половинками щітки трохи зменшує струм i_d .

Чим менше значення реактивної ЕРС, тим легше добитися більш чи менш повної компенсації, тим менше буде струм i_d , що розривається, а отже ступінь іскріння.

5.5 Реактивна ЕРС і способи її зменшення

Ми виявили причину виникнення реактивної ЕРС. Розглянемо тепер фактори, від яких залежить її значення. На рис. 5.3а зображений момент одночасної комутації секцій 1 і 2 петлевої обмотки з повним кроком $y_1 = \tau$. При цьому в секції 1 виникає ЕРС самоіндукції e_{L1} і ЕРС взаємоіндукції e_{M2} , тобто виникає реактивна ЕРС [див. вираз (5.3 б)].

При вкороченій обмотці, коли $y_1 < \tau$ (цьому випадкові відповідає рис. 5.3б), секції 1 і 2 лежать у різних пазах і при комутації не впливають одна на одну, тобто ЕРС $e_M = 0$. Це справедливо лише у випадку $u_n = 1$.

В реальних машинах завжди $u_n > 1$, а щітка перекриває кілька колекторних пластин. Через це повністю виключити в комутованих секціях ЕРС взаємоіндукції неможливо, але все ж вкорочення обмотки істотно знижує значення e_M , а значить і реактивну ЕРС.

Визначимо значення реактивної ЕРС для випадку прямолінійної комутації, для чого у вираз (5.13) підставляємо (5.4), тоді:

$$e_p = \omega^2 \Lambda \frac{2i_a}{T_k} \quad (5.16)$$

Позначимо через λ питому, магнітну провідність на одиницю довжини секції, яка має дві сторони (кожна довжиною $4l$); тоді $\Lambda = 2l_a \lambda$, а вираз (5.14) прийме вигляд

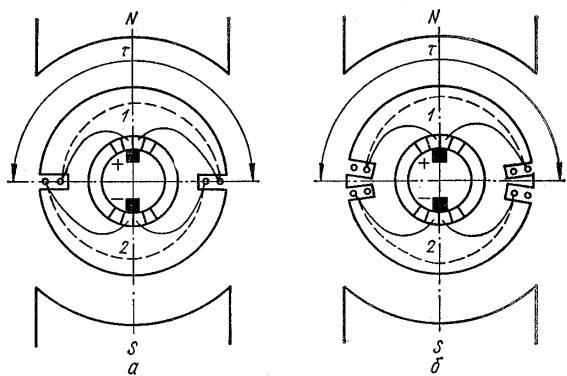
$$e_p = 2l_a \omega_c^2 \lambda \frac{2i_a}{T_k} \quad (5.15)$$

Оскільки колекторна поділка $\beta_k = \pi D_k / K$ а щіткове перекриття $\gamma = b_{щ} / \beta_k = Kb_{щ} / (\pi D_k)$, то $b_{щ} = \gamma \pi D_k / K$; тоді період комутації

$$T_k = \frac{b_{щ}}{v_k} = \frac{\gamma \pi D_k / K}{\pi D_k n} = \frac{\gamma}{nK} \quad (5.16)$$

В реальних машинах щіткове перекриття становить $\gamma = 2.5 \div 4.5$. Щоб мати уявлення про значення T_k , розглянемо тяговий двигун, у якого номінальна частота обертів $n = 720 \text{ Об/хв.} = 12 \text{ Об/с}$, $K = 300$ і

Рис. 5.3 Комутація секцій петлевої обмотки при $z_e = z(u_n = 1)$ а - секції 1 і 2 наводять одна на одну ЕРС взаємоіндукції; б - секції 1 і 2 не впливають одна на одну при комутації



$u=3,6$. При цих умовах $T_k = 36/(300 \cdot 12) = 0.001$ с. У інших машин значення T_k може бути ще менше, тому процес комутації по відношенню до зовнішнього кола машини є періодичним процесом з частотою 1000 Гц і більше.

Згідно (3.1а) кількість витків у секції $w_c = N/(2K)$, тоді $w_c^2 = w_c N/(2K)$. Підставимо це значення, а також вира (5.16) у (5.15), яке помножимо і поділимо на πD_y ; тоді

$$e_p = \gamma l_m \frac{N}{2K} \lambda \frac{2i_a}{K_n} \frac{\pi D_y}{\pi D_y} \quad (5.18)$$

Спростимо цей вираз. Числа $2K$ в чисельнику і знаменнику скоротяться, $i_a N / \pi D_y = A$ є лінійне навантаження [див. вираз (4.1)], $\pi D_y n = v_y$ - колова швидкість якоря. З урахуванням: цього вираз (5.17) приймає вигляд

$$E_p = 2l_y w_c A v_y \lambda / \gamma \quad (5.18)$$

Аналіз виразу (5.18) дозволяє встановити зниження значення e_p . Найголовнішим і незаперечним з них є застосування в потужних машинах з важкими умовами комутації одновиткових секцій ($w_c = 1$). Прагнення до зниження значень A і v_y хоча і призведе до зменшення реактивної ЕРС, але в цей же час погіршує використання матеріалів у машині і викликає збільшення її розмірів.

Істотний вплив на зменшення реактивної ЕРС може здійснити зменшення магнітопровідності λ потоку, зчепленого з секцією, що замикається навколо провідника. Через це, попри інші рівні умови машина з більш широким і неглибоким пазом, який здійснює більший опір для цього потоку, матиме менше значення λ , ніж машина з вузьким і глибоким пазом.

Значне зниження значення e_p і як результат покращення умов комутації досягнуті в безпазових якорях тягових електродвигунів. Ці якорі є гладкими барабанами, на яких укладаються обмотки, що скріплюються бандажуванням склопластиками, які пропитуються в епоксидному компаунді гарячого затвердіння і утворюють ізоляцію типу "моноліт". Відсутність зубців у гладких якорях призводить до значного зниження значення λ , а значить і реактивної ЕРС.

Збільшення щіткового перекриття γ хоча і призводить до підвищення впливу взаємної індукції через збільшення кількості одночасно комутуваних секцій, але в незначній мірі, і значення e_p все ж зменшується.

Значне збільшення перекриття γ не допускається з причин, котрі викладені в п. 5.7 [формула.(5.23)].

5.6 Комутаційна ЕРС і додаткові полюси

Виконання умов прямолінійної безіскрової комутації вимагає внесення в комутовану секцію ЕРС $e_k = -e_p$. Це завдання виконують додаткові полюси, встановлені на лінії геометричної нейтралі, тобто там, де здійснюється комутація (див. рис. 4.5). В повітряному проміжку під додатковими полюсами створюється комутаційне магнітне поле з індукцією B_k котре і створює ЕРС e_k . Згідно закону Фарадея

$$E_k = 2B_k l_y w_c v_y \quad (5.19)$$

Щоб витримати умову безіскрової прямолінійної комутації необхідно зрівняти праві частини виразів (5.18) і (5.19); тоді

$$B_k = -A\lambda / \gamma \quad (5.20)$$

Знак "мінус" забезпечується встановленням відповідної полярності додаткових полюсів; оскільки лінійне навантаження пропорційне струмові якоря I_a , індукція B_k також має бути йому пропорційна, тобто

$$B_k \propto I_a \quad (5.20a)$$

Для забезпечення цієї умови *додаткові полюси вмикають послідовно з якорем, а їх магнітне коло виконують ненасиченим.*

Остання вимога забезпечується, якщо додатковий полюс має найбільші розміри. Крім цього повітряний проміжок під додатковими полюсами доцільно розділити на дві частини, встановивши додатково немагнітну прокладку між полюсами і станиною (рис. 5.4). Цей другий "повітряний проміжок" більш ефективний, так як він створює додатковий опір потокові розсіювання Φ_σ , що насичує осердя полюса.

Все ж не дивлячись на заходи, що приймаються по розслабленню магнітного кола додаткових полюсів, забезпечити лінійну залежність між індукцією B_k і струмом I_a у всьому діапазоні навантажень не вдається. Ця залежність залишається криволінійною, все більше і більше відхиляючись від прямої зі збільшенням струму I_a .

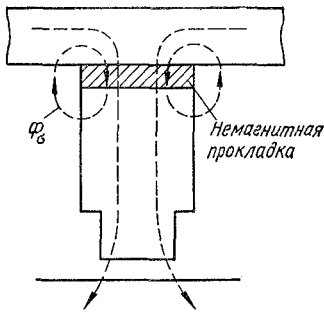


Рис. 5.4 Встановлення немагнітної прокладки між додатковим полюсом і статорною

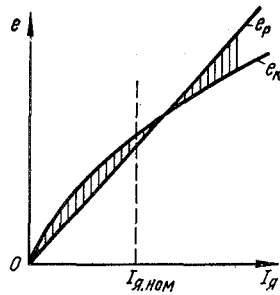


Рис. 5.5 Залежності реактивної і комутаційної ЕРС від струму якоря

На рис. 5.5 показаний графік зміни ЕРС e_p і e_k в залежності від струму якоря I_a . Якщо, згідно виразу (5.18), між e_p і I_a все ж зберігається лінійна залежність у всьому діапазоні навантажень, то між e_k і I_a прямої залежності немає. Це одна з причин, через яку в комутованій секції не вдається виконати умову

$e_k = -e_p$ у всьому діапазоні навантажень. А якщо це так, то додаткові полюси необхідно налагодити таким чином, щоб небалансова ЕРС (заштрихована частина на рис. 5.5) була най-

меншою. Налаштування додаткових полюсів здійснюють зміною кількості витків, або зміною розмірів повітряного проміжку або немагнітної прокладки між полюсом і статорною. При цьому змінюється їх магнітний потік, індукція B_k , а отже, і ЕРС e_k . Її значення в номінальному режимі треба вибрати трошки більшим реактивної ЕРС, що забезпечить прискорену комутацію.

Дійсно, якщо при номінальному струмі $I_{a,ном}$ встановити однакові ЕРС - реактивну і комутаційну (привести криву e_k на рис. 5.5 трохи нижче), то при струмах більших номінального, тобто в дуже тяжких режимах роботи, реактивна ЕРС стане значно більшою від комутаційної і ця дуже сповільнена комутація призведе до інтенсивного іскріння. Нагадаємо, що в діапазоні великих струмів спотворююча дія поперечної реакції якоря дуже велика, що може призвести ще і до іскріння через потенціальні причини. А це вже негативно впливатиме на подальшу роботу машини.

В умовах експлуатації нерівність між реактивною і комутаційною ЕРС викликана цілим рядом причин. До них відносяться: технологічні допуски при виготовленні колектора, встановлення щіткотримачів і самих додаткових полюсів; перевантаження по струму і перевищення частоти обертання (буксування тягових двигунів); нестабільність щіткового контакту, через що змінюється площа контакту щітки з колектором (період комутації T_k) або навіть повний відрив щітки від колектора при проході, наприклад, локомотивом нерівностей дороги. Всі ці причини збільшують і без того існуючу нерівність між e_p і e_k , а значить сприяють більш інтенсивному іскрінню.

Роль додаткових полюсів не обмежена лише завдання наведення ЕРС e_k ; індукція B_k , що потрібна для цього, звичайно мала, оскільки реактивна і комутаційна ЕРС як правило не перевищують 4-6 В. Але МРС додаткових полюсів має бути дуже великою, тоді як вона напрямлена проти поперечної реакції якоря і в певній мірі її компенсує. Це особливо важливо, якщо в машині немає компенсаційної обмотки.

Виходячи з сказаного вище можна визначити полярність додаткових полюсів: в режимі генератора вона має бути такою ж, як і у наступного за ним у напрямі обертання головного полюса; у режимі двигуна - як і у попереднього йому за напрямком обертання головного полюса.

5.7 Зона комутації

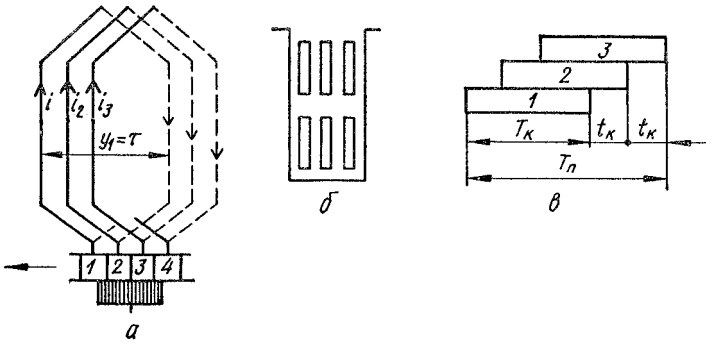
Іскріння під щітку може виникнути, якщо комутувана секція попадає в зону сильного поля головних полюсів, і щітка вимушена розмикати коло з великим струмом. Тому комутація має починатися після виходу секції з-під поля головних полюсів і закінчуватися скоріше, ніж вона попадає під наступний головний полюс.

Дуга кола якоря, котру проходить вісь паза впродовж часу комутації всіх його секцій, називається зоною комутації.

Розглянемо приклад комутації діаметральної петлевої обмотки, схема якої зображена рис 5,6 а і б. Всі секції пазу послідовно щіткою, а кожна наступна, закінчує комутацію через час t_k після попередньої. Період комутації кожної секції - T_k а повний період комутації - T_n . На діаграмі комутації (рис.5,6в) прямокутниками показаний розділ часу при прямолінійній комутації кожної секції пазу. Видно, що коли ще продовжується комутація першої секції, коротиться друга, потім-третя.

Якщо в загальному випадку кількість колекторних пластин, що при ходяться на один паз $u_n = K / z$, то

$$T_n = T_k + (u_n - 1)t_k \quad (5.21)$$



Неважко зауважити, що коли колекторна поділлка, $\beta_k = \pi D_k / K$, а колова швидкість колектора $v_k = \pi D n$, то зсув по часу комутації кожної наступної секції $t_k = \beta_k / v_k = 1 / (Kn)$. З урахуванням цього, а також формули (5.16), вираз (5.21) дістане вигляд

$$T_n = \frac{\gamma}{Km} + \frac{u_n - 1}{Kn} = \frac{\gamma + u_n - 1}{Kn} \quad (5.22)$$

Рис. 5.6 Схема діаметральної петлевої обмотки (а), розташування секцій в пазові при $u_n = 3$ (б) і діаграма їх комутації (в)

Ширину зони комутації можна визначити, помноживши T_n на швидкість $v_a = \pi D_a n$; тоді

$$b_{з.к.} = \pi D_a (\gamma + u_n - 1) / K \quad (5.23)$$

Її можна виразити також через ширину щітки $b_{щ}$ і колекторний поділ β_k ; оскільки $\gamma = b_{щ} / \beta_k$ а $\pi D_a / K = \beta_k D_a / D_k$,

$$b_{з.к.} = \left[b_{щ} + (u_n - 1) \beta_k \right] \frac{D_a}{D_k} \quad (5.23,а)$$

При вкороченні обмотки на величину ε час комутації пазу збільшиться на εt_k крім цього, для обмотки будь-якого типу у виразі (5.23) одиницю варто змінити відношення a / p (для петлевої обмотки $a / p = 1$). Тоді в загальному вигляді

$$b_{з.к.} = \left[b_{щ} + \left(u_n - \frac{a}{p} - \varepsilon \right) \beta_k \right] \frac{D_a}{D_k} \quad (5.24)$$

Комутація має початися і закінчитися поблизу геометричної нейтралі і, як показує практика, зона комутації не повинна перевищувати половини відстані між наконечниками головних полюсів.

Якщо полюсна поділлка τ , а довжина полюсної дуги $b_n = a\tau$ (див. п. 2.1), то відстань між наконечниками полюсів $\tau - b_n = \tau - a\tau = \tau(1 - a)$.

Таким чином, необхідно витримати умову

$$b_{з.к.} \leq 0.5\tau(1 - a) \quad (5.25)$$

На основі умови (5.25) необхідно правильно вибрати ширину щітки (або перекриття γ), не допускаючи її надмірного збільшення і узгоджуючи з коефіцієнтом полюсного перекриття a , не дивлячись на те, що при збільшенні γ зменшується реактивна ЕРС.

5.8 Коловий вогонь і причини його виникнення

Вище відзначалося, що іскріння на колекторі може бути викликане також потенціальними причинами, причому воно може перерости в коловий вогонь.

Перекриття потужною електричною дугою поверхні колектора між щітками протилежної полярності або одним з щіткотримачів і, корпусом називають *коловим вогнем*. Коловий вогонь завжди небезпечний, бо він призводить до серйозних пошкоджень електричної машини. Виникнення колового вогню супроводжується сильним світловим і звуковим ефектом, у великих машинах це подібно до бомби.

Причиною виникнення колового вогню є надмірно висока напруга між суміжними колекторними пластинами, котрі можуть вижитися замкнутими через "місток", утворений вугільним пилом: чи більшими уламками щітки. По "містку" тече струм, він згоряє і виникає коротка дуга, що рівноцінно замиканню частини машини, що складається з одної секції на малий опір. Струм, який збільшується, викликає розплавлені колекторних пластин, а сама дуга, збільшуючись, замикає і сусідні пластини.

Якщо ж напруга, між суміжними колекторними пластинами не перевищує 33-34 В, то навіть при вигоранні "містка" коловий вогонь не виникає. Не можна, як це часто допускають, пояснювати можливість виникнення колового вогню підвищеною іонізацією колекторної камери від сильного іскріння.

Схема дуже швидкоплинного (0,01-0,001 с) процесу переростання одиничного спалаху в коловий вогонь зображена на рис. 5.7, де 1-первинна дуга, 2-гази і пари міді, 3-потужна дуга. Така швидкоплинність призводить до того, що не вдається створити, від нього хоч якийсь захист.

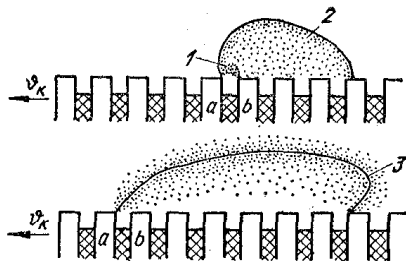


Рис. 5.7. Виникнення колового вогню на колекторі

Струм в дузі, що виник через наявність провідного "містка" між пластинами *a* і *b*, швидко збільшується і простір над колектором іонізується, тобто заповнюється парами розпеченої міді. Колектор обертається, дуга перекидає кілька пластин, струм росте. Подальший розвиток процесу носить випадковий характер. Процес на рис. 5.7 знятий при швидкості 4000 кадрів за секунду.

Очевидно, чим тонша міжламельна ізоляція і чим менший розмір

колекторної поділки, тим менш *a*. напруга між колекторними пластинами може бути допущена Критерієм тут служить значення напруги на одиницю довжини кола колектора

$$E_{\max} = u_{k,\max} / \beta_k \leq 8 \div 9 \text{ В/мм} \quad (\text{див. п. 4.4})$$

Іскріння, під щітками сприяє виникненню колового вогню, бо при цьому відбувається інтенсивне зношення щітки, з'являється ймовірність утворення "містків". Але саме по собі іскріння з витягуванням дуги з-під щітки як вважалося довгий час не призводить до колового вогню. Так, коли у тягового двигуна на стенді, вимкнули обмотку додаткових полюсів, то сильне і достатньо довготривале іскріння, що виникло внаслідок, цього, не привело до колового вогню. Але в іншому, випадку на потужному генераторі, який працює в режимі холостого ходу зі знятими щітками, коловий вогонь виникав при достатньо високій напрузі між колекторними пластинами, коли між останнім уламком щітки створювали "місток" або допоміжним електродом штучно запалювали коротку дугу.

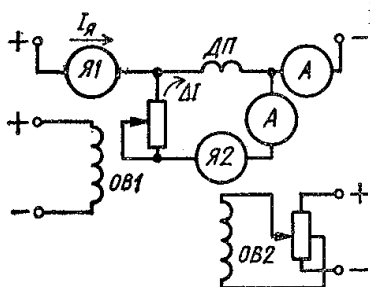
Отже, для зменшення ймовірності появи колового вогню необхідно встановлювати оптимальну міжламельну напругу і покращувати стан вузла щітка-колектор.

Важливо утримувати в чистоті поверхню колектора, міканітових манжетів, систематично чистити канавки між колекторними пластинами і щіткотримачі, видаляти з поверхні колектора сліди підпалів, задирки, своєчасно міняти зношені і поколоті щітки, підтримувати нормальний тиск натискних пальців. Схильність тягових двигунів до колових вогнів підвищується при незадовільній динаміці щіток, особливо при проходженні колісної пари стиків на рейках. Бажано мати найбільш еластичний натискний пристрій, що притискає щітки до колектора.

5.9 Експериментальна перевірка і налагодження додаткових полюсів

Розрахунок комутації і додаткових полюсів через складності комутаційного процесу є наближеним. Тому при проведенні кваліфікаційних випробувань, котрим згідно ГОСТ 2582-81 піддають машини нових типів, визначають область найближчої комутації (ГОСТ 10159-79), котра 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 безіскрової комутації $e_k = -e_p$.

Для такого налагодження додаткових полюсів збирають схему (рис. 5.8), де Я1- якір машини, що випробовується, ОВ1 - її обмотка збудження, ДП - обмотка додаткових полюсів; Я2 - якір допоміжного генератора, ОВ2 - обмотка збудження. За допомогою допоміжного генератора обмотку ДП живлять додатковим струмом ($\pm \Delta I$), який називають *струмом підсилення*; таким чином, через обмотку ДП проходить струм $I_\Sigma = \pm \Delta I$, що дозволяє зняти залежності $+\Delta I = f(I_\Sigma)$ і $-\Delta I = f(I_\Sigma)$ - *криві підживлення* - в межах навантажень від холостого ходу до номінальної і вище (рис. 5.9), при яких комутація відповідає степені іскріння 1 (можна зняти криві підживлення для будь-якого ступеня іскріння: 1 ¼, 1 ½ і 2)

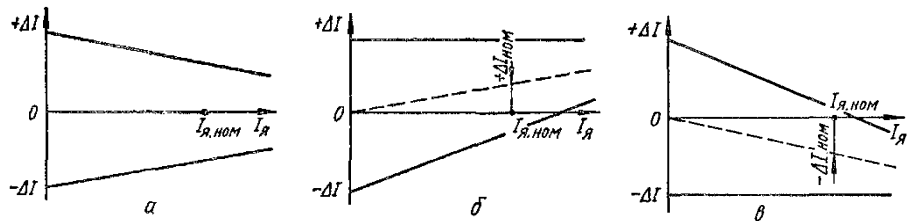


Дослід починають з режиму холостого ходу, коли $I_a = 0$ і $e_p = 0$. Підживлюючи додаткові полюси спочатку в одному, а потім в іншому напрямі встановлюють значення струмів $+\Delta I$ і $-\Delta I$, при яких починається перше, помітне на око іскріння. Причиною цього іскріння є струм в короткозамкненій секції, викликаний комутаційною ЕРС e_k , створеною індукцією B_k тобто струмами підживлення. У

правильно спроектованій і ідеально виготовленій машині

Рис. 5.8. Схема дня налагодження додаткових полюсів

Рис. 5.9 Криві її живлення додаткових полюсів



струми $+\Delta I$ і $-\Delta I$ при $I_a = 0$ дорівнюють один одному.

Потім машину навантажують деяким струмом I_a і знову визначають струми $+\Delta I$ і $-\Delta I$, що призводять до іскріння.

Якщо б машина була ідеальною і завжди зберігалась умова $e_k = -e_p$, то при будь-яких струмах I_a струми підживлення, що викликають іскріння, залишались би незмінними, а криві підживлення мали б вигляд двох прямих, паралельних осі абсцис, що знаходяться від неї на однаковій відстані, що визначається значеннями $+\Delta I$ і $-\Delta I$, отриманими при $I_a = 0$. Але при будь-якому струмі $I_a > 0$, як це в п.5.б, в комутуваній секції є нерівність між e_p і e_k , тобто існує деяка небалансна ЕРС Δe , і вона збільшується з ростом струму I_a або частоти обертання n . Тому при зростанні струму I_a значення $+\Delta I$ і $-\Delta I$, що викликають перше іскріння, зменшуються і криві підживлення утворюють область безіскрової роботи, симетричну осі абсцис (рис. 5.9 а).

Якщо в машині додаткові полюси не сильні ($|e_k| < |e_p|$, комутація сповільнена), то для отримання області безіскрової роботи у всьому діапазоні навантажень приходиться підживлювати додаткові полюси струмами $+\Delta I$. При цьому середня лінія області лежить вище осі абсцис (рис. 5.9б). При надмірно сильних додаткових полюсах ($|e_k| > |e_p|$, комутація прискорена, струми підживлення $-\Delta I$) середня лінія області безіскрової роботи відхилиться вниз (рис. 5.9в).

Повторення досліду при збільшеній частоті оберті дозволяє отримати криві підживлення, що утворюють вузьку область безіскрової роботи.

Якщо число витків додаткових полюсів w_d , то потрібну його зміну можна визначити за результатами досліду:

$$\pm \Delta \omega_d = \frac{\pm \Delta I_{ном}}{I_{я,ном}} \omega_d$$

У великих машинах число w_d мале Δw_d може складало дробову величину, округлення якого призведе до великої похибки. У такому випадку міняють розміри повітряного-проміжку.

Ширина області безіскрової роботи характеризує комутаційну стійкість машини при випадкових відхиленнях умов комутації від оптимальних. Наприклад різкий накидання в експлуатації струму навантаження від $I_{я1}$ до $I_{я2}$ на $+\Delta I = I_{я2} - I_{я1}$ практично еквівалентний випадку зняття точки на кривій підживлення при струмі $I_{я1}$. Очевидно, чим більше при цьому значення струму ΔI (чим ширша область безіскрової роботи), тим стійкіша комутація машини при перехідних режимах в умовах експлуатації.

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 тягових машинах?
4. Які ЕРС виникають в комутуваній секції. Яка їх природа виникнення і відмінності?
5. Що таке прямолінійна комутація, чому її називають безіскровою? Яка при цьому реактивна ЕРС?
6. Що таке сповільнена і прискорена комутація, чому дня 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 зона комутації від чого вона залежить і чим обмежується?
12. Що таке коловий вогонь; чому він може виникнути; як відвернути його появу?
13. Як можна налагодити додаткові полюси? Що характеризує ширина області безіскрової роботи?

Частина 6. Генератори постійного струму

6.1. Способи збудження машин постійного струму

Робота і властивості електричних машин постійного струму (як генераторів, так і двигунів) в значній мірі залежать від способу збудження з них магнітного потоку. Дійсно, магнітний потік входить множителем як у вираження (3.25) ЕРС, так і у виразі (3.19) електромагнітного моменту, тому необхідно знати, як створюється магнітний потік, від яких величин він залежить, як і з якою метою потрібно змінювати його значення.

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

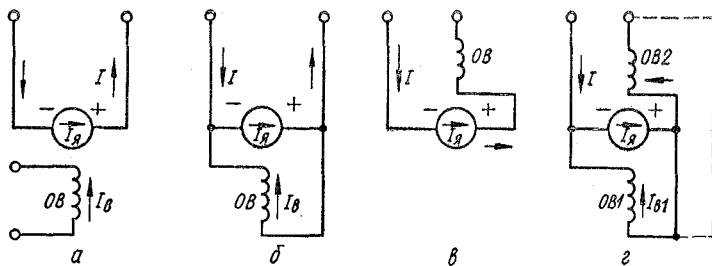
Схеми всіх чотирьох типів машин зображені відповідно на рис. 6.1.

Всі ці електричні машини мають однакову будову і відрізняються лиш виконанням обмотки збудження (03). Обмотки незалежного і паралельного збудження виготовляють з великою кількістю витків, з дроту малого перерізу, а обмотку послідовного збудження з малим числом витків з дроту великого перерізу.

Існують також машини невеликої потужності, магнітне поле у яких створюється або тільки постійними магнітами, або ще і обмотками збудження, що живляться електричним струмом.

Властивості перших подібні до властивостей машин незалежного, а других змішаного чи незалежного збудження (в залежності від способу під'єднання обмотки збудження).

В усіх машинах на збудження витрачається від 0,5% до 5% номінальної потужності машини. Тут перше значення відноситься до дуже малих машин, а друге - до машин потужністю близько 1 кВт.



Як видно з рис. 6.1, значення струму збудження I_z , машини незалежного збудження не залежить

від струму якоря і визначається напругою

джерела струму. Для регулювання струму I_z

послідовно в коло обмотки збудження маши-

ни вмикають резистор. У машини паралельного збудження, згідно закону Ома,

$$I_z = U_r (R_z + R_p) \quad (6.1)$$

де R_z - опір обмотки збудження, а R_p - послідовно з нею ввімкненого регулювального резистора.

В машинах, послідовного збудження $I_z = I_a$.

Згідно ГОСТ 2582-81, виводи всіх обмоток маркують таким чином:

Я1 і *Я2* - початок і кінець обмотки якоря;

С1 і *С2* - початок, і кінець послідовної (серієсної) обмотки збудження;

Ш1 і *Ш.2* - початок і кінець паралельної (шунтової) обмотки збудження;

К1 і *К2* - початок і кінець компенсаційної обмотки;

$H1$ і $H2$ - початок, і кінець обмотки незалежного збудження;

$D1$ і $D2$ - початок і кінець обмотки додаткових полюсів.

Можливі Випадки, коли машина має декілька однойменних обмоток. У цьому випадку їм початок і кінець після букв-позначень повинні мати дві цифри - перша вказує порядковий номер обмотки, а друга - початок (1) або кінець (2). Наприклад, початок другої паралельної обмотки збудження буде мати маркування $III21$.

6.2 Генератор незалежного збудження

Характеристики генератора являють собою графічне зображення залежностей між основними величинами, що визначають його робочі властивості. Схеми, і пояснення по практичному зняттю характеристик подані у відповідних довідниках чи відповідних вказівках по проведенню лабораторних робіт. Тут розглянуто тільки питання принципового характеру.

Основними характеристиками генераторів постійного струму є характеристики холостого ходу, навантажувальна, зовнішня і регульовальна. Всі вони представляють собою різноманітні функціональні залежності при одній загальній умові; частота обертів генератора $n = const$.

Характеристика холостого ходу. Це залежність ЕРС обмотки якоря при розімкненому зовнішньому колі від струму збудження, тобто $E_0 = f(I_3)$ при $I_a = 0$. При холостому ході, коли коло навантаження розімкнене, напруга на затискачах генератора дорівнює ЕРС, тобто $U_0 = E_0 = c_e n \Phi_0 = c'_e \Phi_0$, де $c'_e = c_e n$, оскільки $n = const$. Значить, напруга, U_0 залежить лише від магнітного потоку Φ_0 , тобто від струму збудження I_3 . Тому характеристика $U_0 = E_0 = f(I_3)$, представлена, кривою 1 на рис. 6.2а, аналогічна магнітній характеристиці $\Phi_0 = f(I_3)$ нарис. 2.5.

Для зняття характеристик холостого ходу спочатку встановлюють струм збудження таким, щоб $U_0 = (1.2 \div 1.25)U_{ном}$, потім зменшують струм I_3 до нуля і знову збільшують до початкового значення. При цьому отримуються спадаюча і зростаюча гілки характеристики, що виходять з точки. Розходження цих гілок пояснюється наявністю гістерезису (петля гістерезису) в магнітопроводі машини. При $I_3 = 0$ вольтметр зафіксує "залишкову" напругу (або ЕРС), що дорівнює 1-3% від $U_{ном}$, наявність $E_{ост}$ пояснюється залишковим магнетизмом у сталі полюсів.

Для практичних цілей використовується не та чи інша гілка характеристики, а середня лінія, проведена між ними. За нею роблять висновок про властивості магнітного кола машини, ступінь її насичення, деякі техніко-економічні показники, як про це вже говорилося в п. 2.3.

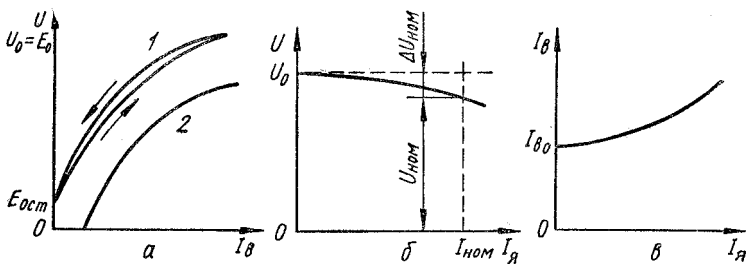


Рис. 6.2. Характеристики генератора незалежного збудження

тому характеристика навантаження розміщується нижче і правіше від характеристики холостого ходу.

Для зняття даної характеристики генератору надають номінальну частоту обертів, а потім, поступово виводять регульовальний резистор в колі збудження, підвищують ЕРС до значення що перевищує номінальну напругу на 10-15%. Після цього вмикають навантаження і встановлюють номінальний струм в ньому. При номінальних значеннях струму і напруги записують декілька показів амперметра, в колі збудження.

Як видно з графіка, характеристика навантаження подібна до характеристики холостого ходу, тому що остання є окремим випадком характеристики навантаження, коли струм навантаження дорівнює нулеві.

Знання характеристик навантаження необхідне для побудови інших характеристик, у тому числі характеристик гальмівних режимів локомотивів, коли їх двигуни працюють в режимі, генератора.

Зовнішня характеристика. Це залежність напруги на виводах якоря генератора від струму навантаження $U_r = f(I_a)$ (рис. 6.2б) при незмінному струмі збудження. В режимі навантаження, згідно (В.10), $U_r = E - I_a R_a$, де в даному випадку під R_a слід розуміти опір всіх обмоток, ввімкнених послідовно в коло якоря, тобто самого якоря, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки.

Навантажувальна характеристика. Це залежність напруги на виводах якоря генератора від струму збудження при постійному струмі навантаження, тобто $U_r = f(I_3)$ при $I_a = const$ (крива 2 на рис. 6.2а).

Напруга на затискачах генератора завжди ЕРС внаслідок падіння напруги в колі якоря і розмагнічуючої дії реакції якоря,

Як бачимо при збільшенні струму навантаження напруга R_a зменшується через дві причини: 1) через падіння напруги у внутрішньому опорі R_a машини; 2) через зменшення ЕРС E в результаті розмагнічуючої дії реакції якоря. Дійсно, $E = c_e n \Phi$, але під впливом реакції якоря магнітний потік Φ зменшується (див. п.4.3).

При знятті даних для побудови зовнішньої характеристики генератор навантажують до його номінального струму $I_{ном}$ при номінальній напрузі $U_{ном}$ а потім зменшують навантаження майже до напруги холостого ходу U_0 (при $I_a = 0$). Одночасно визначають зміни напруги (при переході від номінального навантаження до холостого ходу) у відсотках

$$\Delta U = \frac{U_0 - U_{ном}}{U_{ном}} \cdot 100 \text{ (\%)}$$

яке складає 5-15%.

Регулювальна характеристика. Це залежність струму збудження від струму навантаження $I_z = f(I_a)$ при $U_r = const$ (рис. 6.2в). Вона показує, яким чином слід регулювати струм збудження, щоб підтримати постійною напругу генератора при зміні навантаження.

Необхідність збільшення струму збудження для підтримання постійності напруги при збільшенні навантаження очевидна: потрібно збільшити магнітний потік Φ , тобто ЕРС E , щоб напруга залишалась завжди рівною номінальній.

Регулювальну характеристику, як і всі інші, можна зняти, зібравши схему на рис. 6.3. При струмі якоря $I_a = 0$ у колі збудження встановлюють такий струм I_3 при якому напруга на виводах генератора дорівнює номінальному. Потім, збільшуючи навантаження, підвищують струм збудження, зберігаючи напругу незмінною.

6.3 Умови самозбудження генератора

Електричні машини, обмотки збудження яких (на відміну від незалежного збудження) живляться струмом якоря самої машини безпосередньо або через перетворювальний пристрій (СТ РЕВ 169-75) отримали назву машин з самозбудження.

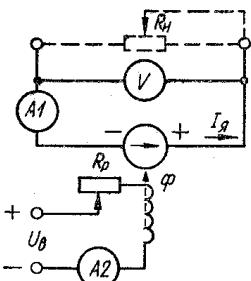


Рис. 6.3 Схема зняття характеристик генератора незалежного збудження

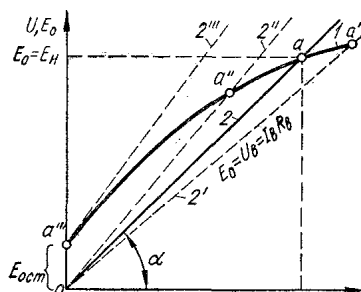


Рис. 6.4.Ілюстрація процесу самозбудження генераторів паралельного і змішаного збуджень

Процес самозбудження генераторів паралельного і змішаного збудження здійснюється при розімкненому зовнішньому колі за рахунок залишкового магнетизму в полюсах машини. Завдяки залишковому магнетизму при обертанні якоря генератора в ньому збуджується залишкова ЕРС $E_{зал} = 0,002 \div 0,03 E_{ном}$. Коло якоря в процесі запуску замкнуте на коло збудження, тому під дією залишкової ЕРС виникає струм збудження

$$I_3 = E_{зал} / R_3 \text{ де } R_3 - \text{опір обмотки збудження.}$$

Цей струм протікаючи по обмотці збудження,

посилує магнітний потік полюсів (при умові узгодженого ввімкнення обмоток якоря і збудження), який створює відповідну ЕРС в обмотках якоря.

Зі збільшенням ЕРС зростає струм збудження і магнітний потік полюсів до встановлення номінального струму в колі збудження. Процес збільшення струму збудження закінчується, коли настає рівновага, падіння напруги на обмотці збудження і ЕРС на виводах генератора.

Процес самозбудження генератора можна характеризувати залежністю напруги на обмотці збудження від струму збудження $U_3 = f(I_3)$, при $R_3 = const$ (крива 1 на рис. 6.4). Ця крива є характеристикою холостого ходу генератора. При протіканні струму по обмотці збудження в ній створюється падіння напруги $U_3 = I_3 R_3$, яке зображено на прямій 2 на рис. 6.4 (падінням напруги в колі якоря можна знехтувати, так як опір якоря R_a значно менше опору R_3 обмотки збудження).

В точці a перетину ліній 1 і 2 процес самозбудження закінчується оскільки падіння напруги $U_3 = I_3 R_3$, на обмотці збудження зрівноважується ЕРС, що виникає в обмотці якоря, тобто $I_3 R_3 = U_3 = E_0$. В цьому випадку в обмотці збудження встановлюється постійний струм, котрому при $R_3 \gg R_a$ відповідає постійна напруга на затискачах генератора.

Процес самозбудження генератора може закінчуватися і при інших положеннях точки a на кривій 1. Положення цієї точки визначається кутом нахилу a прямої 2 до осі абсцис, який залежить від опору R_z обмотки збудження. Чим менший цей опір, тим при більшій напрузі закінчується процес самозбудження (точка a' на кривій 1). З графіка видно, що згідно закону Ома, опір R_z пропорційний tga .

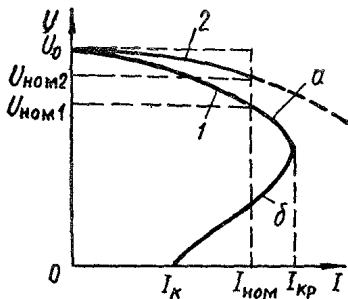
Якщо збільшувати R_z , то збільшиться кут α , а точка a буде ковзати по характеристиці холостого ходу в напрямі до початку координат. При деякому опорі $R_{z,кр}$, що називається критичним, пряма 2 стане дотичною до початкової частини кривої 1 (точка a'''). При цій умові генератор не збуджується.

6.4. Генератор паралельного збудження

Характеристику холостого ходу цього генератора знімають дослідним шляхом так само, як і генератора незалежного збудження. Оскільки при холостому ході генератора паралельного збудження в обмотці збудження і в якорі протікають однакові струми, тобто $I_a = I_z$, а I_z звичайно не перевищує 1-3% номінального струму генератора то падіння напруги в колі якоря і реакція якоря незначні. Тому характеристика холостого ходу генератора паралельного збудження практично співпадає з аналогічною характеристикою такого ж генератора незалежного збудження (крива 1 на рис. 6.2а),

Навантажувальна характеристика генератора паралельного збудження має такий же вигляд, як і генератора незалежного збудження (крива 2 на рис. 6.2а).

Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження (крива 1 на рис. 6.5), що показує залежність напруги на його затискачах від струму навантаження $U_T = f(I)$ при постійній частоті обертання якоря ($n=const$) і опорів обмотки збудження $R_z = const$, відрізняються від аналогічної характеристики генератора незалежного збудження (крива 2 на рис. 6.5). Пояснюється це тим, що до двох причин, що викликали зменшення напруги генератора незалежного збудження, тут додається третя: зменшення струму збудження, котрий згідно виразу (6.1) залежить від зниження напруги в результаті перших двох причин. Тому в генераторі паралельного збудження напруга при збільшенні навантаження зменшується більш інтенсивно і при інших рівних умовах одному і тому ж номінальному струмові I_{ii} відповідають різні значення номінальних напруг (див. рис. 6.5)



Розглядання зовнішньої характеристики (крива 1 на рис. 6.5) показує, що стійка робота генератора можлива тільки на верхній (а) гілці характеристики. При досягненні струму в навантаженні, величини, що дорівнює $I_{кр}$ генератор переходить у нижню гілку (б) характеристики, де його робота стає нестійкою. Потужність генератора при цьому зменшується і доходить до нуля в режимі короткого замикання. Струм короткого замикання в цьому випадку буде невеликим, що обумовлено малою залишковою ЕРС генератора.

Такий вигляд характеристики пояснюється тим, що зі збільшенням струму посилюється розмагнічування генератора реакцією якоря, генераторів паралельного (1) і незалежного збудження зменшуються струм збудження і магнітний потік, машина переходить в ненасичений стан, при якому навіть невелике зменшення

опору навантаження R_n викликає різке зменшення ЕРС машини (див. рис. 6.4). Струм навантаження $I = U_T / R_n$, тому при $I = I_{кр}$, коли напруга генератора зменшується повільніше, ніж спадає опір R_n , проходить зростання струму навантаження. Після цього, як $I = I_{кр} \approx (2 \div 2,5) I_{ном}$ подальше зменшення R_n супроводжується зменшенням струму I , так як в цьому випадку напруга U_A спадає скоріше, ніж зменшується опір R_n .

Струм короткого замикання I_k не тільки менший $I_{кр}$ але й $I_k < I_{ном}$ з цього, однак, не впливає, що генератор паралельного збудження не боїться коротких замикань. Струм I_k на рис. 6.5 отриманий в результаті поступового зменшення значення R_i . При раптовому короткому замиканні магнітна система генератора не встигає розмагнічуватись (зміна магнітного потоку істотно запізнюється в порівнянні зі зміною струму) і струм I_k досягає небезпечних значень; процес зміни напруги буде при цьому характеризуватися кривою 2 на рис. 6.5, $I_k = (8 \div 12) I_{ном}$.

Величезний стум викличе, згідно виразу (3.29), значний гальмівний момент і в результаті спотворюючої дії реакції якоря істотне підвищення міжламельної напруги (див. п. 4.4), яке може стати причиною виникнення колового вогню.

Номинальна зміна напруги (6.2) у генератора паралельного збудження складає 10-30%. Деколи, щоб зменшити це значення на полюсах встановлюють невелику (2-3 витки) послідовну обмотку збудження, котра з ростом навантаження збільшує магнітний потік.

6.5 Генератор послідовного збудження

В цьому генераторі (див. рис. 6.1) струм збудження дорівнює струму в якорі, тобто струму навантаження $I_z = I_y = I$, і тому при постійній частоті обертання існують тільки дві незалежні змінні: напруга U_r і струм I . Отже, такий генератор має тільки одну характеристику - зовнішню $U_r = f(I)$, її вигляд можна пояснити виходячи з таких міркувань. При $n = const$ напруга $U_r = c'_e \Phi - I_y R_y$. Якщо б у генераторі послідовного збудження не було ні розмагнічуючої дії реакції якоря, котра зменшує потік Φ , ні падіння напруги в якорному колі $I_y R_y$, то при збільшенні струму навантаження I магнітний потік змінювався б згідно магнітної характеристики, і напруга в дійсності відповідала б характеристиці холостого ходу (крива 1 на рис. 6.2). В дійсності існує і розмагнічуюча дія реакції якоря, і падіння напруг, котрі зменшують напругу U_r . Тому зовнішня характеристика хоч і схожа на криву 1 на рис. 6.2, але пройде нижче неї, і різниця між ними буде збільшуватися з ростом струму навантаження. Коли сталь насититься і ріст магнітного потоку сповільниться, а реакція якоря і падіння напруги будуть продовжувати рости зі струмом I , напруга може навіть трохи зменшитися: зовнішня характеристика стає повільно спадаючою.

Оскільки напруга U_r дуже змінюється при зміні навантаження, а при холостому ході вона наближається до нуля, генератори послідовного збудження непридатні для живлення більшості споживачів електроенергії. Використовують їх лише при електричному гальмуванні, коли двигуни послідовного збудження, переводять в генераторний режим.

6.6 Генератор змішаного збудження

В цьому генераторі (див. рис. 6.1г) є дві обмотки збудження: *основна* (паралельна) і *допоміжна* (послідовна). Узгоджене ввімкнення двох обмоток дозволяє отримувати приблизно постійну напругу генератора при зміні навантаження.

Зовнішня характеристика генератора (рис. 6.6) може бути показана у вигляді суми характеристик, створюваних кожною з обмоток збудження. При ввімкненні тільки одної паралельної обмотки, по котрій проходить струм збудження I_{z1} , напруга генератора поступово зменшується з ростом струму навантаження і (крива 1). При ввімкненні одної послідовної обмотки, по якій протікає струм збудження $I_{z2} = I$, напруга зростає зі збільшенням струму I (крива 2). Підбираючи кількість витків послідовної

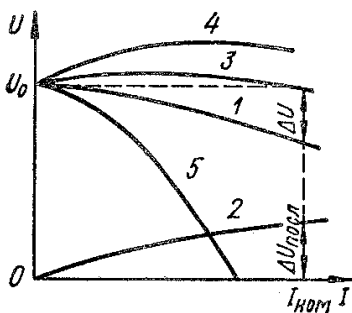


Рис.6.6. Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження

обмотки так, щоб при номінальному навантаженні створювана нею напруга $\Delta U_{посл}$ компенсувала сумарне падіння напруги ΔU при роботі машини з одною паралельною обмоткою, можна добитися, щоб напруга U_r при зміні струму навантаження від нуля до $I_{ном}$ залишалась майже незмінною (крива 3). Практично вона змінюється в межах 2-3%. Збільшуючи число витків послідовної обмотки, можна отримати характеристику при якій напруга $U_{ном} > U_0$ (крива 4); така характеристика забезпечує компенсацію падіння напруги не тільки в якорному колі генератора, але і в лінії, що з'єднує її з навантаженням. Якщо послідовну обмотку ввімкнути так, щоб її МРС була напрямлена проти МРС паралельної обмотки, (зустрічне ввімкнення), то

зовнішня характеристика генератора при більшому числі витків послідовної обмотки буде різко спадаючою (крива 5). Зустрічне ввімкнення послідовної і паралельної обмоток збудження застосовують у зварювальних генераторах і в інших, спеціальних машинах, де вимагається обмежити струм короткого замикання.

6.7. Паралельна робота генераторів

Паралельною роботою генераторів називається така їх робота, коли два або декілька генераторів, ввімкнених до загальних шин однойменними затискачами, спільно працюють на мережу, живлячи визначену групу споживачів.

В паралельній роботі генераторів незалежного і паралельного збудження істотних відмінностей немає.

Нарис. 6.7 зображена схема ввімкнення генератора $G2$ на паралельну роботу з генератором $G1$; при цьому споживач не повинен мати перешкод у своїй роботі, тобто напруга на його шинах має бути незмінною і дорівнювати номінальному значенню.

Порядок, ввімкнення генератора $G2$ на паралельну роботу такий: 1) первинному двигуну генератора $G2$ дають номінальну частоту обертів; 2) вмикають вольтметр $V3$, як зображено нарис. 6.7 і замикають однополюсний вимикач $SA2$. Якщо при цьому покази вольтметра $V3$ дорівнюють нулеві, то це значить, що полярності шин і генератора $G2$ однакові; якщо ж покази вольтметра $V3$ дорівнюють подвоєній напрузі на шинах, то полярності різні і потрібно міняти місцями затискачі генератора $G2$; 3) змінюючи струм збудження генератора $G2$, зрівнюють його напругу з напругою на шинах ($U_{G2} = U_{ш}$) замикають вимикач $SA3$. При цьому генератор виявиться ввімкненим паралельно генератору $G1$, але він не віддає, і не споживає струму, так як його ЕРС врівноважується напругою на шинах. Для того, щоб перевести частину навантаження генератора $G1$ на генератор $G2$, зберігаючи при цьому незмінною напругу на шинах, струм збудження генератора $G1$ необхідно зменшити, а генератора $G2$ - збільшити.

У кожного з паралельно працюючих генераторів напруга рівна і її можна записати у такому вигляді:

$$\text{де } E_1 = c_{e1} \Phi_1 n_1; E_2 = c_{e1} \Phi_2 n_2.$$

Після ввімкнення генератора $G2$ до шин (див. рис. 6.7) його можна навантажити струмом. Для цього треба збільшити ЕРС генератора E_2 , яка стане більшою $U_{ш}$ в результаті чого в якорі генератора $G2$ з'явиться струм $I_{я2}$ [див вираз (6.4)]. Тоді при незмінному струмі навантаження струм $I_я$ зменшиться. Якщо ЕРС E_1 залишиться постійною, то різниця $(E_1 - I_{я1} R_{я1})$ вже не буде дорівнювати попередньому значенню напруги на шинах і напруга U_T збільшиться. Тому для підтримки постійності напруги U_T одночасно зі збільшенням ЕРС E_2 треба зменшити ЕРС E_1 .

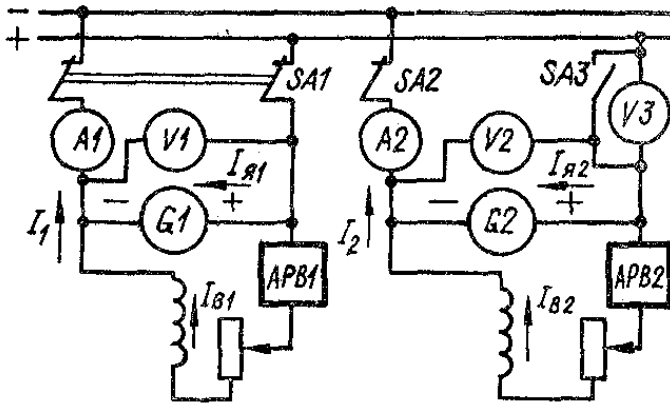


Рис. 6.7. Схема ввімкнення на паралельну роботу генераторів паралельного збудавнщ

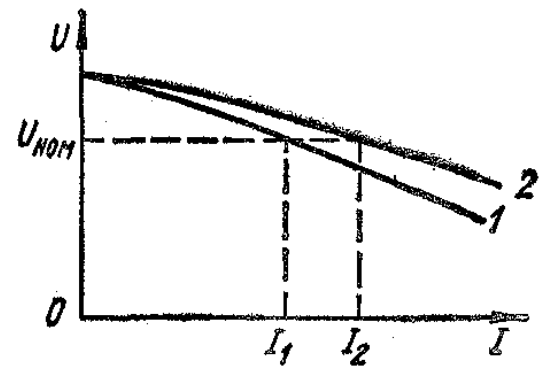


Рис. 6.8. Розподіл сірумів між генераторами при нвантайкненні

Змінити значення E_1 і E_2 можна, або струмом збудження, про що ми говорили у попередніх розділах, або зміною частоти обертання первинного двигуна. В обох випадках у генератора, і його двигуна змінюється потужність. На практиці звичайно міняють струм збудження.

Якщо є необхідність перевезти навантаження з генератора $G1$ на генератор $G2$, то діють таким чином: зменшують струм $I_{я1}$ одночасно збільшують струм $I_{я2}$, поки струм I_1 не дорівнюватиме нулю, після чого генератор можна відключати від мережі від мережі. При значному зменшенні струму I_1 ЕРС E_1 може виявиться меншою від напруги U_T . Це значить, що струми $I_я$ і I_1 змінили свій знак [див. вираз (6.4)], тобто свій напрям. При цьому генератор $G1$ буде працювати в режимі двигуна, споживаючи енергію від генератора $G2$, що неможливо, бо призведе до аварії первинного двигуна.

Треба мати на увазі, що внаслідок малого опору $R_{я1}$ і $R_{я2}$ навіть невеликі зміни струмів $I_{я1}$ і $I_{я2}$ можуть викликати значні зміни струмів генератора, оскільки, згідно виразу (6.4), зміни ЕРС E_1 і E_2

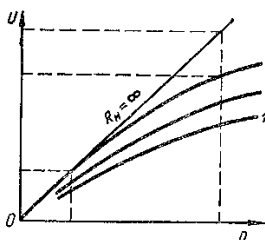
при $U_{ш} = const$ мають компенсуватися змінами спадів напруг в якорях машин $I_{я1}R_{я1}$ і $I_{я2}R_{я2}$. Через це регулювання струмів збудження генераторів мають здійснюватися досить плавно. В умовах експлуатації таке регулювання здійснюють автоматичні регулятори збудження (АРЗ) генераторів. Коли генератори працюють паралельно, без пристроїв АРЗ, то розподіл навантаження між ними залежить від вигляду їх зовнішніх характеристик: якщо ж характеристики схожі, навантаження розподіляються пропорційно до номінальних потужностей генератора, що найбільш вигідне; якщо ж зовнішні характеристики не схожі, то генератор, що має більш «м'яку» зовнішню характеристику (крива 1 на рис. 6.8). Завантажується меншим струмом, ніж другий генератор, у якого "жорсткіша" зовнішня характеристика (крива 2 на рис. 6.8).

При паралельній роботі генераторів змішаного збудження їх обмотки послідовного збудження з'єднують між собою зрівнювальним дротом завдяки якому послідовні обмотки будуть ввімкнені паралельно. Якщо тепер ЕРС якогось генератора раптово збільшиться і він прийме на себе частину навантаження то струм що зріс в колі якоря збільшиться струм в послідовній обмотці збудження іншого генератора. Магнітний потік цього генератора зросте, його ЕРС теж збільшиться, і навантаження знову автоматично розподіляється між генераторами пропорційно їх потужностям.

6.8. Тахогенератори

Тахогенератори - це малопотужні електричні генератори постійного струму потужністю 10-50 Вт, що призначені для перетворення частоти обертів в електричні сигнали (напруга U) в системах автоматики і для вимірювання частоти обертання валів в різних механізмах. На тепловозах з електричною передачею вони використовуються в колі автоматичного регулювання потужності.

Як правило, тахогенератори є двополюсними машинами незалежного збудження або збудженням постійними магнітами генерують напругу 3-5 В з частотою обертання до 1000 об/хв і 12-110 В з частотою обертання до 10000 об/хв. Точність їх роботи визначається постійним опором навантаження, лінійної залежності вихідної напруги від частоти обертання якоря $U = f(n)$ і крутизною вихідної напруги, яка виражена у вольтах на 1000 об/хв. Номінальна крутизна вихідної напруги тахогенератора загального застосування близько 50 В на 1000 об/хв.



Навантаженням тахогенераторів є таховольтметри або кола зворотного зв'язку пристроїв автоматики, котрі споживають дуже маленький струм. Навантаження таких елементів електричних кіл зручно виражати не в амперах, а в омах.

Встановимо залежність між вихідною напругою, частотою обертання і навантаженням тахогенератора. Згідно виразу (В.10), ЕРС тахогенератора

$$E = U + I_{я}R_{я}$$

Рис. 6.9. Характеристики тахогенератора

де $U = I_n R_n$ - вихідна напруги тахогенератора на затискачах навантаження;

R_n - опір навантаження тахогенератора; I_n - струм навантаження тахогенератора.

Відповідно,

$$E = U(1 + I_{я}R_{я}/U) = U(1 + I_{я}R_{я}/I_n R_n) = U(1 + R_{я}/R_n) \quad (6.5)$$

Зважаючи на те, що струм якоря тахогенератора дуже незначний, розмагнічуючою дією реакції якоря можна знехтувати і вважати магнітний потік $\Phi = const$. Тоді ЕРС $E = c_e n \Phi = c'_e n$, де $c'_e = c_e \Phi$. З урахуванням цієї напруги з (6.5)

$$U = \frac{E}{1 + R_{я}/R_n} = \frac{c'_e n}{1 + R_{я}/R_n} = cn \quad (6.6)$$

де стала c об'єднала всі етапі величини.

Вираз (6.6) являє собою рівняння прямої, де стана c характеризує кут нахилу прямої до осі абсцис, тобто крутизну характеристики вихідної напруги. Таким чином, при постійному навантаженні R_n зберігається пропорційність між вихідною напругою тахогенератора і частотою його обертання. Чим більший опір навантаження, тим більша крутизна прямої вихідної напруги.

Практично внаслідок реакції якоря і падіння напруги в його колі лінійна залежність вихідної напруги порушується, що знижує правильність роботи тахогенератора. Отже, опір навантаження треба вибирати якомога більшим.

Для ілюстрації сказаного нарис. 6.9 зображені характеристики залежності вихідної напруги $U = f(n)$ для трьох різних навантажень тахогенератора: 2000, 5000 і 10000 Ом (криві 1,2 і 3 відповідно). З рисунка видно, що чим більший R_n , тим більш круті характеристики, тим більш прямолінійною є залежність напруги від частоти обертання якоря тахогенератора і тим самим збільшується його точність.

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 змінюється напруга генератора послідовного збудження при зростанні струму навантаження?
7. Як можуть вмикатися обмотки збудження генератора змішаного збудження і який вигляд в залежності від цього матимуть його зовнішні характеристики?
8. Які умови мають бути дотримані при ввімкненні генератора на паралельну роботу? Як перевести навантаження з одного генератора на інший?
9. Що таке тахогенератор, для чого він застосовується?
10. Генератор паралельного збудження має напругу $U_r = 230 \text{ В}$ при струмі навантаження $I = 220 \text{ А}$. Визначити струм якоря I_a і корисну потужність, якщо опір обмотки збудження $R_z \text{ Ом}$.

Частина 7. Двигуни постійного струму

7.1 Основні поняття і рівняння

Властивості двигунів. Як видно з п. В.4, будь-яка електрична машина енергетично зворотна, тобто може як в режимі генератора, так і в режимі двигуна, рівняннями рівноваги напруг і моментів якого є вирази (В.14) і (В.15). 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)

$$U = E + I_a \Sigma R \quad (7.1)$$

де $\Sigma R = R_a + R_{д.л} + R_{к.о.}$ - 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 напрямлена проти струму якоря)

$$E = c_e n \Phi \quad (7.2)$$

- в) електромагнітний обертальний момент

$$M = c_M I_a \Phi \quad (7.3)$$

Індекс "ем" при літері M тут і далі для простоти усунений. Звідси видно, що зміна напрямку обертального моменту (реверсування двигуна) можна шляхом зміни напрямку струму магнітного потоку. Практично це виконують перемиканням виводів обмотки якоря або полюсів. Але не одночасно!

$$I_a = (U - E) / \Sigma R \quad (7.4)$$

Різниця у значеннях U і E невелика; звичайно $E = (0.92 \cdot 0.97)U$, причому більша величина відноситься до машини більшої потужності.

Підставивши (7.2) у рівняння (7.1), розв'яжемо його відносно частоти обертання; тоді

$$U - I_a \Sigma R$$

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

Дійсно, як впливає з виразу (7.4), якщо $E > U$ (збільшена частота обертання n), то струм I_a змінить свій напрям (знак), тобто машина, перейде в режим генератора. При цьому електромагнітний

момент, згідно (7.3) протилежний напрямку обертання, тобто стане гальмівним. Таким чином, змінюючи значення E (більше чи менше U), машину незалежного чи паралельного збудження можна переводити відповідно в режим двигуна, або генератора.

Про машину послідовного збудження буде сказано далі.

Рівновага моментів і потужностей. Взаємо-зворотне перетворення електричної і механічної енергії, згідно закону збереження енергій, не може здійснюватися без втрат останньої. Втрати енергії, виділяються машині у вигляді теплоти 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 ваш двигуна діють такі елементи: 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 до колектора, частий, що обертаються в повітрі, а також втратами в сталі. В порівнянні з номінальним корисним моментом величина M_0 , 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:

$$M = M_0 + M_2 + M_{cm} \quad (7.6)$$

Якщо до двигуна підведена повна потужність $P_1 = UI_y$ то створюються втрати в якірному колі $I_y^2 \sum R$ (втратами в паралельній обмотці збудження, через їх незначну величину, нехтуємо); тоді з урахуванням виразу (7.1)

$$P_1 - I_y^2 \sum R = UI_y - I_y^2 \sum R = I_y (U - I_y \sum R) = EI_y = P_y \quad (7.7)$$

але $P_y = P_{em}$ [див. вираз (B.18)].

Відомо, що потужність - це добуток моменту на кутову швидкість $\Omega = 2\pi n$. Тому, помноживши всі члени рівняння (7.6) на Ω отримаємо

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

або

$$P_{cm} = p_0 + P_2 = P_y$$

Звідси корисна механічна потужність на валу двигуна

$$P_2 = P_y - p_0 \quad (7.8)$$

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 $p_m = I_y^2 \sum R$ і прийнявши до уваги рівняння (7.7) і (7.8), запишемо новий баланс потужностей

$$P_2 = P_1 - p_m - p_0 \quad (7.9)$$

тобто корисна потужність двигуна дорівнює підведеній за виключенням потужності електричних втрат на тертя і в сталі.

Вираз (7.7) може бути записаний у такому вигляді:

$$P_1 = P_y - I_y^2 \sum R = P_{em} + I_y^2 \sum R$$

звідки

$$UI_y = M\Omega + I_y^2 \sum R \quad (7.10)$$

або

$$(U - I_y \sum R)I_y = M\Omega \quad (7.10a)$$

Аналіз виразів (7.10) і (7.10a) дозволяє зробити дуже важливі висновки, а саме: зі збільшенням навантаження на вал двигуна, тобто зі збільшенням електромагнітного моменту зростає потужність в колі якоря UI_y , тобто підведена потужність P_1 . Але так як напруга $U = const$, то збільшення навантаження двигуна супроводжується зростанням струму I_y . 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 (7.10) і (7.10а). Цим він принципово відрізняється від інших двигунів (парових або внутрішнього згоряння).

Основні характеристики. Властивості двигунів визначаються їх характеристиками котрі показують взаємозалежність між різними величинами, у виразах (7.1) - (7.5). 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 ГОСТ 2582-81, основними робочими характеристиками електричних двигунів є:

- а) залежність частоти обертання від струму якоря - швидкісна характеристика;
- б) залежність обертального моменту від струму якоря – момент на характеристика;
- в) залежність між обертальним моментом і частотою обертання - механічна характеристика;
- г) залежність ККД на валу двигуна від струму якоря.

Вигляд і особливості останньої характеристики однакові для всіх електричних машин і трансформаторів, тому її аналіз поданий в п. 13.2.

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

На практиці дуже важливо вміти обертальний момент двигуна $M = P_a / \Omega = P_2 / 2\pi n$. 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):

$$M = 0,159 P_2 / n \quad (7.11)$$

Частоту обертання виражають в об/хв, тоді

$$M = 9,55 P_2 / n \quad (7.11a)$$

7.2 Запуск двигунів в хід

Уявімо собі, що для тягового двигуна ДТ9Н (тяговий агрегат ПЕ2М), опір якорного кола котрого $\sum R = 0,2 \text{ Ом}$, при номінальній напрузі $U_{ном} = 1500 \text{ В}$ застосований прямий запуск в хід, тобто прямо на виводи двигуна подається номінальна напруга. В момент подання напруги $n=0$; значить, згідно (7.2), і $E=0$. В такому випадку рівняння (7.4) для моменту прямого запуску набере вигляду

$$I_{я,зап} = U / \sum R = 1500 / 0,2 = 7500 \text{ А}$$

В той же час номінальний струм цього двигуна, згідно (7.4),

$$I_{ном} = \frac{U - 0,96U}{\sum R} = \frac{1500 - 0,96 \cdot 1500}{0,2} = 300 \text{ А}$$

Таким чином, пусковий струм в даному випадку перевищив номінальний в 25 разів; у різних машинах він може перевищувати номінальний в 10-30 разів. Такий струм викличе появу величезних, обертального моменту (7.3) і реальної ЕРС (5.18), що створює небезпеку пошкодження валу і призведе до потужного іскріння під щітками.

З цієї причини прямий запуск двигуна неможливий. Виключення з правил складають мікромашини, в котрих відносно великий опір $\sum R$.

Зменшити струм запуску можна, застосувавши *реостатний* запуск, коли послідовно в коло якоря вмикають пусковий реостат (рис, 7.1).

В цьому випадку, згідно (7.4)

$$I = \frac{U}{r_{н.п} + \sum R} \quad (7.12)$$

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

$$r_{н.п} = \frac{U}{(1,8 \div 2,5) I} - \sum R$$

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

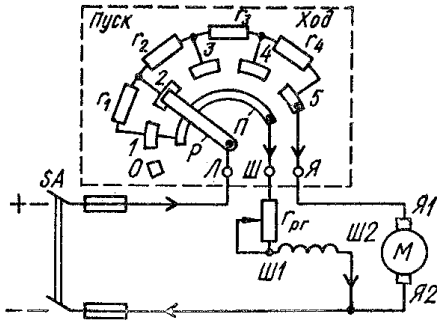


Рис. 7.1. Схема запуску двигуна паралельного збудження

$$I_a = \frac{U - E}{\sum R + r_{n.p}} \quad (7.13)$$

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

Перед запуском двигуна необхідно важіль P реостата поставити на холостий контакт O (див. рис. 7.1). Потім вмикають рубильник, переводять важіль на перший проміжний контакт 1 і коло якоря двигуна стає ввімкненим в мережу через резистор опором

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

Одночасно через важіль P , планку Π і контакт Ш 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.

Послідовність запуску така. Впевнившись, що важіль пускового реостату знаходиться в нульовому положенні, а важіль регульовального резистора r_3 , в колі збудження - в положення, при якому його опір мінімальний, потрібно замкнути вимикач SA і перевести важіль пускового реостату з нульового положення в перше, потім (по мірі зростання швидкості двигуна) - плавно в наступне положення до повного вимикання резистора (положення 5). Процес запуску завершений.

Для запуску двигунів послідовного збудження замість реостатів з трьома затискачами використовують реостати з двома затискачами (Л і Я), в яких суцільна мідна планка відсутня.

Описаний запуск є неекономічний, особливо для двигунів середньої і великої потужності через великі розміри і дорожнечу пускових реостатів і, головне, через великі втрати енергії в них. Але до теперішнього часу він використовується на електровозах постійного струму.

В сучасних пристроях, у тому числі і 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.

7.3 Двигун паралельного збудження

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

Швидкісна характеристика $n = f(I_a)$. Її вигляд визначається рівнянням (7.5), яке в загальному випадку, коли в коло якоря ввімкнений резистор запуску опором r_{np} має вигляд

$$n = \frac{U - I_a (\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi} \quad (7.14)$$

Нагадаємо, що при незмінному струмі збудження і нехтуванням розмагнічуючого дією реакції якоря магнітний потік $\Phi = const$.

Розділимо почленно чисельник на знаменник рівняння (7.14), тоді

$$n = \frac{U}{c_e \Phi} - \frac{I_a (\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi} = n_0 - \Delta n \quad (7.15)$$

де $n_0 = U / (c_e \Phi) = const$ носить назву *ідеальної частоти обертання при холостому ході*, тому що відповідає струму якоря $I_a = 0$; $\Delta n = \frac{I_a (\sum R + r_{n.p})}{c_e \Phi}$ - зменшення частоти обертання, зумовлене сумарним падінням напруги у всіх резисторах якорного кола.

Величина Δn , тобто сума $(\sum R + r_{n.p})$, визначає нахил швидкісної характеристики, яка, як видно з рівняння (7.15), має лінійний вигляд (рис. 7.2а). Якщо резистора в колі якоря немає ($r_{r.n} = 0$), то характеристика носить назву *звичайної* і має "жорсткий" вигляд (характеристика 1 на рис. 7.2а).

При наявності резистора в колі якоря характеристики називаються штучними (лінії 2 і 3); їх кут нахилу зростає (вони стають більш "м'якими") з ростом значення $r_{r.n}$ (так, $r_{r.n} > r_{r.p2}$).

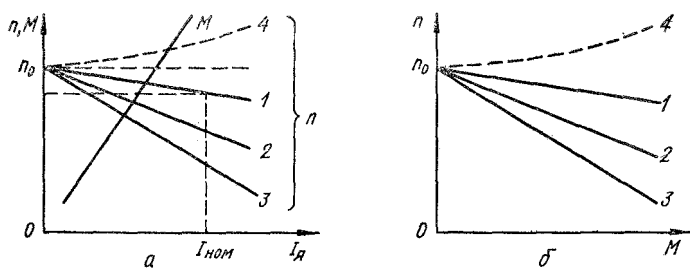


Рис. 7.2. Характеристики двигуна паралельного збудження

Зменшення частоти обертання по звичайній характеристиці можна виразити у відсотках:

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

звичайно ця величина незначна і складає 3-5%.

Моментна характеристика $M = f(I_a)$.

Ця характеристика може бути отримана з рівняння (7.3) при умові $\Phi = const$. Тоді

$$M = c_M I_a \Phi = c'_M I_a \quad (7.16)$$

де $c'_M = c_M \Phi$ - стала.

Як бачимо, вираз (7.16)-рівняння прямої лінії. Зі зростанням струму якоря обертальний момент лінійно зростає (див. рис.7.2а).

Механічна характеристика $n = f(M)$. Для отримання її аналітичного виразу підставимо у рівняння (7.15) значення струму (7,3), тобто $I_a = M / (c_M \Phi)$; тоді

$$n = \frac{U}{\omega} - \frac{M(\sum R + r_{n,p})}{\omega} - n - \Delta n' \quad (7.17)$$

де $\Delta n'$ - зменшення частоти обертання, викликане зростанням навантаження на валу двигуна. Як бачимо, рівняння (7.17) аналогічне (7.15),тому механічна характеристика (рис 7.2б) з вигляду аналогічно швидкісній. Також є звичайна (1) і сімейство штучних (2, 3) характеристик, нахил яких залежить від значення $r_{n,p}$.

До цього часу ми розглядали характеристики без врахування розмагнічуючої дії реакції якоря, в результаті якого магнітний потік Φ зменшується. Звичайно це зменшення не дуже велике, але може виявитися, що зменшення знаменника у виразах (7.14) і (7.17) буде проходити швидше, ніж зменшення чисельника (це стосується звичайної характеристики, коли $r_{n,p} = 0$). У цьому випадку виникає неприємне явище: зі зростанням навантаження (струму I_a і моменту M) частота обертання буде також зростати (штрихові лінії 4 на рис. 7.2). 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. 7.2 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.

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

Механічні і робочі характеристики двигуна незалежного збудження аналогічні до характеристик двигуна паралельного збудження, тому що в них струм збудження I_z також не залежить від струму якоря I_a (див. п.7.3).

7.5 Двигун послідовного збудження.

У цьому двигуні обмотка збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря, тобто $I_z = I_a$; тому магнітний потік Φ є деякою функцією струму якоря (див. рис. 2.5).

Для подальшого вивчення властивостей двигуна доцільно магнітну характеристику подати у вигляді трьох ділянок: у початковій ("ненасиченій") частині існує лінійна залежність $\Phi = f(I_a)$, тобто $\Phi = c_\Phi I_a$ при $I_a < (0,8 \div 0,9) I_{a,ном}$; при дуже великих навантаженнях (правіше точки с) можна вважати,

що магнітний потік залишається незмінним, тобто $\Phi = const$; третя ділянка - перехід від лінійного "ненасиченого" до "насиченого", де між потоком Φ і струмом $I_{\text{я}}$ існує складна нелінійна залежність.

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 (7.5) і розділимо почленно чисельник та знаменник; тоді

$$n = \frac{U}{c_e c_{\phi} I_{\text{я}}} - \frac{\sum R}{c_e c_{\phi} I_{\text{я}}} = c_1 \frac{U}{I_{\text{я}}} - c_2 \quad (7.18)$$

Як бачимо, частота обертання зворотно пропорційна струму навантаження, тобто вираз (7.18) є рівнянням гіперболи (крива 1 на рис. 7.3а). Це звичайна швидкісна характеристика. При значних струмах, коли магнітне коло насичується і не існує прямої пропорційності між магнітним потоком і струмом якоря, характеристика трохи відхиляється від гіперболи і "спрямлюється" (штрихова частина кривої 1 на рис. 7.3а).

Стала c_2 в рівнянні (7.18) може відрізнитися

в залежності від того, чи ввімкнений у коло якоря резистор і який його опір $r_{\text{н.р}}$, [див. рівняння (7.14)]. Чим більше значення $r_{\text{н.р}}$, тим нижче розміщені штучні швидкісні характеристики (криві 2 і 3 на рис. 7.3а)

Моментна характеристика $M = f(I_{\text{я}})$. Цю характеристику доцільно розділити на дві ділянки: 1) при малих струмах $I_{\text{я}} < (0,8 \div 0,9) I_{\text{я.ном}}$, коли $\Phi = c_{\phi} I_{\text{я}}$; 2) при великих струмах $I_{\text{я}} > I_{\text{я.ном}}$, коли можна вважати $\Phi = const$.

На першій ділянці, згідно рівняння (7.3)

$$M = c_m c_{\phi} I_{\text{я}}^2 \quad (7.19)$$

-обертальний момент пропорційний квадрату струму якоря, тобто моментна характеристика має форму параболи (див. рис. 7.3а). На другій ділянці справджується рівняння (7.16), тобто моментна характеристика стає лінійною. Між параболічною і 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 на три ділянки.

Для першого, "ненасиченого", згідно (7.19), $I_{\text{я}} = \sqrt{\frac{M}{c_m c_{\phi}}}$. Підставивши цей вираз у (7.18)

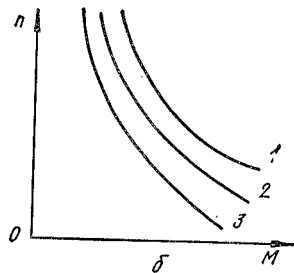
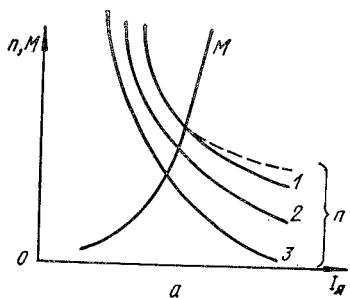
отримаємо - рівняння звичайної механічної характеристики

$$n = \frac{U \sqrt{c_m c_{\phi}}}{\sqrt{M}} - c_2 \quad (7.20)$$

де $c_1' = c_1 \sqrt{c_m c_{\phi}}$. Як бачимо механічна характеристика має гіперболічний вигляд (крива 1 на рис. 7.3б). При струмах $I_{\text{я}} = I_{\text{ном}}$ залежність $n = f(M)$ наближається до лінійної.

Як і в рівнянні (7.18) значення сталої c_2 в (7.20) залежить від повного опору кола якоря: ввімкнений чи ні резистор і яким його опір $r_{\text{н.р}}$; чим опір більший, тим нижче розміщені штучні механічні характеристики (криві 2 і 3 на рис. 7.3б).

З рис. 7.3 випливає, що швидкісні механічні характеристики двигуна послідовного збудження є "м'якими", частота обертання при зміні навантаження змінюється в широкому діапазоні. З рівнянь (7.18) і (7.20) випливає, що якщо навантаження спадає до нуля, то частота обертання прямує до нескінченності; при незначних навантаженнях вона досягає неприпустимо великого значення (двигун іде в "рознос"), що може викликати механічне пошкодження якоря.



7.3. Характеристики двигуна послідовного збудження

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 приводним механізмом зубчатою передачею чи глухою муфтою.

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

Згідно рівняння (7.16) і (7.19), відповідно для двигунів паралельного і послідовного збудження спостерігається така, пропорційність:

$$I_{a,пр} \propto M; I_{a,пс} \propto \sqrt{M}$$

Корисна потужність двигуна $P_2 = M\Omega = M \cdot 2\pi n$. При жорсткій механічній характеристиці ($n = const$) у двигуна паралельного збудження $P_{2пр} \propto M$; у двигуна послідовного збудження, для якого згідно (7.20), $n \propto 1/\sqrt{M}, P_{2пс} \propto \sqrt{M}$

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 благотворно впливає на систему електропостачання. Вона також означає, що одну і ту ж роботу можна виконати двигуном послідовного збудження меншої потужності, ніж двигуном паралельного збудження.

Дійсно, якщо для проведення по заданому профілю колії складу поїзда двигун сприймає на себе момент опору (опору рухові), що дорівнює подвійному номінальному, тобто $M = 2M_{ном}$, то двигун послідовного збудження буде споживати з контактної мережі струм $I_{a,пс} = \sqrt{2}I_{a,ном}$, а двигун паралельного збудження - $I_{a,пр} = 2I_{a,ном}$; потужність першого може бути прийнята $\sqrt{2/2} = 0,707$ необхідної потужності іншого.

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

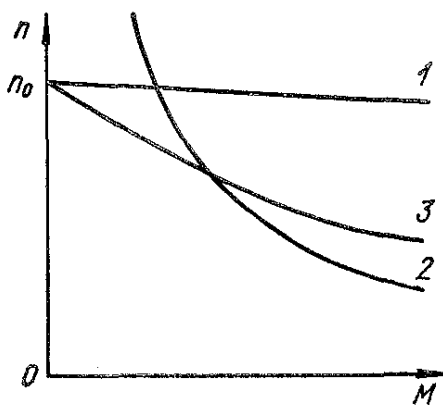


Рис. 7.4. Механічні характеристики двигунів паралельного (1), послідовного (2) і змішаного з узгодженим включенням послідовної обмотки (3) збуджень

7.6 Двигун змішаного збудження

У цьому двигуні магнітний потік створюється в результаті спільних дій послідовної і паралельної обмоток збудження, що вмикаються, як правило, узгоджено. Тому його механічна характеристика розміщується між характеристиками двигунів послідовного і паралельного збудження (рис. 7.4). Вона (крива 3) м'якша, ніж характеристика 1, але жорсткіша, ніж 2. В залежності від співвідношення МРС обох обмоток, крива 3 може наближатися до характеристики 1 або 2. Тоді двигуну будуть більш-менш відповідати властивості двигуна паралельного чи послідовного збудження.

Одним з плюсів цього двигуна є те, що він йде "в рознос" і може працювати при холостому ході (частота обертання n_0 має скінчене значення). Це одна з причин, через яку двигуни змішаного збудження застосовують на електрорухомому складі, наприклад на трамваях і тролейбусах.

7.7. Регулювання частоти обертання

Робота двигуна на звичайній характеристиці не завжди може задовольняти всі вимоги експлуатації. Часто буває необхідно розширити робочий діапазон, що може бути виконане регулюванням частоти обертання. Таке регулювання, згідно рівняння (7.14) 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 (крива 1 на рис. 7.3а) відповідає номінальній напрузі, тому зміна напруги живлення можлива лише донизу, що дасть сімейство швидкісних характеристик, аналогічних за формою звичайній, але розміщених нижче.

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, змінюючи ступенями його вихідну напругу.

Резистор в колі якоря. Цей спосіб дозволяє отримати сімейство швидкісних або механічних характеристик, що лежить нижче звичайних. Кожна така характеристика відповідає згідно рівнянню (7.14) своєму значенню $r_{n,p}$ (криві 2 і 3 на рис. 7.3). Спосіб регулювання, що розглядається має ряд недоліків: резистор, який повинен бути розрахований на довготермінове 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. 7.5а). Коли замикається контактор $KM1$, 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 рівняння (7.5) зростає. Чим менше значення $R_{ш}$ тим більша частина струму відгалужується в шунтувальний резистор і тим більше зростає частота обертання.

На рис. 7.5б характеристика послабленого збудження $OB1$ отримана при замиканні лише контактора $KM1$, а коли значення опору шунтувального резистора дорівнює $2R_{ш}$, а струм в шунтувальному колі $I_{ш1}$.

При замиканні одночасно контакторів $KM1$, $KM2$ (цьому відповідає характеристика $OB2$) один резистор коротиться, опір шунтувального кола дорівнює $R_{ш}$, і по ньому тече струм $I_{ш2} > I_{ш1}$.

Розглянемо процес переходу зі звичайної на характеристику $OB1$.

Нехай двигун працює на звичайній характеристиці (рис. 7.5б) у точці a , що відповідає частоті обертання n_1 струму якоря $I_{яa}$. При замиканні контактора $KM1$ зменшується магнітний потік Φ і згідно (7.2) падає ЕРС двигуна E , бо завдяки інерції обертальних мас частота обертання в перший час залишається незмінною і дорівнює n_1 . Якщо зменшилась ЕРС E , то для зрівноваження прикладеної напруги, як витікає з рівняння (7.1), повинен зрости струм $I_я$; тому має місце стрибок струму на $\Delta I_я$, - струм стає рівним $I_{яб}$, стався перехід у b на характеристиці $OB1$.

При роботі в точці a існувала рівновага між обертальним моментом двигуна і статичним моментом опору на його валі [див. рівняння (7.6)]. Замикання контактора $KM1$ викликає більший приріст струму, ніж зменшення магнітного потоку, тому обертальний момент двигуна (7.3) зростає і стає більшим від моменту опору; це призводить до зростання частоти обертання (за стрілкою на характеристиці $OB1$), зменшення струму і обертального моменту. Частота обертання зростає до деякого значення n_2 , поки в точці c знову встановиться рівновага між обертальним моментом і статичним моментом опору.

Перехід на характеристику $OB2$ проходить аналогічно додатковим замиканням контактора $KM2$.

Послідовно в шунтувальне коло ввімкнена індуктивність - індуктивний шунт. Його призначення - сприяти, 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 (крива 3 на рис. 7.5б). При переході на характеристику 3 (точка a) струм і обертальний момент зменшуються, а значить, починається рух по кривій 3 вниз.

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, шунту-

вання якоря ефективно лише тоді, коли магнітне коло двигуна не насичене, тому такий спосіб регулювання на практиці, застосовується дуже рідко.

7.8. Електричне гальмування двигунів постійного струму

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

Існують три види електричного гальмування: рекуперативне, динамічне (реостатне) і 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 $n_0 = U / (c_e \Phi)$ (див. рис. 7.4); характеристики продовжаться лівіше осі ординат, де обертальний момент є від'ємним U цьому випадку ЕРС машини стає більшою напруги мережі і струм, згідно (7.4) змінює свій напрям.

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 (див. також п. 7.5). Можна перевести машину в рекуперативний режим і примусово, зменшивши частоту обертання n_0 шляхом збільшення струму збудження (значить, Φ) або зниження напруги U , що підводиться.

Двигун послідовного збудження таким чином не може перейти в рекуперативний режим: його характеристика на рис. 7.4 не перетинає осі ординат, а ЕРС E ніколи не може стати більше від напруги U . Справа в тому, що $E = c_e n \Phi$, а $\Phi = c_\Phi I_a$ (ненасичена магнітна система) і, згідно (7.18), $n \propto I / I_a$. Тому зі зростанням частоти обертання зменшується струм якоря, а з ним і магнітний потік; отже, ЕРС E не збільшується.

На електричному рухомому складі двигуни послідовного збудження для переводу в рекуперативний режим, зміною схеми ввімкнення перетворюють в генератори незалежного збудження.

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

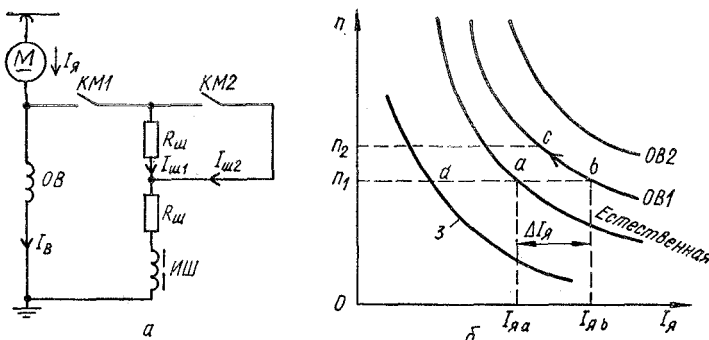


Рис.7.5. Схема послаблення збудження (а) і швидкісні характеристики (б) двигуна.

Обмотка збудження двигуна паралельного збудження залишається ввімкненою в мережу цієї ж полярності, а отже, струм збудження і магнітний потік залишаються незмінними. Коли якорна обмотка від'єднана від мережі, то струм, що споживає від мережі двигун,

дорівнює нулеві, але якор двигуна за інерцією продовжує обертатися, внаслідок чого у ньому виникає ЕРС $E = c_e n \Phi$. Гальмівний струм якоря, згідно (7.4),

$$I_{я.м} = \frac{0 - E}{\sum R + r_m} = - \frac{E}{\sum R + r_m} \quad (7.21)$$

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

$$M_m = c_m I_{я.м} \Phi = c_m \left(- \frac{E}{\sum R + r_m} \right) \Phi = - c_e c_m \frac{n \Phi^2}{\sum R + r_m} \quad (7.22)$$

З виразу (7.22) 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 тям 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 напрям струму у якорі або магнітного потоку і знак моменту, котрий з обертального стає гальмівним. Струм якоря після перемикання його обмотки дорівнює

$$I_{я.м} = \frac{-U - E}{\sum R + r_m} = - \frac{U + E}{\sum R + r_m} \quad (7.23)$$

тобто він не тільки змінює свій знак, але і стрибком дуже збільшується, а з ним росте і гальмівний момент. Такий стрибок струму і гальмівного моменту може вижитися 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 у протилежному напрямі (реверсу). Цей спосіб гальмування застосовується в піднімально-транспортних механізмах при спусканні вантажу і інших випадках, наприклад для попередження аварійних ситуацій, небезпечних для життя людей.

Контрольні запитання і задача

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 уявлень 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 (потужність) при зміні навантаження на валі двигунів паралельного і послідовного збудження. Чим обмежене значення максимального обертального моменту?
 10. Якими способами можна регулювати частоту обертання двигунів постійного струму?
 11. Що таке режим послабленого збудження і як він застосовується у двигунів постійного струму?
 12. Які види електричного гальмування існують? У чому полягають їх особливості у двигунів різних систем збудження?
 13. Потужність тягового двигуна ДТ9Н дорівнює 467 кВт при частоті обертання 655 об/хв. Визначити його обертальний момент.

РОЗДІЛ II

ТРАНСФОРМАТОРИ

Частина 8. Робочий процес трансформатора

8.1 Призначення області використання трансформаторів

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, який має дві чи більшу кількість індуктивно пов'язаних обмоток і призначених для перетворення за допомогою електромагнітної індукції одної або декількох систем змінного струму в одну або декілька інших систем змінного струму. За допомогою трансформаторів підвищують або знижують напругу, змінюють кількість фаз і в деяких випадках перетворюють частоту змінного струму. Трансформатори широко використовують для таких цілей.

1. Для передавання і 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, так як 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, які 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.

На електровозах силові *тягові* трансформатори служать для зниження напруги на струмоприймачі до напруги живлення тягових двигунів і інших пристроїв. З їхньою допомогою здійснюють ступінчасту зміну напруги для пуску і регулювання режимів роботи тягових двигунів.

2. Для забезпечення потрібної схеми включення напівпровідникових перетворювачів, коли необхідно узгодження напруги на вході і 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 і автоматики. Такі трансформатори можуть працювати на дуже великих частотах, (до десятків кілогерц).

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

Враховуючи завдання цього курсу, тут основну увагу приділено однофазним силовим трансформаторам; інші види трансформаторів розглядаються стисло.

8.2. Принцип дії трансформатора

Як і у електричних машин, принцип дії трансформаторів оснований на законі електромагнітної індукції, згідно якому при перетині магнітним потоком струмового витка в останньому виникає ЕРС, яка визначається рівнянням (В. 2).

Трансформатор складається з замкнутого сталевого осердя зібраного з листової електротехнічної сталі (для зменшення вихрових струмів і втрат на гістерезис) і яке називають *магнітопроводом*, і двох або більше обмоток, настромлених на осердя трансформатора (рис. 8.1). Обмотка, до якої підводиться енергія, називається первинною; вона має w_1 витків і приєднується до джерела напруги U_1 . Обмотка, від якої відводиться енергія, називається вторинною; в ній є w_2 витків. 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 їх кінці - буквами X, Y ; відповідно початки і кінці обмотки нижчої напруги (НН) - маленькими літерами a, b і x, y .

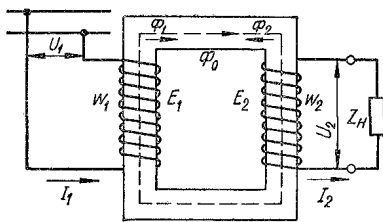


Рис. 8.1. Схема трансформатора потужності споживача

При підключенні до мережі первинної обмотки в ній створюється змінний струм, який створює змінний магнітний потік, замкнутий по магнітопроводу. Потік Φ перетинає обидві обмотки і створює в них змінні ЕРС

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi}{dt}; e_2 = -w_2 \frac{d\Phi}{dt} \quad (8.1)$$

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

$$\Phi = \Phi_m \sin \omega t \quad (8.2)$$

де Φ_m - амплітудне значення потоку.

Підставивши в (8.1) вираз (8.2) отримаємо

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_m \sin \omega t)}{dt} = -\omega w_1 \Phi_m \cos \omega t = 2\pi f w_1 \Phi_m \sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) \quad (8.3)$$

$$e_2 = 2\pi f w_2 \Phi_m \sin(\omega t - \pi/2) \quad (8.3a)$$

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

$$E_1 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_1 \Phi_m = 4,44 f w_1 \Phi_m \quad (8.4)$$

$$E_2 = \frac{2\pi}{\sqrt{2}} f w_2 \Phi_m = 4,44 f w_2 \Phi_m \quad (8.5)$$

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

Відношення первинної і вторинної ЕРС носить назву коефіцієнт трансформації, з урахуванням виразів (8.4) він дорівнює

$$K = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \quad (8.5)$$

Незалежно від того підвищувальний трансформатор чи понижувальний, 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

$$I_2 / I_1 \approx U_1 / U_2 \approx E_1 / E_2 = w_1 / w_2 = k \quad (8.6)$$

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

8.3.Будова трансформаторів

Силові трансформатори можуть бути маслонаповненими або сухими: їх відповідне позначення включає букви *М* або *С*. Однофазний і трифазний трансформатори позначають буквами *О* або *Т*.

Основними частинами трансформатора є магнітопровід, обмотки, бак, виводи, система охолодження тощо.

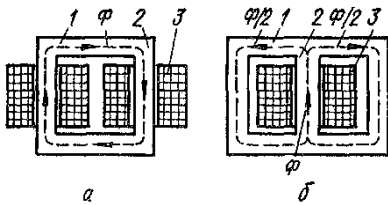


Рис.8.2.Основні типи однофазних трансформаторів

Магнітопровід з насадженими на його стержні обмотками є *активною* частиною, а інші елементи - *допоміжними*.

В залежності від конфігурації магнітопроводу трансформатори поділяють на *стержневі* (рис. 8.2а) і *броньові* (рис. 8.2б). Магнітопровід складається зі стержнів 2, на яких розміщують обмотки 3, заключну частину і, на якій немає обмоток, називають ярмом.

Обмотки *ВН* і *НН* трансформаторів для кращого магнітного зв'язку між ними розміщують на одному і тому ж стержні; одну всередині другої - *концентричні* (концентри) або *такі, що чергуються*, коли частини обмоток *ВН* і *НН* позмінно ідуть одна за одною по висоті стержня (останні - це звичайно броньові трансформатори). При концентричному виконанні обмоток у звичайних трансформаторів обмотку *НН* поміщають ближче до стержня (всередині обмотки *ВН*), так як в цьому випадку легше здійснити ізоляцію від стержня.

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

Розглянемо будову однофазних тягових трансформаторів (рис. 8.3 і 8.4), які використовують на кар'єрних електровозах. Магнітопроводи тягових трансформаторів виконуються шихтованими з листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 мм. Всі вітчизняні трансформатори мають осердя стержневого тину. Магнітопровід з обмотками встановлюють в бак.

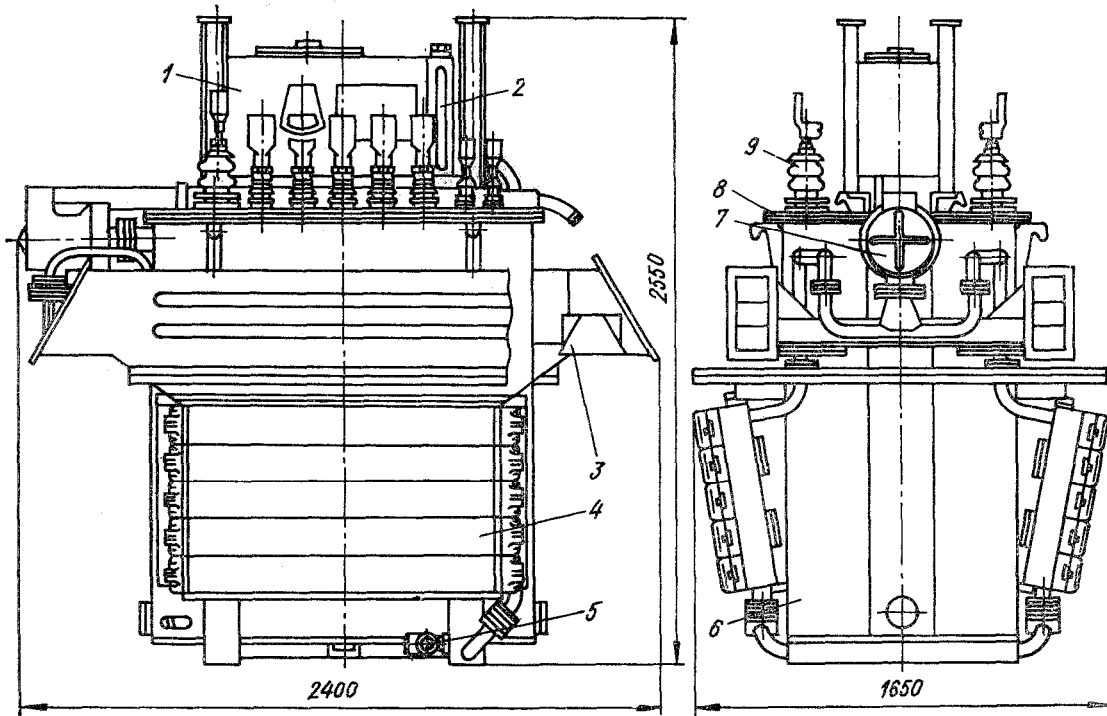


Рис. 8.3. Загальний ніщці трансформатора промислового електролізу

Бак трансформатора б (див. рис. 8.3) зварюється з листової сталі, і закривається кришкою 5, яка прикріплюється до нього через ущільнювач з масло стійкої резини за допомогою болтів. Вище рівня кришки встановлюється розширювач і з вказівником рівня масла 2. Масло є не тільки ізолюючим, але і охолоджувальним середовищем. В розширювачі воно завжди холодніше, ніж в баці, а поверхня його дотикання з повітрям дуже мала, що захищає масло від окислення та зволоження. Об'єм розширювача і рівень масла в ньому розраховуються так, щоб при всіх режимах роботи і коливаннях температури навколишнього середовища бак був заповнений маслом.

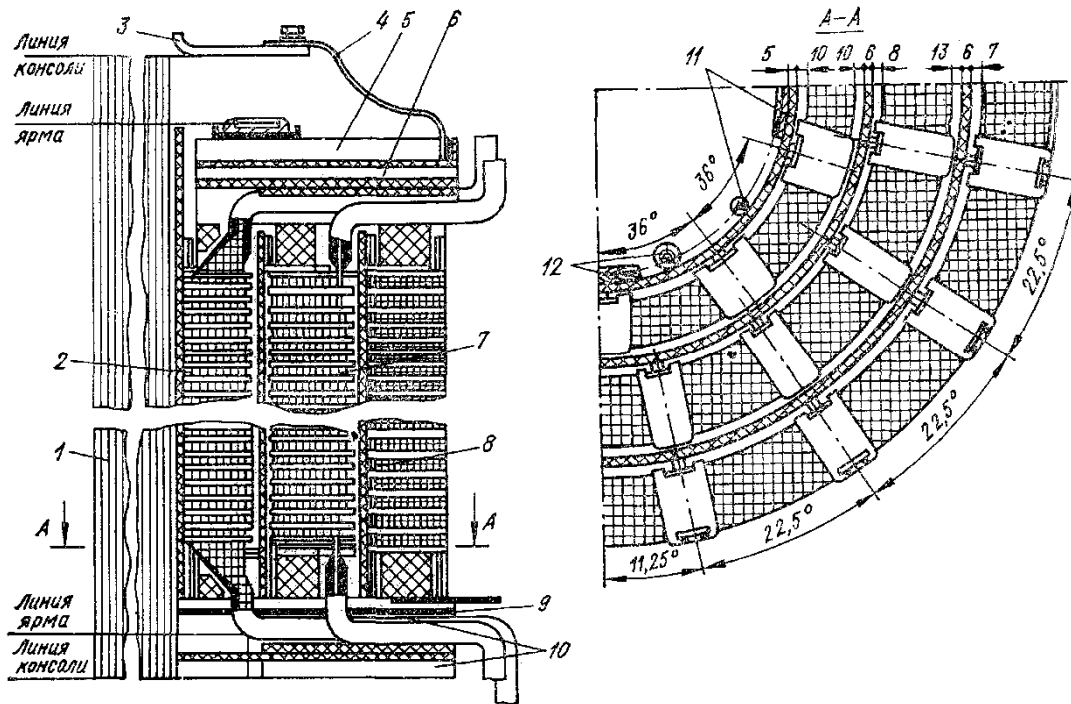


Рис.8.4. Монтаж обмотки на стержні магнітопроводу тягового трансформатора

Обмотки (див. рис, 8.4) намотуються мідним дротом прямокутного перерізу, ізолюваним кількома шарами кабельного паперу і шаром бавовняної пряжі. Вхід котушок високої напруга робиться посиленним по ізоляції. Розташовані концентрично обмотки ізолюються одна від одної і від осердя 1 бакелітовими циліндрами 11. В обмотках, а також між ними і ізоляційними циліндрами за допомогою рейок, склеєних бакелітовим лаком зі стрічок електротехнічного картону, виконуються осьові канали

для охолодження обмоток маслом. Іншими цифрами на рис 8.4 позначено; 2 - перші концентри; 3 - ярмова балка; 4 - шина; 5 - кільце; 6, 9 - ярмова ізоляція; 7, 8 - другі і треті концентри; 10 – урівноважена ізоляція; 12-дерев'яні клинки.

Виводи 9 (див. рис. 8.3) розміщуються на кришці трансформатора. Кожен вивід складається із струмоведучої частини і ізолятора який відділяє струмоведучу частину від кришки. Один кінець ізолятора заходить всередину баку, а другий – виступає над кришкою. Навколо струмоведучого стержня виводу створюється більше магнітне поле, яке замикається по кришці трансформатора. Втрати від вихрових струмів і перемагнічування нагрівають кришку. Для зменшення цих втрат в одному отворі поміщають виводи початку і кінця даної обмотки. Так як струми в виводах рівні і протилежні за напрямком, їх результуючий магнітний потік практично дорівнює нулю.

Система охолодження (рис. 8.3) включає в себе примусову вентиляцію секції (радіатори) 4, в які трансформаторне масло подається за допомогою електронасоса 7. На трубопроводах які 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 .5.

На рамі електровозу трансформатор закріплюється через резинові амортизатори, які встановлені в чотирьох стаканах 3. Бак трансформатора заземлюється на раму кузова через спеціальну бобишку.

8.4.Рівняння ЕРС трансформатора

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

$$e_{1роз} = -L_{1роз} di_1 / dt \text{ і } e_{2роз} = -L_{2роз} di_2 / dt$$

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

Оскільки $i_1 = I_m \sin \omega t$,

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

аналогічно

де $x_1 = \omega L_{1роз}$ і $x_2 = \omega L_{2роз}$ - індуктивний опір розсіювання первинної і вторинної обмоток відповідно.

Таким чином діючі значення цих ЕРС

$$\dot{E}_{1роз} = -j\dot{I}_1 x_1 \quad (8.7)$$

$$\dot{E}_{2роз} = -j\dot{I}_2 x_2 \quad (8.7a)$$

(Тут і далі 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 другого закону Кірхгофа, можна написати

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{1роз} = \dot{I}_1 r_1 \quad (8.8)$$

де r_1 - активний опір первинної обмотки.

Підставимо у (8.8) значення ЕРС розсіювання з (8.7), тоді

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 \quad (8.9)$$

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

Таким чином, згідно (8.9), підведена до первинної обмотки напруга U_1 врівноважується ЕРС E_1 а також падіння напруги в індуктивному і активному її опорах.

Перетворимо рівняння (8.9).

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 \underline{Z}_1 \quad (8.10)$$

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

Для вторинної обмотки, для замкнутої на навантаження з повним опором Z_n , згідно другого закону Кірхгофа,

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2, \dots} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{I}_2 Z_n \quad (8.11)$$

де r_2 - активний опір вторинної обмотки; сума наведених в другій обмотці ЕРС зрівноважується сумою падіння напруги. Як видно з рис.8.1, падіння напруги на навантаженні являє собою напругу на виводах вторинної обмотки, тобто

$$\dot{I}_2 Z_n = \dot{U}_2 \quad (8.11a)$$

З урахуванням цього рівняння (8.11) отримає вигляд

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{2, \text{роз}} = \dot{I}_2 r_2 + \dot{U}_2 \quad (8.11б)$$

Підставимо в (8.11б) вираз (8.7а); тоді вторинна напруга трансформатора

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 r_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 (r_2 + jx_2) = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 Z_2 \quad (8.12)$$

де $Z_2 = (r_2 + jx_2)$ - повний опір вторинної обмотки.

Рівняння (8.10) і (8.12) 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 згідно (8.9) $I_1 = U_1 / r_1$, тобто первинний струм досягне найбільш допустимого значення.

8.5. Рівняння МРС трансформатора

Для виявлення суті фізичних процесів, які 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 (8.10) прийме вигляд

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \quad \text{або} \quad u_1 = e_1 \quad (8.13)$$

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

При холостому ході такого трансформатора (на рис 8.1 $Z_n = \infty$) по первинній обмотці тече струм i_0 , а її ЕРС

$$e_1 = w_1 d\Phi_0 / dt \quad (8.14)$$

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 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 (8.14) матиме вигляд

$$e_1 = -w_1 \frac{d(\Phi_1 + \Phi_2)}{dt} \quad (8.15)$$

Однак і в цих випадках (при навантаженні) прикладена напруга u_1 не незмінна і умова (8.13) залишається попередньою. Відповідно значення e_1 при холостому ході дорівнює йому ж при навантаженні. Але тоді можна прирівняти праві частини рівняння (8.14) і (8.15); отже,

$$\Phi_0 = \Phi_1 + \Phi_2 \quad (8.16)$$

Рівняння (8.16) свідчить про *незмінність магнітного потоку* при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження. Це є найважливішою властивістю трансформатора. На основі рівняння (8.16) можна записати закон рівноваги МРС, які викликають носу цих магнітних потоків:

звідки

$$i_1 w_1 = i_0 w_1 + (-i_2 w_2) \quad (8.17)$$

З рівняння (8.17) випливає, що МРС первинної обмотки трансформатора при навантаженні складається з двох складових: 1) $i_0 w_1$ що створює магнітний потік; 2) $(-i_2 w_2)$ рівної за значенням і протилежної за напрямком МРС вторинної обмотки; вона компенсує МРС вторинної обмотки. Цим і пояснюється незмінність магнітного потоку трансформатора.

Перейшовши до діючих значень струмів, отримаємо рівняння (8.17) в такому вигляді.

$$\dot{I}_1 w_1 = \dot{I}_0 w_1 + (-\dot{I}_2 w_2) \quad (8.18)$$

Слід підкреслити, що основні закономірності ідеалізованого трансформатора справедливі і для реальних трансформаторів, зокрема рівняння МРС (8.18).

8.6. Приведеним трансформатор

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

Вказані ускладнення виконуються 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 тою умовою, що операція приведення не відобразилась на режимі роботи вторинного кола і енергетичних відношеннях. В 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 (8.5): $E_2 = E_1 w_2 / w_1 = E_1 / k$; відповідно у приведеного трансформатора

$$E'_2 = E_1 w'_2 / w_1 = E_1 = k E_2 \quad (8.19)$$

Приведені вторинні струми і напруга визначають з умови незмінності енергетичних співвідношень, а саме: $E'_2 I'_2 = E_2 I_2$ звідси з урахуванням (8.19)

$$I'_2 = I_2 E_2 / E'_2 = I_2 k \quad (8.20)$$

Аналогічно $U'_2 I'_2 = U_2 I_2$; звідси з урахуванням (8.20)

$$U'_2 = U_2 I_2 / I'_2 = k U_2 \quad (8.20a)$$

Приведені опори вторинного кола знаходять з умови рівності активних і реактивних потужностей: $I'^2_2 r'_2 = I^2_2 r_2$, звідси з урахування (8.20)

$$r'_2 = r_2 (I_2 / I'_2)^2 = k^2 r_2 \quad (8.21)$$

Аналогічно

$$I'^2_2 x'_2 = I^2_2 x_2, \quad x'_2 = k^2 x_2 \quad (8.21a)$$

Повний опір

Аналогічно приводиться і повний опір навантаження:

$$Z'_n = k^2 Z_n \quad (8.21b)$$

Рівняння МРС трансформатора (8.18) 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: 1) струм первинної обмотки трансформатора представляє собою суму двох складових, одна з яких (I_0 - струм холостого ходу) необхідна для створення у магнітопроводі основного магнітного потоку, а друга $(-I'_2)$ дорівнює за значенням і протилежна за напрямком струмові вторинної обмотки; 2) будь-яка зміна струму навантаження (вторинної обмотки) супроводжується змінною первинного струму.

Оскільки магнітний потік є змінним, він викликає, появу в стані втрат від вихрових струмів і гістерезису, потужність яких еквівалентна активній складовій струму I_0 . Таким чином цей струм має дві складові: 1) реактивну I_{op} , яка представляє собою намагнічувальний струм, який співпадає по фазі з потоком Φ ; 2) активну I_{0a} , обумовлену магнітними втратами, дуже малу за значенню і випереджаючу реактивну складову на кут 90° . Відповідно

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{op}^2} \quad (8.22)$$

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

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (8.23a)$$

$$\dot{U}'_2 = -\dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \quad (8.23б)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + (-\dot{I}'_0) \quad (8.23в)$$

Рівняння (8.23a) - це незмінене (8.10), а (8.23б) - рівняння (8.12) після' приведення.

8.7. Схема заміщення приведенного трансформатора

Приведення вторинної обмотки до первинної дозволяє не тільки полегшити і спростити розрахунки, але й побудувати просту електричну модель трансформатора, в якій магнітний зв'язок між первинною і вторинною частинами замінений легко досліджуваним і розрахунковим електричним зв'язком.

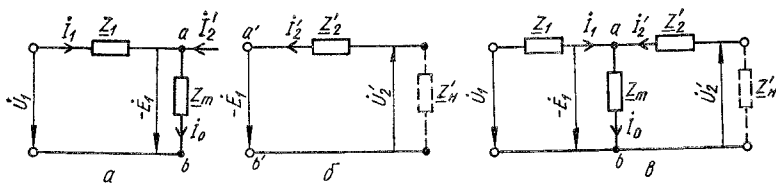
Дій такої, побудови виведемо ще два допоміжних рівняння; оскільки $\dot{E}'_2 = E_1$, рівняння (8.23б) можна записати так:

$$-\dot{E}_1 = -(\dot{U}_2 + \dot{I}'_2 Z'_2) \quad (8.14a)$$

а для приведенного трансформатора рівняння (8.11a) дістає вигляд $\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_n$. Тоді

$$-\dot{E}_1 = \dot{I}'_2 (Z'_2 + Z'_n) \quad (8.24б)$$

Рівняння (8.23a) і (8.23б) описують електричне коло на рис. 8.5а. Дійсно, напруга U'_1 врівноважується ЕРС самоіндукції $(-\dot{E}_1)$ і падінням напруги $\dot{I}_1 Z_1$; до вузла струмів а протікає струм \dot{I}'_2



який напрямлений назустріч струму \dot{I}_1 . Величина $(-E_1)$ чисельно може бути представлена падінням напруги $I_0 Z_m$ в деякому повному опорі

$$Z_m = \sqrt{r_m^2 + x_m^2} \quad (8.25)$$

Рівняння (8.24) описує електричне коло на рис.8.5б. Дійсно, якщо до електричного кола, яке має два

Рис. 8 5 Елемент схеми (а, б) і повна схема заміщення (в) трансформатора

послідовно з'єднані резистори, прикласти різницю потенціалів рівну $(-E_1)$, то у вказаному напрямку поте-

тече струм \dot{I}'_2 . Видно, що на схемах рис. 8.5а і б точки a і a' , b і b' є відповідно точками рівного потенціалу, що дозволяє їх об'єднати і отримати повну схему заміщення (рис. 8.5в).

Ця електрична схема повністю, як і трансформатор з магнітним зв'язком, описується рівнянням (8.23); отже, вона представляє модель трансформатора, зібравши і дослідивши яку можна вивчати всі явища, які проходять в трансформаторі. Через особливості графічного позначення схема отримала назву Т-подібної

8.8. Режим холостого ходу трансформатора

Це режим роботи трансформатора при відсутності навантаження, тобто на рис. 8.1 $Z_k = 0$, а на рис.8.5в $Z'_k = \infty$ і виходячи з цього $I'_2 = 0$.

Схема режиму холостого ходу (як і інших режимів), порядок проведення досліду дані у відповідних посібниках по проведенню лабораторних робіт (або дослідів). Основні рівняння трансформатора отримають вигляд:

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_0 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (8.26a)$$

$$\dot{U}'_{20} = \dot{E}'_2 \text{ або } \dot{U}_{20} = \dot{E}_2 \quad (8.26б)$$

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 \quad (8.26в)$$

Схема заміщення холостого ходу фактично є елементом на рис. 8.5а без струму I_2' який входить. Якщо до первинної обмотки підвести номінальну напругу $U_{1ном}$, то вольтметр у вторинній обмотці виміряє напругу U_{20} , яка є *номінальною напругою* вторинної обмотки і яка практично рівна вторинній ЕРС. Тоді, згідно виразу 8.6, $k = U_{1ном} / U_{20}$. Вимірявши амперметром потужність, яку споживає трансформатор P_0 , знаходять параметри схеми заміщення:

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

і

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

Струм 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

$$r_m = P_0 / I_0^2 \quad (8.27а)$$

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

$$Z_m = U_{1ном} / I_0 \quad (8.27б)$$

$$x_m = \sqrt{Z_m^2 - r_m^2} \quad (8.27в)$$

Тому ділянка схеми заміщення між точками a і b на рис.8.5, яка визначається виразом (8.25), називають *колом намагнічування*.

Отже, дослід холостого ходу дозволяє дослідним шляхом визначити, коефіцієнт трансформації, магнітні втрати в сталі і параметри частини схеми заміщення. Рівняння (8.26) дозволяє, побудувати векторну діаграму при холостому ході.

8.9. Режим короткого замикання трансформатора

Цей режим при замкнених накоротко затискачах вторинної обмотки трансформатора, тобто нарис. 8.1 $Z_k = 0$, а на рис. 8.5в $Z_k' = 0$ 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 $U_{1к}$ по обмотках потечуть номінальні струми. Напруга, як правило складає 5-10% номінальної, тому магнітний потік, значення якого залежить від напруги [див. рівняння (8.4) і (8.23а)], також малий. Але магнітні втрати сталі, як відомо, пропорційні квадрату індукції, тобто квадратів магнітного потоку.

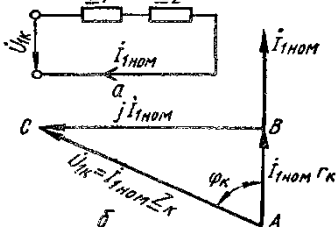
Наприклад, нехай при досліді короткого замикання $U_{1к} = 0.07U_{1ном}$; тоді $\Phi_k \approx 0.07\Phi_{ном}$ і магнітні втрати складуть $(\Phi_k / \Phi_{ном})^2 \cdot 100 = 0.07^2 \cdot 100 = 0.49\%$ магнітних втрат при номінальному режимі. В такому випадку втратами в сталі і струмом холостого ходу можна знехтувати. При цьому зі схеми заміщення виключається коло намагнічування, а сама схема отримає вигляд, представлений нарис. 8.6а; згідно умови проведення режиму короткого замикання $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' = \dot{I}_{1ном}$.

Повний опір схеми заміщення при короткому замиканні

$$Z_k = Z_1 + Z_2' = \sqrt{r_1^2 + x_1^2} + \sqrt{r_2'^2 + x_2'^2} = \sqrt{r_k^2 + x_k^2} = U_{1к} / I_{1ном} \quad (8.28а)$$

При проведенні дослідів короткого замикання ватметром вимірюють споживану з мережі потужність P_k ; тоді

$$r_k = r_1 + r_2' = P_k / I_{1ном}^2 \quad (8.28б)$$



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 $I_{ном}^2 r_k$ або, як часто говорять втрат в міді, тобто $p_{m1} + p_{m2} = P_k$.

Рис. 8.6. Схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) трансформатора при досліді короткого замикання

Розділити Z_k по (8.28а) на складові дуже важко. Як правило їх приймають однаковими, тобто $Z_1 = Z_2 = Z_k / 2$, що дуже близьке до дійсності.

Побудуємо векторну діаграму режиму короткого замикання (рис. 8.6б), маючи на увазі, що згідно (8.23а) і схеми заміщення в цьому режимі $\dot{U}_{1k} = \dot{I}_{ном} Z_k$.

Сумістимо вектор струму $I_{ном}$ з віссю ординат; тоді вектор активного падіння напруги $I_{ном} r_k$ буде знаходитись з ним в фазі, а індуктивного $-j I_{ном} x_k$ повернутий проти ходу годинникової стрілки на кут 90° (символ f). Повне падіння напруги $I_{ном} Z_k$ являє собою гіпотенузу прямокутного трикутника, якій називається *трикутником короткого замикання*. Відмітимо, що всі його сторони пропорційні струму.

З трикутника короткого замикання визначають найважливіший параметр трансформатора - *напруга короткого замикання* u_k , яким називають виражене у відсотках відношення первинної напруги U_{1k} до номінальної $U_{ном}$, коли в режимі короткого замикання по обмотках трансформатора течуть номінальні струми; звідси

$$u_k = \frac{U_{1k}}{U_{ном}} \cdot 100 \quad (8.29)$$

Найчастіше $u_k = 5 + 10\%$.

Катети трикутника нарис. 8.6б AB і BC називають відповідно *активною*

$$u_{k.a.} = u_k \cos \varphi_k \quad (8.29a)$$

і *реактивною*

$$u_{k.r.} = u_k \sin \varphi_k \quad (8.29b)$$

складовими напруги короткого замикання і також виражають у відсотках.

Відношення реактивної і активної складових

$$\operatorname{tg} \varphi_k = BC / AB = u_{k.p.} / u_{k.a.} = x_k / r_k = 1 \div 10$$

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 (значить, Z_1 і Z_2') і 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.

8.10. Режим навантажений трансформатора

Цьому режимові відповідає схема заміщення на рис. 8.5в, а фізичні процеси в ньому описані рівнянням (8.23), за допомогою яких можна побудувати точну векторну діаграму і 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, в багатьох випадках для практики цим струмом можна знехтувати, тобто прийняти $I_0 = 0$, а значить $Z_m = \infty$ на рис.8.5в. В такому випадку рівняння струмів (8.23в) набуде вигляду

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_2' \quad (8.30)$$

а схема заміщення - як це зображено на рис. 8.7а. Я параметри визначені рівняння (8.28); знак "мінус" біля вторинної напруги пояснюється тим, що на схемі рис. 8.5в показано напрямок вторинного струму ($+\dot{I}_2'$), а на схемі рис. 8.7а - напрям струму ($+\dot{I}_2$).

Для схеми на рис. 8.7а замість двох рівнянь (8.23а) і (8.23б), згідно закону Ома, можна записати одне:

$$\dot{U}_1 = \dot{I}_1 Z_k + (-\dot{I}'_2 Z'_k) = -\dot{U}'_2 + \dot{I}_1 Z_k$$

де Z_k визначається по (8.28а)

З рівняння (8.31) випливає, що при нехтуванні струмом I_0 трансформатор може бути заміщений параметром короткого замикання Z_k .

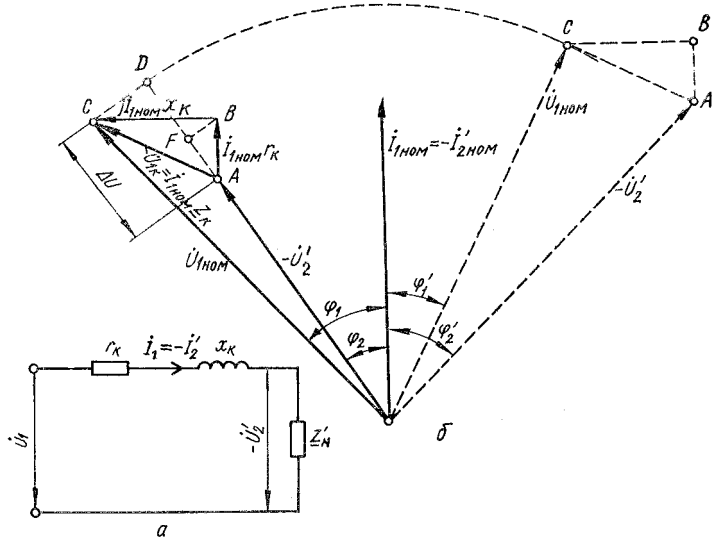


Рис. 8.7. Опрощена схема заміщення (а) і векторна діаграма (б) визначається коефіцієнтом потужності $\cos \varphi_2$ трансформатора, що працює в режимі навантаження

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. 8.7а, вважаючи, що до трансформатора підведена номінальна напруга, він навантажений номінальним струмом $I_{1ном}$, а характер навантаження - активно-індуктивним

тобто дано кут φ_2 .

Відмітимо, що вторинна напруга при цих умовах, з урахуванням (8.30) відповідає номінальному струмові:

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

Для побудови і визначення практичних можливостей векторної діаграми (рис. 8.7б) припускаємо, що значення Z_k відоме.

Сумістимо з віссю ординат вектор струму $\dot{I}_{1ном} = \dot{I}'_{2ном}$, на кут φ_2 його випереджує вектор напруги $(-\dot{U}'_2)$. Для побудови вектора напруги $\dot{U}'_{1ном}$ звернемося до рівняння (8.31); обидва рівняння відрізняються одне від одного на величину $\dot{I}_1 Z_k$, яка, як слідує з (8.28а), при номінальному струмі представляє собою напругу в режимі короткого замикання, тобто гіпотенузу трикутника короткого замикання. Виходячи з цього для побудови вектора $\dot{U}'_{1ном}$ необхідно до кінця вектора $(-\dot{U}'_2)$ побудувати трикутник короткого замикання (рис. 8.6б) так, щоб катет AB (активна складова) співпадав за напрямком з вектором струму, а катет BC (реактивна складова) був йому перпендикулярний. Проводячи після того пряму OC , отримаємо вектор напруги $\dot{U}'_{1ном}$ який випереджує струм на кут φ_1 .

При струмі, який відрізняється від номінального,

$$I_1 = k_n I_{1ном} \quad (8.32)$$

де k_n - коефіцієнт навантаження, в k_n разів змінюються неї сторони трикутника короткого замикання (див. рис. 5.6б). При незмінному значенні первинної напруги це призведе до зміни вторинної напруги (див. рис. 8.7б), яка, отже, 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. Трикутник ABC при цьому не змінюється і зберігає своє положення в площині креслення. Провівши коло радіусом OC і переносячи вектор $\dot{U}'_{1ном}$ по ходу годинникової стрілки (штрихова частина діаграми на рис. 8.7б), впевнимися, що при активному навантаженні ($\varphi = 0$) вторинна напруга піднялася, а при активно-ємнісному ($\varphi_2 = \varphi'_2 < 0$) - стала ще більшою.

Таким чином можна зробити другий висновок: вторинна напруга залежить від характеру навантаження при незмінній її величині.

8.11. Зміна напруги і зовнішня характеристика трансформатора

Номінальною зміною напруги трансформатора при даному $\cos \varphi_2$ називається виражена у відсотках Номінальної вторинної напруги арифметична різниця між номінальною вторинною напругою на виводах вторинної обмотки при холостому ході і напругою на тих же виводах при номінальному вторинному струмі, номінальною частотою і номінальною первинною напругою:

$$\Delta u_{\text{ном}} = \frac{U_{20} - U_2}{U_{20}} \cdot 100 = \frac{U'_{20} - U'_2}{U'_{20}} \cdot 100 \quad (8.33)$$

Оскільки при холостому ході відсутнє падіння напруги в обмотці трансформатора, то згідно рівняння (8.31) $U'_2 = U_1$ а при їх номінальних значеннях $U'_{20} = U_{1\text{ном}}$ тоді рівняння (8.33) прийме вигляд

$$\Delta u_{\text{ном}} = \frac{U_{1\text{ном}} - U'_2}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 = \frac{\Delta U_{\text{ном}}}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 \quad (8.33a)$$

Абсолютне значення зміни напруги $\Delta U_{\text{ном}} = U_{1\text{ном}} - U'_2$ може бути визначене так, як сказано далі.

Кут $(\varphi_1 - \varphi_2)$ між векторами первинної і вторинної напруги на рис.8.76 дуже малій, тому наближено за модуль вектора $\dot{U}_{1\text{ном}}$ можна прийняти його проекцію на напрямок вектора $(-\dot{U}_2)$, тобто відрізок OD ; тоді $\Delta U_{\text{ном}} = OD - OA = DA$. Безпосередньо виміряти $\Delta U_{\text{ном}}$, з достатньою точністю на векторній діаграмі дуже важко через те, що це мала величина.

Спроекуємо на лінію OD вектори $\dot{I}_{1\text{ном}} r_k$ і $j \dot{I}_{1\text{ном}} x_k$, тобто відповідно активну і індуктивну складові напруги U_{1k} їх проекціями будуть відрізки AF і FD . Виходячи з цього

$$\Delta U_{\text{ном}} = DA = AF + FD = I_{\text{ном}} r_k \cos \varphi_2 + I_{1\text{ном}} x_k \sin \varphi_2$$

Підставивши це значення в формулу (8.33a), отримаємо

$$\Delta u_{\text{ном}} = \frac{I_{\text{ном}} r_k \cos \varphi_2 + I_{1\text{ном}} x_k \sin \varphi_2}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 \quad (8.34a)$$

Нагадаємо, що згідно формули (8.29)

$$\frac{I_{1\text{ном}} r_k}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 = u_{k.a} \quad \text{і} \quad \frac{I_{1\text{ном}} x_k}{U_{1\text{ном}}} \cdot 100 = u_{k.p}$$

- відповідно активна і реактивна складові напруги короткого замикання; з урахуванням цього

$$\Delta u_{\text{ном}} = u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2 \quad (8.34b)$$

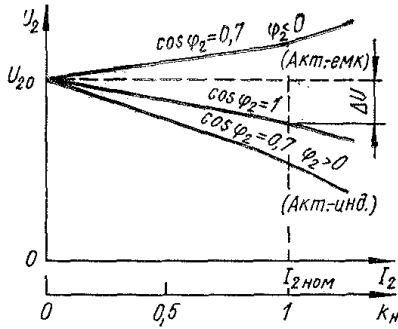
Приймаючи до уваги умову (8.30) на основі виразу (8.34a) можна зробити висновок про те, що *зміна напруги пропорційна струмові навантаження*; її можна визначити для будь-якого струму, який відрізняється від номінального в $k_n = I_1 / I_{1\text{ном}}$ разів. Дійсно, сторони трикутника короткого замикання (величини $u_{k.a}$ і $u_{k.p}$) пропорційні струмові, тобто коефіцієнту навантаження, тому

$$\Delta u = k_n (u_{k.a} \cos \varphi_2 + u_{k.p} \sin \varphi_2) \quad (8.35a)$$

Маючи на увазі вираз (8.29a) і (8.29b) отримаємо ще одну формулу для визначення зміни напруги при будь-якому навантаженні:

$$\Delta u = k_n (u_k \cos \varphi_k \cos \varphi_2 + u_k \sin \varphi_k \sin \varphi_2) \quad (8.35b)$$

Вираз (8.35b) дозволяє зробити два важливих висновки: 1) зміна напруги більша в того трансформатора, у якого більша напруга короткого замикання; 2) при заданій величині навантаження Δu досягає найбільшого значення $\varphi_2 = \varphi_k$.



Рисю8.8.Зовнішні характеристики трансформатора

Слід сказати, що зроблені при виведенні формул (8.34) допущення вносять деяку неточність при визначенні Δu для активно-ємнісного навантаження, коли $\varphi_2 < 0$.

Зовнішньою характеристикою трансформатора називається залежність $U_2 = f(I_2)$ можна також показати як залежність $U'_2 = f(I'_2)$ або $U_2 = f(k_n)$ і побудувати за допомогою формули (8.35) для будь-якого характеру навантаження.

На рис. 8.8 показані внутрішні характеристики при різних характерах навантаження; в межах $0 < k_n < 1$ вони практично прямолінійні.

Таким чином, тягові двигуни електровоза змінного струму, які представляють для тягового трансформатора активно-індуктивне навантаження, під час руху живляться напругою, яка змінюється. Аналогічно змінюється і напруга в контактній мережі, що отримує живлення від трансформаторів тягових підстанцій.

Контрольні залітання і задачі

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 тягового 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. Напишіть рівняння МРС трансформатора і поясніть роль кожної складової. Чи змінюється магнітний потік при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження?
8. Що таке приведений трансформатор? Для чого і при яких умовах робиться приведення?
9. Чому зі збільшенням вторинного струму зростає первинний струм?
10. Що називають схемою заміщення трансформатора? Як вона будується?
11. Що визначають при проведенні режимів холостого ходу і короткого замикання трансформатора?
12. Що називають напругою короткого замикання трансформатора і в яких одиницях вона вимірюється?
13. Зобразіть спрощену схему заміщення трансформатора в режимі навантаження і відповідну її векторну діаграму; покажіть, як буде змінюватись вторинна напруга при зміні величини і характеру навантаження?
14. Що називають номінальною зміною напруги трансформатора; покажіть її на зовнішніх характеристиках при різних характерах навантаження?
15. ЕРС у вторинній обмотці трансформатора 100 В , а число витків первинної і вторинної обмоток відповідно дорівнюють 300 і 60 , Чому дорівнює приведені значення ЕРС?
16. В режимі короткого замикання вольтметр показує 50 В , амперметр - 10 А , ватметр - 300 Вт . Визначити параметри короткого замикання і номінальну зміну напруги при $\cos \varphi_2 = 0.8$ (якщо $\varphi_2 > 0$ і $\varphi_2 < 0$) трансформатора, первинна, напруга якого дорівнює 1000 В .

Частина 9. Трифазні і спеціальні трансформатори

9.1. 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 виконуються силові трансформатори, призначені для передачі і розподілу електричної енергії на трансформаторних підстанціях промислових підприємств.

В системах електропередачі, де потрібно перетворювати великі потужності (більше $80\ 000\text{ кВА}$), замість трифазних трансформаторів використовуються групи, які складаються з трьох однофазних трансформаторів. Пояснюється це величезністю трифазних трансформаторів великої потужності і складністю їх транспортування від заводів-виготовлювачів до місця вантажу.

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 такому. Використаємо трифазну групу з трьох однофазних трансформаторів (рис. 9.1а), по обмотках яких A, B і C течуть синусоїдальні струми, зсунуті по часу відносно один одного $2\pi/3$ рад. Будемо вважати, що відповідні магнітні потоки також синусоїдальні, тобто

$$\Phi_A = \Phi_m \sin \omega t, \Phi_B = \Phi_m \sin(\omega t - 2\pi/3), \Phi_C = \Phi_m \sin(\omega t - 4\pi/3)$$

Об'єднаємо три стержні 1, 2 і 3 (див. рис. 9.1а) в один загальний, тоді сумарний магнітний потік в ньому

$$\begin{aligned} \Sigma\Phi &= \Phi_A + \Phi_B + \Phi_C = \Phi_m [\sin \omega t + \sin(\omega t - 2\pi/3) + \sin(\omega t - 4\pi/3)] = \\ &= \Phi_m [\sin \omega t + \sin \omega t \cos 2\pi/3 - \cos \omega t \sin 2\pi/3 + \sin \omega t \cos 4\pi/3 - \cos \omega t \sin 4\pi/3] = \\ &= \Phi_m [\sin \omega t (1 - 0.5 - 0.5) - \cos \omega t ((3/4)^{1/2} - (3/4)^{1/2})] = 0 \quad (9.1) \end{aligned}$$

Отже, загальний стержень можна викинути, отримавши симетричний трансформатор (рис. 9.1б).

В 1889 році М.О. Доливо-Добровольський відмітив, що падіння магнітного потенціалу в ярах трансформатора фази B невелике і запропонував їх викинути, отримавши більш компактний трансформатор (рис. 9.1в). Ця конструкція отримала загальне розповсюдження. Такий магнітопровід не повністю симетричний; щоб зменшити симетрію, переріз яра виконують трохи більшим за переріз стержнів. Крім того, така магнітна несиметрія позначається лише на струмі холостого ходу: в обмотці 5 (середній стержень) він буде менший, ніж в інших фазах. Але, як показано в п. 8.10, струм холостого ходу дуже мало впливає на робочі струми обмоток. На кожному стержень насаджують обмотку $ВН$ і $НН$ (рис. 9.1а), тому при симетричній напрузі живлення і рівномірному навантаженні всі фази знаходяться в однакових умовах. Виходячи з цього, виведені раніше формули і схеми заміщення для однофазного трансформатора справедливі і для трифазного трансформатора. Виключення складає режим холостого ходу, на який впливає схема з'єднання обмотки.

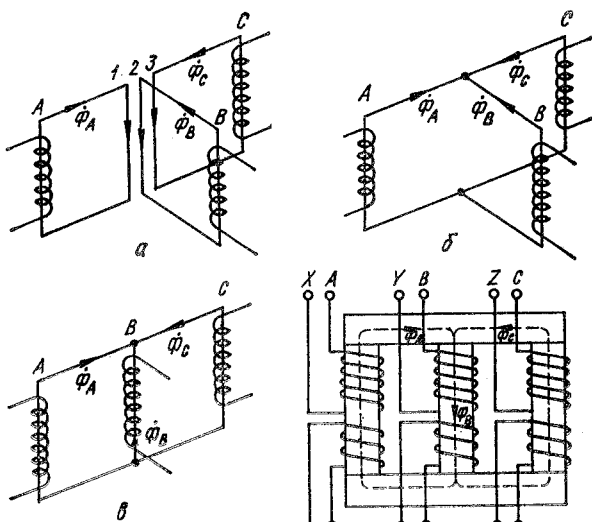


Рис. 9.1 Утворення тристержневого трансформатора (а-в) і його схема (г)

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 початий і кінці фаз переплутати, то з'єднання може бути зустрічним, що призведе до порушення нормальної роботи трансформатора,

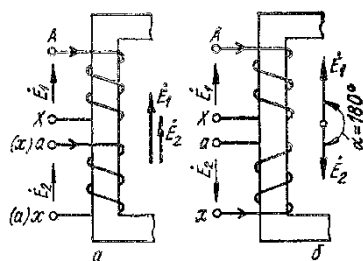
На рис. 9.1г показано позначення початків і кінців первинних і вторинних обмоток: A, B, C і X, Y, Z відповідно початки і кінці фаз і обмотки $ВН$; a, b, c і x, y, z - відповідно початки і кінці фаз обмоток $НН$.

Обмотки з'єднують "зіркою" ($Y; Y$) або "трикутником" ($\Delta; \Delta$); з'єднання показують умовними позначеннями через дріб, в якого чисельник - обмотка $ВН$. Наприклад, якщо об-

мотки трансформатора з'єднані по схемі "зірка-зірка", то умовне позначення буде Y/Y ; схема "зірка з нульовим дротом - трикутник" позначається Y/Δ .

9.2. Групи з'єднань трифазних трансформаторів

До цих пір при вивченні роботи трансформаторів ми твердили, що вектори ЕРС \dot{E}_1 і \dot{E}_2 співпадають по фазі. Це справедливо лише при однаковому намотуванні і однойменному маркуванні виводів первинної і вторинної обмоток (рис. 9.2а). Якщо ж в трансформаторі змінити напрямок намотування обмотки $НН$ або при зберіганні намотування переставити позначення її виводів (рис. 9.2а - в дужках), то вектор \dot{E}_2 виявиться зсунутим по фазі відносно \dot{E}_1 на кут 180° (рис. 9.2б). Аналогічні справи з зсувом первинної і вторинної напруг, оскільки для внутрішнього навантаження (споживача) ЕРС і напруга мають однакову фазу.



У трифазних трансформаторах кут α залежить також і від схеми з'єднання первинної і вторинної обмоток, причому його значення може змінюватися від 0 до 360° , а кратність зсуву складає 30° . В залежності від значення кута α трансформаторі 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. 9.2, для однофазних трансформаторів можливі дві групи з'єднань: *нульова* (рис. 9.2а) і *шоста* (рис. 9.2б). В СРСР виготовляють однофазні трансформатори лише нульової групи (кут $\alpha = 0$), яка позначається

1/1-0.

Група з'єднання визначається так: вектор первинної лінійної напруги підводять до цифри 12 годинникового циферблату, тоді вектор вторинної лінійної напруги покаже номер групи з'єднань; якщо вектори співпадають - група нульова. Можна визначити групу, розділивши кут зміщення а цих векторів на 30 .

Дім прикладу на рис. 9.3 показані схеми з'єднання обмоток Y/Y і відповідні векторні діаграми для нульової (рис. 9.3а) і шостої (9.3б) груп. На рис. 9.4 показані схеми з'єднання обмоток Y/Δ і відповідні векторні діаграми для *одинадцятої* (рис. 9.4а) і *п'ятої* (рис. 9.4б) груп.

Рис.9.2. Групи з'єднань обмоток однофазного трансформатора

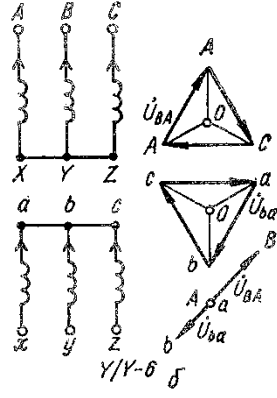
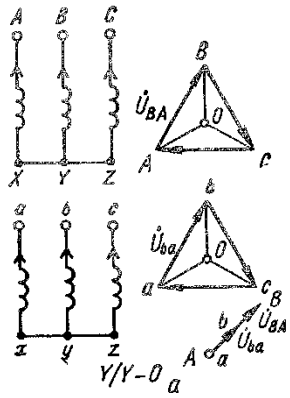


Рис.93. Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі Y/Y

Розглянуті чотири групи з'єднання (0, 6, 11 і 5) називаються основними. 31 них шляхової колового пере маркування можна отримати і інші (*похідні*) групи

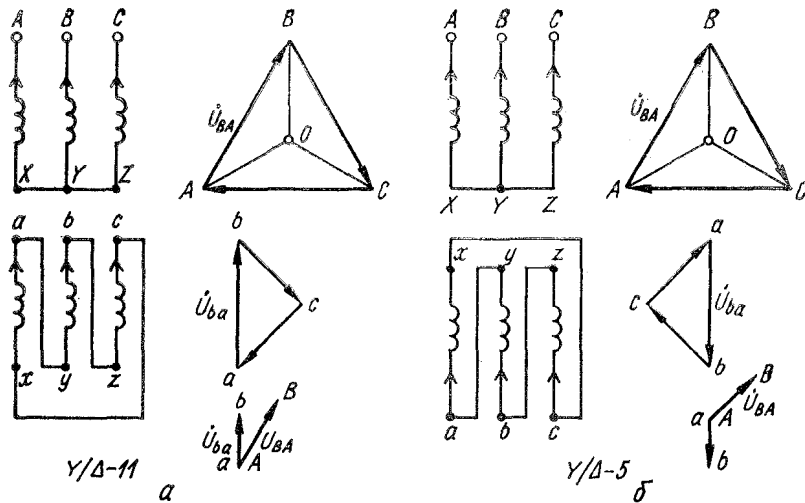


Рис. 9.4. Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схем Y/Δ

з'єднань: при 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 *НН* 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 $Y/Y - 10$ тощо.

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

9.3. Паралельна робота трансформаторів

Роздроблення загальної трансформаторної потужності на ряд паралельно працюючих трансформаторів (їх первинні і вторинні обмотки відповідно ввімкнені паралельно) дозволяє:

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

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

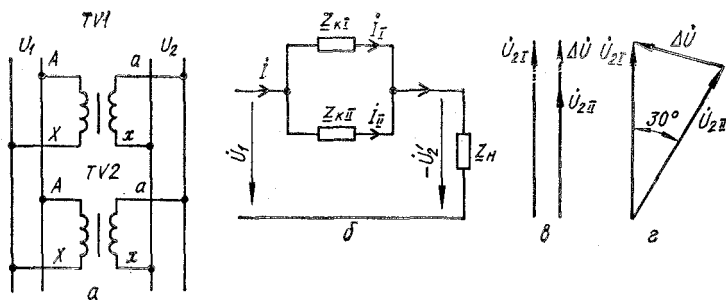


Рис. 9.5. Схеми ввімкнення (а) з заміщення (б) трансформаторів, виникнення напруги ΔU при їх паралельній роботі з різними коефіцієнтами трансформації (в) або належності до різних груп з'єднань обмоток (г)

ні первинні і відповідно вторинні напруги повинні бути однакові, тобто повинні бути однакові коефіцієнти трансформації ($k_I = k_{II} = \dots = u_{kn}$).

- 2) паралельно працюючі трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднань;
- 3) паралельно працюючі трансформатори

ні мати однакові напруги короткого замикання ($u_{kI} = u_{kII} = \dots = u_{kn}$).

Розглянемо по черзі наслідки недотримання цих умов.

Нерівність коефіцієнтів трансформації, тобто $k_I \neq k_{II}$ (вважається, що $U_{II} = U_{III}$). При цьому між паралельно ввімкненими трансформаторами (рис. 9.5а) повний опір яких Z_{kI} і Z_{kII} (див. п. 8.9), виникає зрівнювальний струм, обумовлений різницею вторинних напруг (рис. 9.5в):

Цей зрівнювальний струм перевантажує трансформатор з більш високою напругою холостого ходу (з меншим коефіцієнтом трансформації). Трансформатор з великим коефіцієнтом трансформації виявляється не довантаженим. Оскільки перевантаження трансформаторів не припустиме, 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.

Неоднакові групи з'єднання. В цьому випадку між однойменними затискачами вторинних обмоток виникає різниця напруг (рис. 9.5г), яка при найменшій можливості значення кута $\alpha = 30^\circ$ досягає значення $\Delta U = 2U_2 \sin 15^\circ = 0.5U_2$. У абсолютно однакових трансформаторів зрівнювальний струм

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

В даному випадку величина $0.26U_2$ являє собою напругу, прикладену до короткозамкненого трансформатора, I_{yp} є струмом короткого замикання. Порівнюючи ці величини алогічними в п.8.9 бачимо, що вони приблизно в 3-5 разів перевищують напругу короткого замикання і номінальний струм трансформатора. Як видно, таке ввімкнення ні в якому разі неприпустиме.

Неоднакові напруги короткого затикування, тобто $u_{kI} \neq u_{kII}$.

Розподіл навантаження між двома паралельно ввімкненими трансформаторами (див. рис. 9.5б) можна визначити з умови

$$I_1 Z_{kI} = I_2 Z_{kII}$$

Замінивши комплексні величини їх модулями, отримаємо

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{1}{Z_{kI}} \cdot \frac{1}{Z_{kII}}$$

або, згідно п. 8.9,

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{I_{Iном}}{I_{IIном}} \cdot \frac{I_{IIном}}{I_{Iном}} = \frac{I_{Iном}}{U_{I...}} \cdot \frac{I_{IIном}}{U_{II...}}$$

Згідно виразу (8.29) у $U_{1A} = \frac{u_k U_{Iном}}{100}$; тоді

$$\frac{I_I}{I_{II}} = \frac{I_{Iном}}{u_{kI} U_{Iном}} \cdot \frac{I_{IIном}}{u_{kII} U_{Iном}} = \frac{S_{Iном}}{u_{kI}} \cdot \frac{S_{IIном}}{u_{kII}}$$

Таким чином, для того, щоб струми навантаження в паралельно працюючих трансформаторах розподілились прямо пропорційно їх номінальним потужностям $S_{Iном}$ і $S_{IIном}$ трансформатори повинні мати однакові напруги короткого замикання.

Дійсно, 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 $S_{Iном} / S_{IIном} = 3/1$.

Ця вимога пояснюється тим, що у трансформаторів різних потужностей активні і реактивні складові напруги короткого замикання (див. вираз 8.29) різні, у трансформаторів великої потужності $u_{k,p}$, більше, а $u_{k,a}$ менше, ніж у трансформаторів малої потужності. Якщо $u_{kI} = u_{kII}$ але $u_{k,pI} \neq u_{k,pII}$ і $u_{k,aI} \neq u_{k,aII}$ то струми паралельно працюючих трансформаторів будуть зсунуті по фазі на деякий кут (див. рис. 8.66). При цьому сумарний струм, який віддається навантаженню, буде дорівнювати векторній сумі обох трансформаторів, тобто менше їх алгебраїчної суми. Значить і в цьому випадку номінальна потужність трансформатора не буде повністю використана

9.4. Автотрансформатор

Це такий трансформатор, у якого між первинною і вторинною обмотками є не тільки магнітний, але і електричний (гальванічний) зв'язок. Автотрансформатори можуть бути підвищувальними і понижувальними, одно- чи трифазними.

Розглянемо принцип роботи на прикладі однофазного понижувального автотрансформатора, схема якого представлена на рис. 9.6.

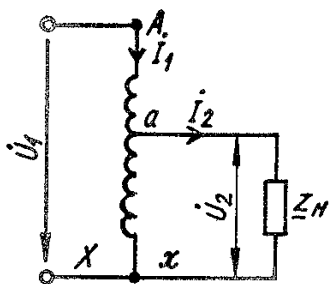


Рис.9.6.Схема трансформатора

В режимі холостого ходу ($Z_H = \infty, I_2 = 0$) струм, що проходить по обмотці $A-X$ призводить до появи магнітного потоку, який індукує 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} - кількості 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 якому, як і в п. 8.10, 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 (8.18) мало б вигляд $\dot{I}_1 w_{AX} = -\dot{I}_2 w_{ax}$, звідки

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}_2 \frac{w_{AX}}{w_{ax}} = -\dot{I}_2 \frac{1}{k} \quad (9.2)$$

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 (9,2)

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 автотрансформатора.

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

$$w_{Aa} = w_{AX} - w_{ax} = w_{AX} - w_{AX} / k = w_{AX} (1 - 1/k) \quad (9.4)$$

менше, ніж у первинної обмотки звичайного трансформатора

Таким чином, згідно рівнянь (9.3) і (9.4), затрати міді в автотрансформаторі в цілому також можуть бути менші, ніж у звичайного трансформатора. Зменшення кількості обмотувальної міді в такій же мірі викличе і зменшення в ній електричних втрат.

Для будь-якого трансформатора існує поняття *розрахункової* (електромагнітної) потужності, якою визначаються всі його розміри: $S_p = EI$. Згідно виразу (8.4), ЕРС E_1 і E_2 пропорційні магнітному потокові, який можна представити як добуток індукції B на площу поперечного перерізу сталі магнітопроводу q_c ; значить, $\Phi = Bq_c$ і, ввівши деяку сталу c , отримаємо $E = cBq_c$. Якщо густина струму в обмотці j , а площа поперечного перерізу провідника (міді) q_m то $I = jq_m$. Отже, $S_p = c(Bq_c)(jq_m)$, тобто при заданих значеннях B і j розміри магнітопроводу і обмотки визначаються значенням потужності. S_p .

У звичайному трансформаторів розрахункова потужність обох обмоток

$$S_p = E_1 I_1 + E_2 I_2 \quad (9.5)$$

Розрахункова потужність автотрансформатора може бути представлена у вигляді суми потужностей на ділянці *A-a* і *a-x*, тобто

$$S_{p,a} = S_{p,Aa} + S_{p,ax} = E_{Aa} I_1 + E_{2ax} \quad (9.6)$$

З урахуванням (9.4)

$$E_{Aa} = E_1 \frac{w_{Aa}}{w_{AX}} = E_1 \left(1 - \frac{1}{k}\right) \quad (9.7)$$

Підставивши (9.3) і (9.7), отримаємо

$$S_{p,a} = E_1 I_1 (1 - 1/k) + E_2 I_2 (1 - 1/k) = (E_1 I_1 + E_2 I_2) (1 - 1/k) \quad (9.8)$$

Поділивши (9.8) на (9.5), побачимо, що розрахункова потужність автотрансформатора і, значить, його розміри складають частину потужності звичайного трансформатора

$$S_{p,a} / S_p = (1 - 1/k) = k_e \quad (9.9)$$

Величину k_e називають *коефіцієнтом, вигідності*. Очевидно, чим менше значення k , тим, менше k_e , тобто тим вигідніше застосування автотрансформатора.

Фізично це пояснюється тим, що в автотрансформаторі частина енергії передається із первинного кола до вторинного гальванічним шляхом (по дротам), так як вторинне коло електрично зв'язана, з первинним. При $k > 2$ вигідність використання автотрансформатора зменшується; при цьому звичайно $k = 1.2 \div 2$, відповідно $k_e = 0.17 \div 0.5$.

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 *НН* і підключені до них споживачі повинні мати таку ж ізоляцію по відношенню до землі, як обмотка *ВН* і первинне коло. З тієї ж причини в цілях забезпечення електробезпеки не допускається використання автотрансформаторів для живлення кіл низької напруги від мережі високої напруги.

9.5. Зварювальний трансформатор

При ручному дуговому електрозварюванні використовують трансформатори з напругою при холостому ході $U_{20} = 60 \div 75 В$.

Для обмеження струму короткого замикання в момент запалювання дуги і забезпечення стійкого горіння при деякій зміні її довжини (коливання електроду) трансформатор повинен мати різко спадну зовнішню характеристику (рис. 9.7а), для чого зварювальне ішло роблять з великою індуктивністю ($\cos \varphi = 0.4 \div 0.5$). Для регулювання зварювального струму в межах характеристики 1 і 2 на рис. 9.7а ця індуктивність повинна бути змінною.

Для цих цілей у зварювальне коло вмикають реактор (рис. 9.7б), у якого за допомогою відповідного механізму змінюють зазор δ . 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 $U_d \approx 30B$.

По умовах безпеки праці для цілей електрозварювання не можна використати автотрансформатори, які мають гальванічний зв'язок між первинними і вторинними колами., так як зварювальник може потрапити під повну напругу первинного кола.

9.6. Вимірювальні трансформатори

Ці трансформатори використовують в колах змінного струму для вимірювання великих значень струмів (більше декількох десятків ампер). При цьому забезпечується безпека робіт, так як електрозварювальні прилади відділяються від кіл високої напруга, 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).

Рис. 9.7. Зовнішні характеристики (а) і схема (б) зварювального трансформатора з реактором напруг (більше 250 В) і струмів (більше декількох десятків ампер).

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, згідно (8.26) і (8.6) 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 (ненасичені), виготовлені з високоякісної сталі.

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, який проходить через вікно магнітопроводу.

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 (8.23в) і (8.20), $I_1 \approx I'_2 = I_2 / k$. В дійсності через наявність струму холостого ходу виникає деяка похибка при вимірюваннях, для зменшення якої магнітопроводи виконують великого поперечного перерізу (ненасичені) 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 і навіть в сотні разів зростає магнітний потік, індукція і втрати в етапі магнітопроводу (пор. режими п. 8.8 і 8.9), трансформатор перегрівається і може згоріти. 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.

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 т трансформатора і автотрансформатора, в чому вигода використання останнього ?
9. Що таке розрахункова потужність, чому нею визначаються розміри і маса трансформатора?
10. Порівняйте розрахункові потужності звичайного трансформатора і автотрансформатора; коли вигідніше використовувати останній?
11. Де використовують автотрансформатори? В чому є їх недолік, в якій області вони використовуються?
12. Як отримати сильно спадну зовнішню характеристику зварювального трансформатора і регулювати значення його струму?
13. Для чого призначені вимірювальні трансформатори?
14. Який робочий режим роботи трансформатора напруги, чим викликаються похибки вимірювань при роботі з ним?
15. Який робочий режим трансформатора струму, чим викликаються похибки вимірювань при роботі: ним? Чи можна розмикати його вторинну обмотку?

РОЗДІЛ ТРЕТІЙ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ ЗМІННОГО СТРУМУ

Частина 10. Загальні питання теорії машин змінного струму.

10.1. Принцип виконаний 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. Принцип дії найпростішого генератора змінного струму (див. рис. В.1) розглянутий в п. В.2. Наявність контактних кілець і щіток в колі якоря є його суттєвим недоліком, бо при значному струмі і високій напрузі робота ковзного контакту стає ненадійною. Тому, користуючись властивістю кінематичної зворотності електричних машин (див. п. В.4), *обмотку якоря розміщують на статорі* (цю обмотку дані 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 (див. рис. 3.5), якщо від'єднати колектор зі щітками і розділити Π на три рівні частини; отримана *трифазна* обмотка, з'єднана трикутником (рис. 10.1а).

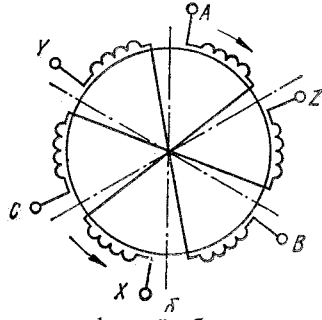
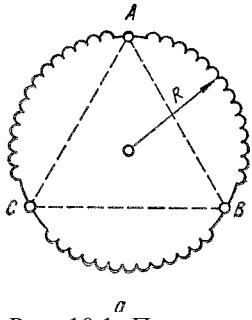


Рис. 10.1. Принципи виконання трифазної обмотки з трьома (а) і шістьма (б) зонами

Запам'ятаємо, що виводи обмоток загальнопромислових і тягових машин, згідно ГОСТ 183-74, позначаються таким чином: C_1, C_2 і 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.

Якщо обмотка розміщена на колі статора, радіусом R , то при значній кількості провідників (пазів) дуга AB , що дорівнює $1/3$ довжини кола, буде еквівалентна алгебраїчній сумі наведених в них

ЕРС, а хорда AB відповідає їх геометричній сумі, що дає напругу між виводами A і B .

Відношення геометричної суми ЕРС секцій фази обмотки до їх алгебраїчної суми є засобом використання обмотки і називається *коефіцієнтом розподілу*. В даному випадку

$$k = \frac{AB}{r\sqrt{3}} = \frac{3\sqrt{3}}{2\pi R/6} \quad (10.1)$$

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.10.16), 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 змішаного струму виконують зазвичай шестизонними.

Для того, щоб всі півфази обмотки із зоною 60° ел. були однакові, потрібно мати однакове ціле число пазів у кожній зоні, тобто кількість пазів, що приходиться на полюс і фазу

$$q = \frac{z}{2m} \quad (10.1)$$

де z - кількість пазів всієї обмотки; m - кількість пар полюсів машини; t - 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 $6p$ 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, виключаючи наведення ЕРС за формою, аналогічною тій, що була зображена на рис. В.4а, 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 $E_1, E_3, E_5, \dots, E_n$.

Згідно теорії змішаних струмів, діюче значення результуючої ЕРС

$$E = \sqrt{E_1^2 + E_3^2 + E_5^2 + \dots + E_n^2} = E_1 \sqrt{1 + (E_3/E_1)^2 + (E_5/E_1)^2 + \dots + (E_n/E_1)^2}$$

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 (див. п. 3.1) 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 зниження п'ятої обмотки.

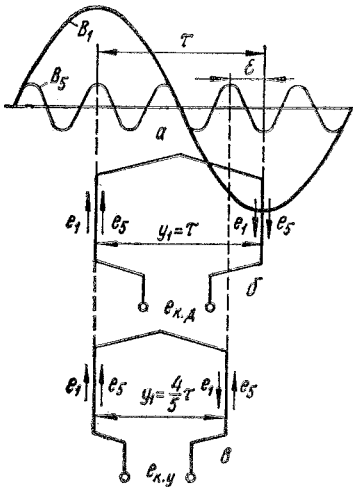


Рис. 10.2. Усунення ЕРС п'ятої гармоніки

Нарис.10.2а 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, e_5) в обох боках секції (рис. 10.2б) 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. 10.2в): результуюча ЕРС $e_{к.с}$ 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. 10.2в видно, що при вкороченні трохи зменшилась сумарна ЕРС першої гармоніки, тобто $E_{1\varepsilon} < E_{1д}$. Це зменшення вважають *коефіцієнтом вкорочення*:

$$k_{y1} = E_{1\varepsilon} / E_{1д} = \sin(90^\circ y_1 / \tau)$$

Магнітним потоком Φ , частота якого f_1 у фазі статора з кількістю витків w_1 наводиться ЕРС, діюче значення якої визначається формулою, аналогічною (8.4):

$$E_1 = 4.44 k_{p1} k_{y1} f_1 w_1 \Phi = 4.44 k_{об1} f_1 w_1 \Phi \quad (10.2)$$

де добуток $k_{p1} k_{y1} = k_{об1} = (0.9 \div 0.94)$ називається *обмотковим коефіцієнтом*.

10.2. Створення магнітного поля, що обертається

Пульсуюче магнітне поле. При випробуванні обмотки однофазним змінним струмом створюється пульсуюче магнітне поле, вектор індукції якого впродовж періоду T , що відповідає куту 2π рад, змінюється від нуля до $+B_m$ знову до нуля, далі до $-B_m$ і знову до нуля. (Це справедливо, якщо знехтувати магнітним опором феромагнітних частин машини).

На рис. 10.3а розподіл індукції показаний в момент часу, що відповідає $\omega t = \frac{\pi}{2}$. В загальному випадку індукція по осі обмотки дорівнює $B_m \sin \omega t$. В кожній точці повітряного проміжку, розміщеній на відстані x від осі обмотки, буде індукція

$$B_x = B_m \sin \omega t \cos x = 0.5 B_m \sin(\omega t - x) + 0.5 B_m \sin(\omega t + x) \quad (10.3)$$

Кожний з членів правої частини (10.3) являє собою біжучу хвилю з амплітудою $0.5 B_m$, де одна обертається проти, а інша - за годинниковою стрілкою. Дійсно, x вибране довільно; значить, завжди $\omega t - x = const$ (або $\omega t + x = const$); тоді

$$x + const = \omega t \quad (10.4)$$

тобто координатах безперервно збільшується (по колу) з часом t .

Швидкість обертання хвилі можна визначити продиференціювавши вираз (10.4); тоді з урахуванням (В.3)

$$dx / dt = \omega = 2\pi f = 2\pi p n \quad (10.5)$$

Отже, пульсуюче магнітне поле можна представити у вигляді двох полів, що обертаються в протилежні боки. При повороті на 360° ел., або 22π рад, кожний вектор $0.5 B_m$ описує коло (рис. 10.3б), таке поле називається *коло-вим*.

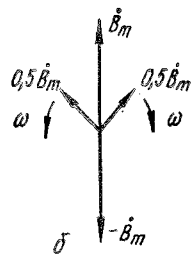
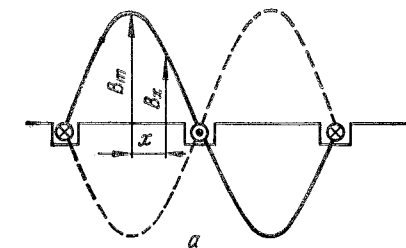


Рис. 10.3. Розподіл індукції в повітряному зазорі (а) і розташування вектора пульсуючого поля (б)

Колове поле при трифазній обмотці. При вивченні принципу виконання трифазного трансформатора (див. я, 9.1) було показано, що сумарний магнітний потік

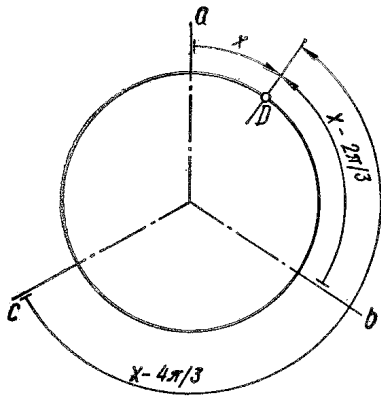


Рис. 10.4. До визначення результуючої індукції в точці із трифазної обмотки

трьох обмоток, по яких течуть синусоїдальні струми, зсунуті в часі на кут 120° , або $2\pi/3$ рад, але магнітні осі яких співпадають, дорівнює нулю [див.(9.1)].

Трифазна обмотка статора рівномірно розподілена по колу (рис. 10.1) і магнітні осі фаз a , b і c зсунуті в просторі на кут 120° ел., або $2\pi/3$ рад. Магнітні індукції фаз дорівнюють відповідно: $B_a = B_m \sin \omega t$, $B_b = B_m \sin(\omega t + 2\pi/3)$, $B_c = B_m \sin(\omega t + 4\pi/3)$.

Визначимо результуючу індукцію у довільно взятій точці B (рис. 1.0.4), що знаходиться від осі a на відстані x (зсув за годинниковою стрілкою).

Для цього спроектуємо вектори B_a , B_b і B_c на вісь, що проходить через точку B , беручи до уваги, що від осей b і c точка B знаходиться на відстані $x - 2\pi/3$ і $x - 4\pi/3$ (зсув проти годинникової стрілки). Кожна фаза створює пульсуюче магнітне поле, тому аналогічно (10.3) отримаємо індукцію в точці D від кожної з цих фаз:

$$B_{ax} = B_m \sin \omega t \cos x = 0.5B_m \sin(\omega t - x) + 0.5B_m \sin(\omega t + x) \quad (10.6a)$$

$$B_{bx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \cos\left(x - \frac{2\pi}{3}\right) = 0.5B_m \sin(\omega t - x) + 0.5B_m \sin\left(\omega t + x - \frac{4\pi}{3}\right) \quad (10.6б)$$

$$B_{cx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{4\pi}{3}\right) \cos\left(x - \frac{4\pi}{3}\right) = 0.5B_m \sin(\omega t - x) + 0.5B_m \sin\left(\omega t + x - \frac{8\pi}{3}\right) \quad (10.6в)$$

Отримано шість магнітних полів, що обертаються, причому три з них [другі члени рівнянь (10.6)] взаємно знищують одне одного, так як

$$\sin(\omega t + x) + \sin\left(\omega t + x - \frac{4\pi}{3}\right) + \sin\left(\omega t + x - \frac{8\pi}{3}\right) = 0 \quad (10.7)$$

Таким чином, результуюча індукція в точці D , буде

$$B_{рез} = B_{ax} + B_{bx} + B_{cx} = 1.5B_m \sin(\omega t - x) \quad (10.7)$$

тобто 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, де в даний момент складова індукції максимальна (тобто максимальний струм фази). Дійсно, $B_{рез} = 1.5B_m$ коли $\sin(\omega t - x) = 1$, тобто при $\omega t - x = \pi/2$, звідки $x = \omega t - \pi/2$. Якщо в даний момент струм максимальний в фазі $A-X$, то $i_a = I_m \sin \omega t = I_m \sin(\pi/2) = I_m$ тобто $\omega t = \pi/2$ і $x = 0$. (точка B на рис. 10.4 знаходиться зліва на осі a).

Отже, результуюча хвиля магнітної індукції перетинає осі фаз обмотки в такій послідовності, в якій струми в фазах проходять через максимум. Звідси впливає важливий практичний висновок: *для вимірювання напряму обертання магнітного поля необхідно змінити хід чергування фаз, тобто поміняти місцями під'єднаний виводів двох фаз до мережі.*

Колове поле при двофазній обмотці. В симетричній двофазній обмотці магнітні осі взаємно перпендикулярні, а струми зсунуті на $\pi/2$.

Магнітні індукції по осях фаз дорівнюють $B_a = B_m \sin \omega t$ і $B_b = B_m \sin(\omega t - \pi/2)$. Міркуючи аналогічно знайдемо індукцію в точці D що відстає від осі a на відстань x :

$$B_{ax} = B_m \sin \omega t \cos x = 0.5B_m \sin(\omega t - x) + 0.5B_m \sin(\omega t + x)$$

$$B_{bx} = B_m \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) \cos\left(x - \frac{\pi}{2}\right) = 0.5B_m \sin(\omega t - x) + 0.5B_m \sin(\omega t + x - \pi)$$

Оскільки $\sin(\omega t + x) + \sin(\omega t + x - \pi) = 0$, рівняння біжучої хвилі прийме вигляд

$$B_{рез} = B_{ax} + B_{bx} = B_m \sin(\omega t - x) \quad (10.8)$$

тобто двофазна обмотка створює хвилю з амплітудою B_m , а швидкість її розповсюдження дорівнює ω .

Колове поле при м-фазній обмотці. Звернемо увагу, що амплітуда результуючого поля двофазної обмотки $B_{рез} = B_m = (2/2)B_m$ а у трифазної обмотки $B_{рез} = 1.5B_m = (2/2)B_m$.

При симетричній м-фазній обмотці, коли фази зсунуті в просторі на кут $2\pi/m$ рад, а струми в часі - на цей же кут, рівняння біжучої хвилі має вигляд

$$B = \frac{m}{2} B_m \sin(\omega t - x) \quad (10.9)$$

Отже, будь-яка симетрична м-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 поїш результуючий вектор магнітної індукції описує в просторі еліпс. З рис. 10.5 бачимо, що вектор $B_{рез}$ що описує еліпс можна подати у вигляді суми двох векторів; B_m - 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 оберտального 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 (див. ч. 11). Таке явище може мати місце, якщо в електричній машині 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. Що таке число пазів на полюс і фаза?
4. З якою метою виконуються вкорочення обмоток, які бувають величини вкорочення?
5. Що таке коефіцієнт вкорочення і обмотковий коефіцієнт?
6. Як можна уявити пульсуюче поле однофазної обмотки?
7. Чому дорівнює швидкість біжучої хвилі; яке поле називається коловим?
8. Які існують умови створення колового оберտального поля? Як це довести при трьох-, двох- і m -фазних обмотках?
9. Чому дорівнює амплітуда хвилі те-фазної обмотки?
10. Що таке еліптичне поле, як воно може бути представлено і чому воно виникає?

Частина 11. Асинхронні машини

11.1. Принцип дії асинхронного двигуна. Ковзання

Асинхронні машини, як і всі інші енергетично зворотні Але виявити принцип їх дії простіше, почавши з двигуна. Три- 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 (статором) і вторинною (ротором) частинами є повітряний проміжок, який для покращення магнітного зв'язку між обмотками роблять мінімальним ($0,3-1,2$ мм); крім цього вторинна частина в асинхронних машинах рухома (обертається).

Якщо трифазну обмотку статора, що має p пар полюсів, під'єднати до мережі з частотою струму f_1 , то виникне обертальне магнітне поле, частота обертання якого, згідно (10.5)

$$n_1 = \omega_1 / (2\pi p) = f_1 / p \quad (11.1)$$

Обертальне магнітне поле статора і ротора (потік Φ) перетинає провідники обмотки статора і ротора та індукує в них ЕРС E_1 і E_2 , під дією останньої з обмотці ротора виникає струм I_2 .

Взаємодія потоку статора і струму якоря призводить до появи електромагнітного обертального 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. При цьому потік Φ не перетинатиме провідників ротора, в них не буде індукватися ЕРС E_2 , не буде струму I_2 і машина працювати не зможе.

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*:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1} \quad (11.2)$$

Воно характеризує ступінь "відставання" ротора від поля статора. Ковзання виражають також у відсотках; в цьому випадку (11.2) множать на 100%.

Зі співвідношення (11.2) можна отримати вираз частоти обертання ротора

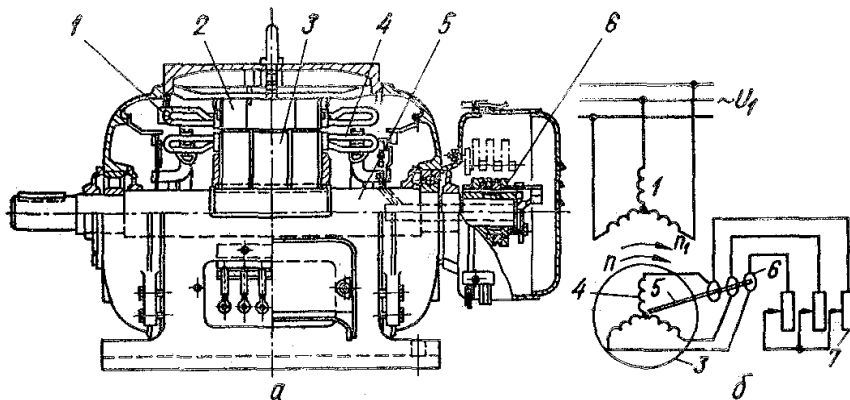
$$n = n_1(1 - s) \quad (11.3)$$

11.2. Будова асинхронних машин

За конструкцією асинхронні машини поділяють на два основних типи: з *фазним* ротором (з контактними кільцями і *короткозамкненим* 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 фазним ротором (рис. 11.1). Трифазна обмотка статора і укладена в пазах його осердя 2. На роторі 3 укладена аналогічна обмотка 4, яка звичайно з'єднана зіркою, а її виводи під'єднані до контактних кілець 6, що насаджені на вал машини 5. По кільцях ковзають щітки, за допомогою яких в коло ротора можна включити резисторі 7.

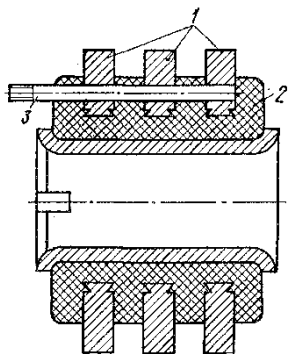


Будова блока контактних кілець зображена на рис. 11.2. Контактні кільця і виготовлюють з бронзи і запресовують в пластмасу 2. Від кожного кільця відходить ізолювана контактна, шпилька 3. Машини забезпечені пристроєм, що дозволяє після запуску машини підняти щітки з контактних кілець, а самі контактні кільця замкнути накоротко.

Будова блока контактних кілець зображена на рис. 11.2. Контактні кільця і виготовлюють з бронзи і запресовують в пластмасу 2. Від кожного кільця відходить ізолювана контактна, шпилька 3. Машини забезпечені пристроєм, що дозволяє після запуску машини підняти щітки з контактних кілець, а самі контактні кільця замкнути накоротко.

Машина з короткозамкненим ротором (рис. 11.3). її осердя статора 2 з обмоткою 1 аналогічне машині на рис.11.1

Рис. 11.1. Асинхронна машина з фазним ротором (а) і схема її ввімкнений рис. 11.1.



В пази осердя ротора 3 закладають без ізоляції стержні 4, що замикаються накоротко з торців двома кільцями. При цьому обмотка ротора дістає вигляд "білчиної клітки" (рис. 11.4а); вона дуже часто саме такі зветься.

Для двигунів великої потужності "білчину клітку" (рис. 11.4б) виготовляють з мідних чи латунних стержнів 2, кінці яких приварюють до короткозамкнених кілець 3, з обох боків осердя 1; для двигунів середньої і малої потужності, її разом з торцевими лопатками 4 (рис.11.4в), що відіграють роль теплорозсіювачів і лопастей вентилятора, виливають з алюмінію,

В електричному відношенні "білчина клітка" являє собою багатofазну 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 короткоза-

Рис.11. 2.Блок контактних кілець

микаючих кілець. Оскільки один виток може бути утворений, як мінімум, двома провідниками (див., наприклад, рис. 3.2), 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.

11.2. Режими роботи асинхронних машин

Режим двигуна. Цей режим є основним. В момент запуску, коли $n=0$, згідно (11.2), $s=1$. Якщо б після запуску ротор досяг синхронної частоти обертання $n=n_1$, то ковзання дорівнювало б нулю. Таким чином діапазони частот обертання і ковзання асинхронного двигуна такі:

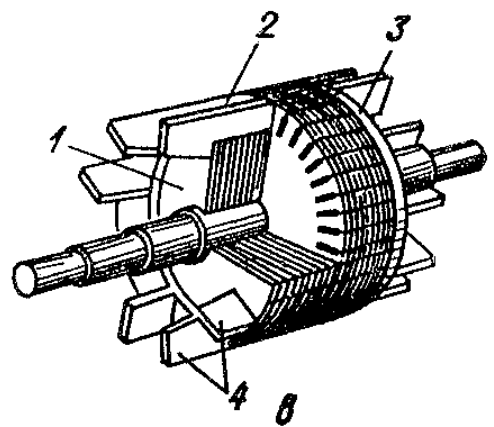
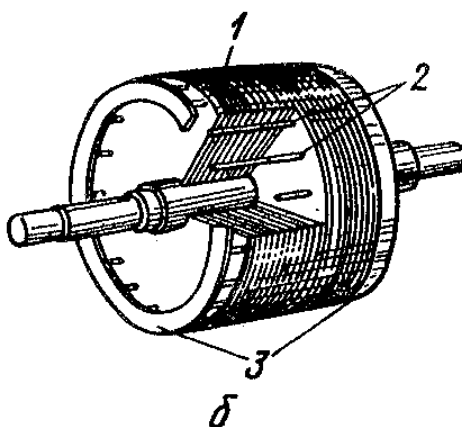
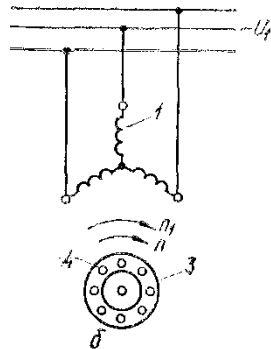
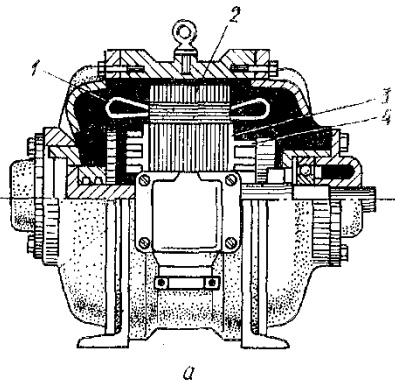
$$0 < n < n_1; 0 < s < 1$$

Ковзання, що відповідає номінальному навантаженню двигуна, називається номінальним ковзанням.

Практично $s_{ном} = 0.01 \div 0.03$, лише у малих і спеціальних (наприклад тягових) машинах

Рис. 11.3. Асинхронна машина з короткозамкненим ротором (а) і схема її ввімкнення (б)

Рис.11.4. Конструкція короткозамкненого ротора



номінальне ковзання $s_{ном} = 0.05 \div 0.07$.

При нерухомому (загальмованому) роторі ($n=0$) асинхронна машина нічим не відрізняється від трансформатора. В роторі, як і у вторинній обмотці трансформатора, індукуються ЕРС E_2 , що має частоту мережі f_1 . Якщо ж ротор обертається з частотою n , то частота обертання магнітного потоку Φ відносно ротора згідно (11.1) і (112) буде

При $s_{ном} = 0.01 \div 0.03$ 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 (10.5), буде обертатися зі швидкістю $\omega_2 = 2\pi f_2 = 2\pi p n_2$. Але через те, що ротор обертається в просторі з частотою n , то поле ротора відносно будь-якої нерухомої точки простору буде обертатися з частотою $n_2 + n$. Беручи до уваги вираз (11.4) отримаємо

$$n_2 + n = n_1 s + n = n_1 \frac{n_1 - n}{n_1} + n = n_1$$

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 як завгодно великою. Отже, асинхронна машина, працюючи як генератор, характеризується такими діапазонами частот обертання і ковзання:

$$n_1 < n < \infty; -\infty < s < 0$$

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: він може досягати 30-40 % номінального струму машини. Значить, на три асинхронних генератора потрібний один синхронний, що дорівнює їх за потужністю, 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 напрямові 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.

Отже, в режимі електромагнітного гальма асинхронна машина працює при

$$-\infty < n < 0; 1 < s < \infty$$

Тому 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.

11.4. Основні рівняння заміщення асинхронного двигуна

При нерухомому роторі асинхронний двигун є повною аналогією трансформатора, тому аналогічні і основні рівняння (див. п. 8.2 і 8.4).

ЕРС статора визначається рівнянням (10.2), а ЕРС загальмованого ротора

$$E_2 = 4.44k_{\text{об}}w_2f_1\Phi \quad (11.6)$$

У роторі, що обертається, буде індукуватися ЕРС, котра з урахуванням (11.5) і (11.6) дорівнює

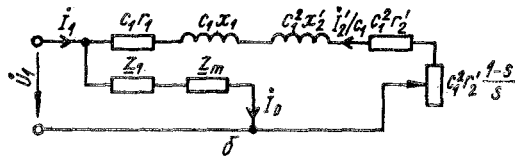
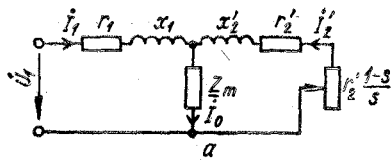
$$E_{2s} = 4.44k_{\text{об}}w_2f_2\Phi = 4.44k_{\text{об}}w_2f_1s\Phi = E_2s \quad (11.7)$$

Таким чином, ЕРС ротора, що обертається є функцією ковзання і менше, ніж ЕРС в загальмованому роторі. Аналогічна справа і з індуктивним опором. При нерухомому роторі $x_2\omega_1L_2 = 2\pi f_1L_2$, а при роторі, що обертається, $x_{2s} = \omega_2L_2 = 2\pi f_2L_2$; тоді з урахуванням (11.5)

$$x_{2s} = 2\pi f_2L_2 = 2\pi f_1sL_2 = x_2s \quad (11.8)$$

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: аналогічно виразу (8.10)



$$U_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1(r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (11.9)$$

аналогічно виразам (8.12) і (8.23б)

$$\dot{E}_2 - j\dot{I}_2'x_2' - \dot{I}_2'r_2' = 0$$

Розділивши всі члени на \dot{E}_1 , з урахуванням (11.7) і (11.8) отримаємо

$$\dot{E}_2' - j\dot{I}_2'x_2' - \dot{I}_2'r_2'/s = 0$$

або в кінцевому результаті

$$\dot{E}_2' = j\dot{I}_2'x_2' + \dot{I}_2'r_2'/s = \dot{I}_2' \left(\frac{r_2'}{s} + jx_2' \right)$$

Рис. 11.5. Схеми заміщення асинхронного двигуна

$$\dot{I} = \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2') \quad (11.11)$$

Рівняння (11.9), (11.10) і (11.11) дозволяють побудувати векторну діаграму, а також, як і для трансформатора (див. п. 8.7) схему заміщення; при цьому доцільно подати величину r_2'/s , що складається з двох складових:

$$r_2'/s = r_2' + r_2'(1-s)/s$$

Така Т-подібна схема заміщення асинхронного двигуна зображена на рис. 11.5а. Порівняння її з рис. 8.5в показує, що асинхронний двигун при заданому ковзанні 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 являє собою складне розгалужене коло, при розрахунку якого зустрічаються значні труднощі. Тому, при вивченні режиму навантаження трансформатора (див. п. 8.10), нехтуючи колом намагнічування і струмом холостого ходу, отримували просту схему заміщення на рис. 8.7а. При розгляді роботи асинхронного двигуна цього зробити не можна: через велике значення струму холостого ходу (див. п. 11.3) помилка, була б значною.

Для спрощення розрахунків Т-подібну схему заміщення перетворюють в Г-подібну (рис. 11.5б), 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 заміщають за допомогою коефіцієнта c_1 як зображено на рис. 11.5б.

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 $c_1 = 1$, отримують спрощену Г-подібну схему заміщення.

Згідно закону Ома, приведений струм ротора в спрощеній схемі заміщення (нарис. 11.5б при $c_1 = 1$)

11.5. 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 навалі двигуна P_2 .

Вказані перетворення супроводжуються втратами енергії, тому робочий, процес асинхронного двигуна, зручно подати за допомогою енергетичної діаграми (рис. 11.6).

До статора трифазного асинхронного двигуна підводиться потужність

$$P_1 = 3U_1 I_1 \cos \varphi_1 \quad (11.13)$$

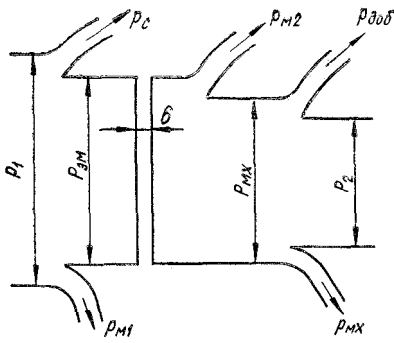


Рис. 11.6. Енергетична діаграма асинхронного двигуна

Струм, що тече по статору, створює електричні втрати p_{i1} , а в сталі статора виникають втрати від гістерезису і вихрових струмів p_{π} . Потужність $P_{ем}$, 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 p_{i2} . Ротор починає обертатися, розвиваючи механічну потужність P_{ix} . При обертанні ротора

виникають механічні $p_{mх}$ і додаткові $p_{до\delta}$ втрати, віднявши які від $P_{mх}$, отримаємо корисну потужність на валу двигуна P_2 .

Виходячи з умов рівноваги моментів (7.6), 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

$$\Omega_1 = 2\pi n_1 = 2\pi f_1 / p = \omega_1 / p \quad (11.14)$$

а ротора [за аналогією з виразом (11.3)]

$$\Omega = \Omega_1(1-s) \quad (11.15)$$

Електромагнітна і механічна потужності пов'язані з обертальним моментом двигуна співвідношеннями (див. п. 7.1)

$$P_{ем} = \Omega_1 M \quad (11.16)$$

$$P_{mх} = \Omega M \quad (11.17)$$

Підставивши (11.15) в (11.17), з урахуванням (11.16) отримаємо

$$P_{mх} = \Omega_1 M(1-s) = P_{ем}(1-s) \quad (11.18)$$

З енергетичної діаграми випливає, що

$$P_{mх} = P_{ем} - p_{m2} \quad (11.19)$$

Прирівнявши праві частини рівнянь (11.18) і (11.19), знайдемо

$$P_{ем}(1-s) = P_{ем} - p_{m2}$$

звідки

$$P_{ем} p_{m2} = P_{ем} s \quad (11.20)$$

Таким чином, *електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню*.

11.6. Обертальний момент асинхронного двигуна

Загальний вираз моменту. Електричні втрати в роторі з урахуванням його приведення

$$p_{m2} = m_2 E_2 s I_2 \cos \varphi_2 = m_2 E_2 s I_2 s \cos \varphi_2 = m_1 E_2' s I_2' \cos \varphi_2 \quad (11.21)$$

де m_1 і m_2 - кількість фаз статора і ротора відповідно, а φ_2 - кут зсуву між ЕРС і струмом ротора.

Співставивши вирази (11.20) і (11.21), побачимо, що електромагнітна потужність

$$P_{ем} = m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2 \quad (11.22)$$

Тоді, згідно (11.16), обертальний момент з урахуванням (11.6)

$$M = \frac{P_{ем}}{\Omega_1} = \frac{m_2 E_2 I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = \frac{m_2 4,44 k_{об2} \omega_2 f_1 \Phi I_2 \cos \varphi_2}{2\pi f_1 / p} = c_m \Phi I_2 \cos \varphi_2 \quad (11.23)$$

де $c_i = 2,22 m_2 p k_{i\dot{a}2} \omega_2 / p$ - стала.

Порівнюючи отриманий вираз з (3.29), бачимо їх ідентичність. *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 (11.23) справджується для електричних машин всіх типів.

Момент і втрати в колі ротора. З урахуванням виразу (11.20) формулу (11.23) можна записати так:

$$M = \frac{P_{ем}}{\Omega} = \frac{P_{m2} / s}{\Omega} \quad (11.24)$$

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 економічною.

Залежність моменту від напруги. Електричні втрати в роторі $p_{m2} = m_2 I_2'^2 r_2' = m_1 I_2'^2 r_2'$. Підставивши сюди значення струму з (11.12), отримаємо

$$n = m r_2' \left(\frac{U_1}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \right)^2 \quad (11.25)$$

Остаточне рівняння обертального моменту отримаємо підстановкою (11.14) і (11.25) у (11.24):

$$M = \frac{p m_1 U_1^2 \frac{r_2'}{s}}{\omega [(r_1 + r_2' / s)^2 + (x_1 + x_2')^2]} \quad (11.26)$$

Формула (11.26) 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 допоміжний двигун електровоза розвиває момент M при напрузі в контактній мережі 10 кВ, то при допустимому зменшенні напруги до 7 кВ обертальний момент становитиме $(7/10)M = 0,49M$, 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 (11.26) 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.

11.7. Механічна характеристика асинхронної машини

Ця характеристика, що являє собою графічну залежність $M = f(s)$ при $U_1 = const$ і $f_1 = const$, може бути побудована за рівнянням (11.26), якщо задатися різними (додатними і від'ємними) значеннями ковзання (рис. 11.7а). З рисунка видно, що момент досягає максимуму при деякому ковзанні $s_{кр} \approx 0,15 \div 0,3$, що називається *критичним*. 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 обертального моменту.

Варто пам'ятати, що в діапазоні великих ковзань ($s > s_{кр}$), згідно рівнянь (11.5) і (11.20), різко збільшуються втрати у сталі і обмотці ротора в порівнянні з номінальним режимом. Тепло, 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 (11.26) по ковзанню і прирівнявши до нуля, тобто $dM / ds = 0$. В результаті цієї звичайної математичної операції отримаємо

$$s_{кр} = \pm \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + (x_1 + x_2')^2}} \quad (11.27)$$

У звичайних електричних машинах $r_1 \ll (x_1 + x_2')$; тому, нехтуючи величиною r_1 отримуємо

$$s_{кр} \approx \pm \frac{r_2'}{x_1 + x_2'} = \pm \frac{r_2'}{x_{к}} \quad (11.27б)$$

Де $x_{к} = x_1 + x_2'$ - один з параметрів короткого замикання за (8.28в)

Значення максимального моменту визначимо за (11.26), підставляючи значення $s_{кр}$ з (11.27б) і приймаючи $r_1 = 0$:

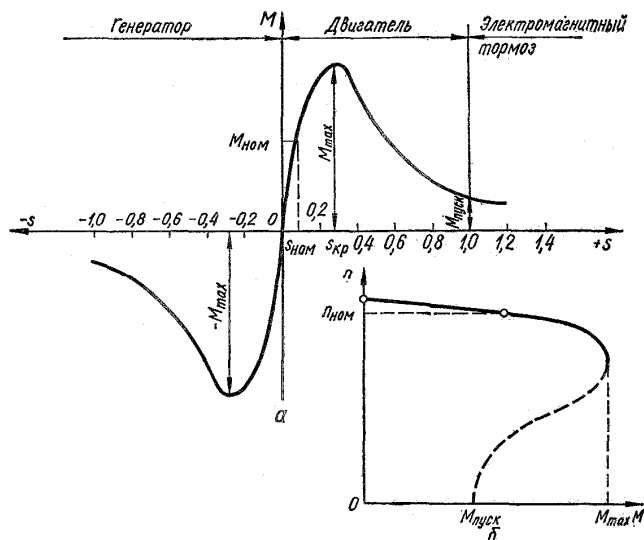


Рис. 11.7. Механічні характеристики асинхронної машини

де знак "+" відноситься до режиму двигуна, "-" до режиму генератора.

З рівняння (11.28) 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 (11.27) визначає тільки значення $s_{кр}$ при M_{max} .

Відношення максимального моменту до номінального називається *коефіцієнтом перевантажувальної здатності*; звичайно

$$k_m = M_{max} / M_{ном} = 1,8 \div 2,5$$

В момент запуску $s=1$; тому значення $M_{зан}$ можна отримати, підставивши це значення ковзання асинхронного двигуна в загальноприйнятій функції $n=f(M)$ побудована на рис. 11.7б із залежності $M=f(s)$, так як n і s пов'язані між собою виразом (11.3). Суцільною лінією зображена робоча частина характеристики.

Як бачимо, при збільшенні навантаження навалі, 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 постійну (штрихову) частину характеристики, де одночасно почне зменшуватися і обертальний момент, що розвиває двигун, і частота обертання аж до зупинки двигуна.

11.8. 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) безпосереднє підключення статора до мережі (прямий запуск);
- 2) зниження напруги, що підводиться до статора при запуску;
- 3) ввімкнення в коло ротора пускового резистора.

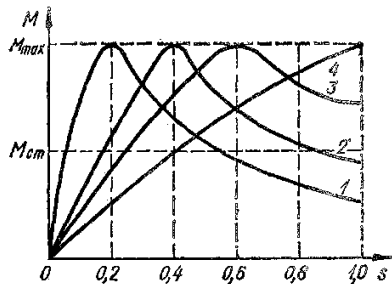


Рис.11.8. Механічні характеристики асинхронного двигуна при різних опорах кола ротора

Прямий пуск застосовують для двигунів з короткозамкненим ротором. Двигун автоматично розганяється згідно механічної характеристики (див. рис. 11.7) від точки, що відповідає $M_{зан}$, то точки на робочій характеристиці, в якій встановлюється рівновага моментів [див. вираз (7.6)].

Відношення моментів $M_{зан} / M_{ном} = k_n$ 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

$I_{ном}$.

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). При ввімкненні статора по схемі Y напруга, що подається на фази обмотки зменшується в $\sqrt{3}$ разів, що обумовлює таке зменшення фазних струмів, а лінійних - в три рази. Останнє дуже важливо для системи електропостачання. Слід пам'ятати, що згідно (11.26), зниження фазної напруги в $\sqrt{3}$ рази зменшує момент запуску у $(\sqrt{3})^2$ рази.

Ввімкнення в коло ротора пускового резистора можливе при запуску двигуна з фазним ротором (див. рис. 11.1). З виразу (11.27б) видно, що при збільшенні активного опору кола ротора, росте значення $s_{кр} = 1$, тобто максимум моменту, залишаючись незмінним за значенням настає при великих ковзаннях. Підібравши таке значення опору пускового резистора r_p , щоб, згідно (11.27б), $r_p + r_2' \approx x_k$, можна отримати $s_{кр} = 1$, тобто двигун при запуску розвине максимальний момент. Збільшення опору кола ротора, як видно з виразу (11.12), зменшить повний пусковий струм.

Фізичне пояснення цьому, здавалося б, парадоксальному явищу (струм зменшується, а момент зростає) впливає з виразу (11.23). Резистор хоч і зменшує повний струм, але збільшує його активну складову, оскільки збільшується активна складова опору Z_2 кола ротора; дійсно, $Z_2 = \sqrt{r_2^2 + x_2^2}$, з резистором $Z_{2p} = \sqrt{(r_2 + r_2) + x_2^2}$.

Механічні характеристики двигуна при різних опорах ротора зображені на рис. 11.8. Тут характеристика з більшим порядковим номером відповідає більшому опорі кола ротора. Для кривої $4s_{kp} = 1$ і $M_{зап} = M_{max}$. Виводячи сходинками пусковий реостат, переходять на характеристики 3, 2, поки не вийдуть на звичайну характеристику 1. Після цього щітки піднімають з кілець, а обмотка ротора закорочується.

11.9. 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 $s = 1$, згідно (п. 11.5), $f_2 = f_1$

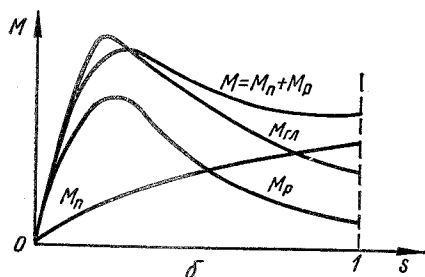
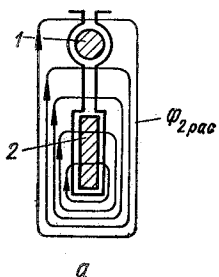


Рис. 11.9. Паз двокліткового ротора (а) і механічні характеристики пускової і робочої кліток (б)

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, як показано в п. 11.8, 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. 11.9а). 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 малий. В деяких випадках обидві клітки об'єднують і виготовляють литими з алюмінію.

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_{2n} малий. У робочій ж клітці зчеплення потоків розсіювання велике і, значить, вона володіє більшим x_{2p} . Співвідношення між x_{2n} і x_{2p} , а також збільшення останнього забезпечуються відповідним вибором ширин і висот шліца в пазах над верхньою кліткою і щілини між стержнями.

Обидві клітки в електричному відношенні ввімкненні паралельно, тому струми між ними розподіляються обернено пропорційно їх повним опорам:

$$I_{2n} / I_{2p} = Z_{2n} / Z_{2p} = \sqrt{r_{2p}^2 + x_{2p}^2} / \sqrt{r_{2n}^2 + x_{2n}^2}$$

При запуску ($s = 1$) індуктивні опори порівняно з активними надзвичайно великі; тому $I_{2n} / I_{2p} \approx x_{2n} / x_{2p}$, тобто струм ротора в основному проходить по верхній пусковій клітці, так як $x_{2n} < x_{2p}$. Але у цієї ж клітки великий r_{2n} 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 (11.8), 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 $I_{2n} / I_{2p} \approx r_{2p} / r_{2n}$. Але так як $r_{2p} > r_{2n}$ то струм ротора в основному проходить по нижній робочій клітці.

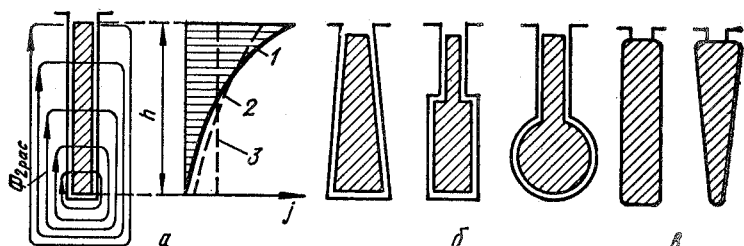
Отже, в двоклітковому роторі струм в початковий момент запуску витісняється у верхню (запускову) клітку, котра створює значний момент запуску: у ході розгону струм поступово проникає у нижню (робочу) клітку, а по закінченні запуску практично повністю протікає, по ній.

На рис. 11.9б показані механічні характеристики робочої клітки запуску, а також результуюча крива, що являє собою суму двох попередніх ($M = M_{II} + M_p$).

У двокліткових двигунів великої потужності кратність початкового пускового моменту $k_{II} = 1,7 \div 2$ при істотно меншому, ніж у звичайних двигунів стрибку струму запуску: $I_{Iзан} / I_{Iном} = 4 \div 5$ (пор. з пусковими параметрами звичайних двигунів у п.11.8).

Глибокопазний двигун. Можна показати, що ефект витіснення струму у верхню частину провідника, коли $s = 1$ і $f_2 = f_1 = 50 \text{ Гц}$, починає проявлятися у мідного провідника при його висоті $h > 12 \text{ мм}$, а в алюмінієвого - при $h > 16 \text{ мм}$. Наприклад, активний опір мідного провідника при $h = 50 \text{ мм}$ 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.



Розподіл густини струму j по висоті стержня h у момент запуску показаний на рис.11.10а кривою 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.

Рис. 11.10. Розподіл густини струму по висоті стержня глибокопазного ротора (а) і різні форми перерізів стержнів (б,в)

При розгоні зі зменшенням частоти f_2 струм все рівномірніше розподіляється по висоті стержня (крива 2 на рис. 11.10а). 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 нарис. 11.10а).

На рис. 11.9б крива M_{2I} 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. 11.10б). 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 (рис. 11.10в).

11.10. Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Підставивши у вираз (11.3) значення синхронної частоти обертання з (11.1) і ковзання з (11.20), отримуємо формулу

$$n = \frac{f_1}{p} \left(1 - \frac{P_{m2}}{P_{em}}\right) \quad (11.29)$$

з якої випливає три принципово можливі способи регулювання n : зміною частоти f_1 напруги живлення, кількості пар полюсів p і 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 більше і більше 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, а причини необхідності регулювання пояснюються далі.

Індуктивний опір короткого замикання $x_k = \omega_1 L_k = 2\pi f_1 L_k$, і формула (11.28) набере вигляду

$$M_{max} = \pm \frac{pm_1 U_1^2}{8\pi^2 f_1^2 L_k} = \pm c_{mm} \frac{U_1^2}{f_1^2} \quad (11.30)$$

Де $c_{mm} = pm_1 / (8\pi^2 L_k)$ - стала.

З (11.30) 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 електровоюзу 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 (10.2), оскільки $U_1 \approx E_1$. Це є неприпустимим, бо при збільшенні потоку викличе сильне насичення магнітного кола і ріст намагнічування індуктивного струму, а зменшення Φ призведе до недовикористання машини, зниження як вже було сказано, її перевантажувальної здатності.

Основний закон регулювання частоти виражений М. П. Костенко такою формулою:

$$\frac{U_1}{U_{1ном}} = \frac{f_1}{f_{1ном}} \sqrt{\frac{M}{M_{ном}}} \quad (11.31)$$

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 (11.31) 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 (11.31) 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 p_{m2} і, згідно (11.29), 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. 11.8).

Цей спосіб дозволяє змінювати частоту обертання у широких межах, але він пов'язаний з великими втратами енергії у регулювальному резисторі.

11.11. 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 заповняють також не більше $2/3$ пазів, оскільки при більшому їх заповненні обмотковий коефіцієнт - (див. п. 10.1) 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 (див. 10.2) 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, - буде діяти аналогічно полю трифазного двигуна [$f_{2I} = p(n_1 - n) = f_1 s$]. Друге - зворотне поле - створює режим електромагнітного гальма, виникла в роторі ЕРС матиме частоту $f_{2II} = p(n_1 + n) = p(n_1 + n + n_1 - n_1) = p[2n_1 - (n_1 - n)] = pn_1[2 - (n_1 - n)/n_1] = f_1(2 - s)$, де $(2 - s)$ - ковзання ротора відносно поля, що обертається у зворотному напрямі.

При $0 < s < 1$ величина $(2 - s) > 1$ і $f_{2II} > f$. Наприклад, при номінальному значенні $f_{ном} 0,02 f_{2I} = 1$ Гц, а $f_{2II} = 50(2 - 0,02) = 99$ Гц. Тому індуктивний опір обмотки ротора струмові I'_{2II} дуже значне ($x'_{2s} = 2\pi f_{2II} L_2$), струм є практично чисто індуктивним і здійснює розмагнічуючу дію на поле, що зворотно обертається. Очевидно, що при цьому сильно зменшується зворотній момент M_{II} і ротор обертається у напрямі прямого моменту M .

На рис. 11.11 зображені механічні характеристики однофазного асинхронного двигуна, причому залежність $M_{II} = f(s_{II})$ зображена нижче осі абсцис, бо момент M_{II} напрямлений проти моменту M_I . Результуючий момент $M = M_I - M_{II}$ співпадає з напрямом обертання ротора.

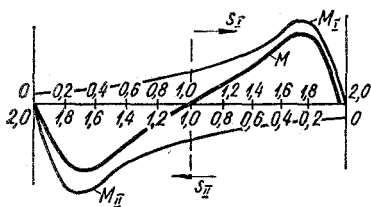


Рис. 11.11. Механічна характеристика однофазного асинхронного двигуна

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. 11.12.

Якщо уявити 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.

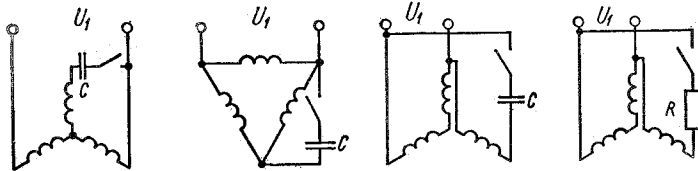


Рис. 11.12. Схеми ввімкнення трифазних асинхронних двигунів для роботи від однофазної мережі

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 меншою 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.

11.12. Конденсаторні (двофазні) асинхронні двигуни

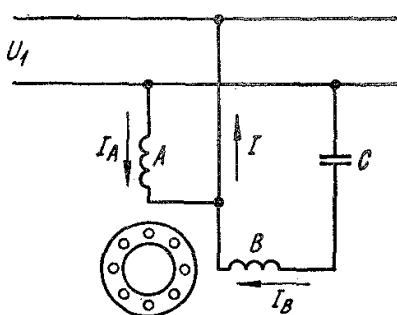


Рис 11.13. Схема конденсаторного (двофазного) асинхронного двигуна

Це такі двигуни (рис. 11.13) на статорі яких під кутом 90° ел. укладені дві обмотки, що займають однакову кількість пазів. Одну з обмоток (A) вмикають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу (B) - в ту саму мережу, але через конденсатор C, 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 C 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 C на весь період запуску вмикають конденсатор запуску, що дає можливість забезпечити отримання колового поля при запуску в потрібному робочому режимі.

Конденсаторні двигуни володіють вищими енергетичними показниками, ніж однофазні, їх $\cos \varphi$ наближується до одиниці. До недоліків цих двигунів варто віднести значні розміри конденсаторів, що утрудняє їх використання на транспорті.

11.13. Сельсини

У різних системах автоматики, у тому числі і на сучасних локомотивах, широко використовуються індукційні машини синхронного зв'язку - *сельсини* (від слів *self synchronizing* - самосинхронізуючі).

Сельсини призначені для синхронного і синфазного повороту двох або декількох осей, механічно незв'язаних між собою.

Сельсини мають дві обмотки: одно- або трифазну обмотку збудження (OB) і виконану по типу трифазної обмотку синхронізації. В залежності від призначення одна з обмоток розміщена на статорі, інша на роторі. Сельсин, зв'язаний з ведучою віссю, називається *сельсин-датчиком (СД)*, а сельсин, зв'язаний з веденою віссю - *сельсин-криймачем (СП)*. Схема ввімкнення однофазних сельсинів показана на рис. 11.14.

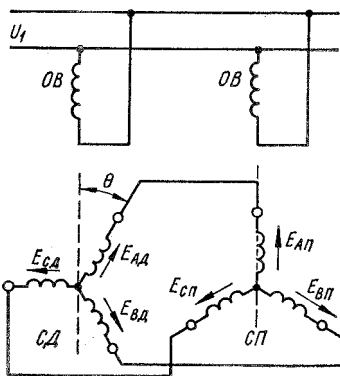


Рис. 11.14. Схема ввімкнення однофазних сельсинів

Пульсуюче поле збудження індукуює ЕРС в обмотках синхронізації. Так як машини повністю однакові, то якщо обмотки синхронізації розміщені в просторі ідентично (кут неузгодження $\Theta = 0$), в них виникають однакові і напрямлені назустріч ЕРС, а струму в лініях синхронного зв'язку немає.

Закріпимо обмотку синхронізації $СП$ а обмотку синхронізації $СД$ повернемо з ходом годинникової стрілки на кут Θ . Такі дії порушують рівність ЕРС, що виникають в результаті чого в обмотках і лініях синхронного зв'язку з'явиться струм.

Взаємодія поля і струму створює обертальний момент, що намагається повернути $СД$ проти, а $СП$ за ходом годинникової стрілки.

Якщо розгальмувати $СД$, то він повернеться за ходом годинникової стрілки на кут Θ , після чого знову настане рівновага.

Таким чином, поворот або обертання $СД$ викликає достатньо однакові дії $СП$. Якщо на вісь $СП$ насадити стрілку, то вона покаже кут повороту $СД$, який може бути розміщений далі від $СП$ або в недоступному місці. Так, машиніст електровозу, на пульті якого встановлений $СП$, знає позицію головного контролера, з валом якого з'єднаний $СД$.

11.14 Асинхронні тахогенератори

Як і тахогенератори постійного струму вони призначені для перетворення частоти обертання в електричні сигнали. З цією метою може бути використана двофазна асинхронна машина (див. рис. 11.13), обмотка B якої без конденсатора від'єднана від мережі і замкнена на навантаження (вольтметр).

Якщо ротор нерухомий, то магнітний потік Φ_A обмотки A буде викликати в роторі трансформаторну ЕРС, під дією якої потечуть струми, створюючи магнітний потік $\hat{\Phi}_d$, напрямлений назустріч Φ_A . В обмотці B ЕРС не виникатиме.

При русі ротора в ньому, внаслідок перетину ліній потоку Φ_A виникатиме ЕРС обертання, напрям якої визначиться за правилом правої руки. Частота цієї ЕРС дорівнює частоті в обмотці A , тобто частоті мережі f_1 , а її величина $E_A = c_{eA} n \Phi_A$. Під дією ЕРС E_A тече струм I_A і створюється магнітний потік $\hat{\Phi}_q$, напрямлений, згідно правила свердлика, па осі обмотки B . Оскільки при ненасиченій системі $\Phi_q \propto I_A$, $I_A \propto E_A \propto n$, то $\Phi_q \propto n$. Потік Φ_q індукуює в обмотці B ЕРС $E_B = 4,44 k_{об} w_B f_1 \Phi_q = c_{eB} \Phi_q$ де c_{eB} - стала. Таким чином, при прийнятих умовах $E_B \propto n$, тобто характеристики тахогенератора $E_B = f(n)$ в ідеалі є пряма лінія, а практично нагадує характеристику тахогенератора постійного струму (див. рис. 6.9).

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 $n = 2850$ 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. Чому і як перетворюють Т-подібну схему заміщення наГ-подібну?
7. Як змінюються електричні втрати в роторі при зміні ковзання? Як з ними пов'язаний обертальний момент?
8. Як залежить обертальний момент від напруги живлення?
9. Чим визначається значення M_{max} асинхронного двигуна? Порівняйте механічні характеристики двигунів постійного струму і асинхронного, а також їхню здатність до перевантаження.
10. Ротор асинхронного двигуна загальмований механічним гальмом. Чи можна залишити двигун ввімкненим в мережу?
11. Електричні втрати у роторі в номінальному режимі, роботи при $s_{ном} = 0,05$ дорівнюють $p_{м2}$. Яке їх значення у момент запуску двигуна?
12. Які існують способи запуску асинхронних двигунів?
13. Який принцип покладений в основу створення двигунів з підвищеним моментом запуску?
14. Яка "білчина клітка" у двокліткового двигуна є робочою, а яка - пусковою? Яке співвідношення їх активних і індуктивних опорів?
15. Чому в короткозамкнених асинхронних двигунів застосовують високі стержні ротора?
16. Які існують способи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів? Який з них придатний для тягового електропривода?
17. Чому при частотному регулюванні вимагається зміна значень напруги живлення?
18. Який принцип дії однофазних і двофазних (конденсаторних) двигунів?
19. Чи можна запустити трифазний двигун від однофазної мережі? Що для цього потрібно?
20. Що таке сельсин? Для чого і де вони використовуються?
21. В чому полягає принцип роботи асинхронного генератора?

Частина 12. Синхронні машини.

12.1. Принцип дії синхронних машин

Статор 1 синхронної машини (рис. 12.1) з укладеною на ньому трифазною обмоткою виконаний так, як описано у п. 10.1. На роторі 2 розміщений *індуктор*, обмотка збудження якого живиться постійним струмом. З зовнішнім джерелом постійного струму обмотку збудження (ротора) з'єднують за допомогою контактних кілець і щіток.

При обертанні ротора з частотою n створений його обмоткою магнітний потік Φ_0 перетинає провідники обмотки статора, яка на рис. 12.1 зображена скупченою (вся фаза, наприклад $A-X$, лежить у двох пазах, зсунутих на кут 180° ел.) і індукує в них ЕРС, напрямком якої визначається за правилом правої руки, а частота, згідно (В.3),

$$f = pn \quad (12.1a)$$

Якщо обмотку статора (*якоря*) під'єднати до навантаження, то потече струм I_a і велике магнітне поле, що обертається (див. п. 10.2), частота обертання якого, згідно (10.5)

$$n_1 = f_1 / p \quad (12.16)$$

Порівнявши рівняння 12.1, бачимо, що $n = n_1$, тобто ротор обертається з тією ж частотою, що і магнітне поле статора. Тому машину, що розглядаємо, називають *синхронною*. Результуючий магнітний потік $\Phi_{рез}$, у ній створюється разом з обмотками індуктора (ротора) і якоря (статора), причому цей потік обертається в просторі з частотою $n_1 = n$.

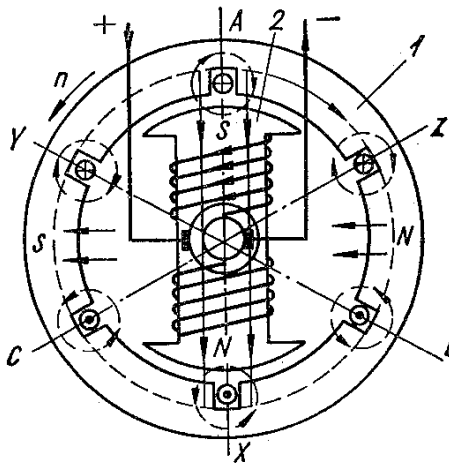


Рис. 12.1. Схема трифазної синхронної машини

Можна уявити, що ротор зв'язаний пружними магнітними силовими лініями з полем статора, що обертається, і вони - ротор і поле - у встановленому режимі нерухомі одне відносно іншого.

Якщо обмотку статора під'єднати до напруги частотою f_1 , то струм, що тече по обмотці, створить так само, як і в асинхронній машині магнітне поле, що обертається і частота обертання якого визначиться за (11.1) або, що одне й те ж, за (12.16).

Взаємодія поля статора, що обертається, зі струмом збудження I_{ca} ротора призводить до появи електромагнітного моменту M який при роботі машини в режимі двигуна буде обертальним, а при роботі в режимі генератора - гальмівним.

При розімкненій обмотці статора (холостий хід) магнітний потік збудження створюється роторною обмоткою постійного струму, тому сам ротор нерухомий відносно магнітного поля і обертається

синхронно разом з ним, незалежно від механічного навантаження на валі (двигун) або електричного навантаження статора (генератор).

Назвемо *повздовжньою магнітною віссю* лінію, що проходить по осі полюсів, а *поперечною* - лінію, що проходить через центр ротора під кутом: 90° ел. до повздовжньої осі.

На рис. 12.1 показано, що магнітні силові лінії статора напрямлені по поперечній магнітній осі. Результуюче поле посилено на збігаючій частині полюса: магнітні силові лінії ротора і статора співпадають за напрямом; на набігаючій частині полюса магнітні силові лінії ротора і статора напрямлені назустріч і результуюче поле послаблене.

12.2. Конструктивні типи і будова синхронних машин.

Всі синхронні машини поділяють за конструкцією ротора на дві групи: - *явнополюсні* - з явно вираженими полюсами і *неявнополюсні* - з неявно вираженими полюсами.

Явнополюсний ротор (рис. 12.2а) складається з магнітопроводу 1 і полюсних обмоток збудження 2. Магнітопровід частіше всього виконують у вигляді насадженого на вал машини полюсного колеса (роторної зірки), на ободі якого кріпиться шихтований з листової сталі і стягнуті шпильками полюси.

Неявнополюсний ротор складається з насадженого на вал сталюого кованого циліндра 1 з вифрезерованими на його поверхні повздовжніми пазами, в котрі закладають обмотку збудження 2. Пази розміщують рівномірно тільки на $2/3$ поверхні ротора, іншу частину її займають центральні зубці (полюси). Провідники і обмотки надійно закріплюють в пазах немагнітними клинами, а її лобові частини - сталевими бандажними кільцями.

Виготовлення явнополюсних роторів значно простіше технологічно і дешевше. Але при високих частотах обертання на ротор діють значні доцентрові сили і за умовами забезпечення механічної міцності кріплення полюсів і їх обмоток застосування явнополюсних роторів стає неможливим. Тому при $p=1$ або 2 ($m=3000$ або 1500 об/хв) синхронні машини виконують, як правило, неявнополюсними. При $p \geq 3$ ($n \leq 1000$ об/хв) - машини явнополюсні.

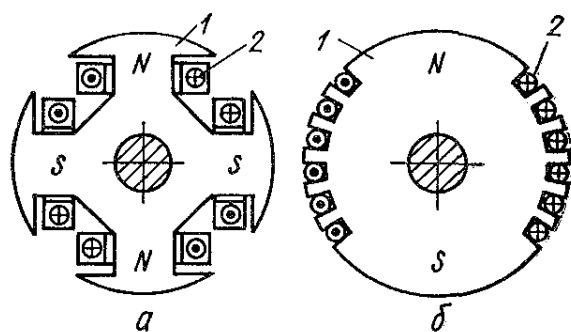


Рис. 12.2. Будова роторів явнополюсної (а) і неявнополюсної (б) синхронних машин

В полюсних наконечниках роторів виштамповують круглі пази, в яких розміщують латунні стержні, що замикаються з торців кільцями. Ця обмотка (типу "білочина клітка") є *кусковою* у двигунів і *заспокійливою* у генераторів. Призначення цієї обмотки розглядається далі.

На валі ротора, як явнополюсних, так і неявнополюсних синхронних машин встановлюють контактні кільця, до яких приєднують виводи обмотки збудження, кільця надійно ізолюють від валу машини. З кільцями контактують закріплені в щіткотримачах щітки.

Явнополюсні синхронні генератори застосовуються у якості тягових на тепловозах і кар'єрних електровозах з джерелами автономного живлення (дизель-генераторна установка).

Обмотка збудження ротора може живитися від стороннього генератора постійного струму (збудника), що встановлюється на валі ротора синхронної машини, або живиться від власної обмотки якоря (статора) через напівпровідниковий випрямляч. Регулювання струму збудження здійснюється автома-

тично спеціальними регуляторами. Потужність, необхідна для збудження, незначна і складає 0,5-5 % потужності синхронної машини.

12.5. Реакція якоря синхронного генератора

Приведемо в рух збуджений ротор, залишивши статорну обмотку роз'єднаною (холостий хід). Поки її струм $I_A = 0$, в генераторі існує лиш МРС індуктора, що створює основний магнітний потік Φ_0 . Цей потік, викликає в якорі появу ЕРС E_0 , що визначається рівнянням (10.2).

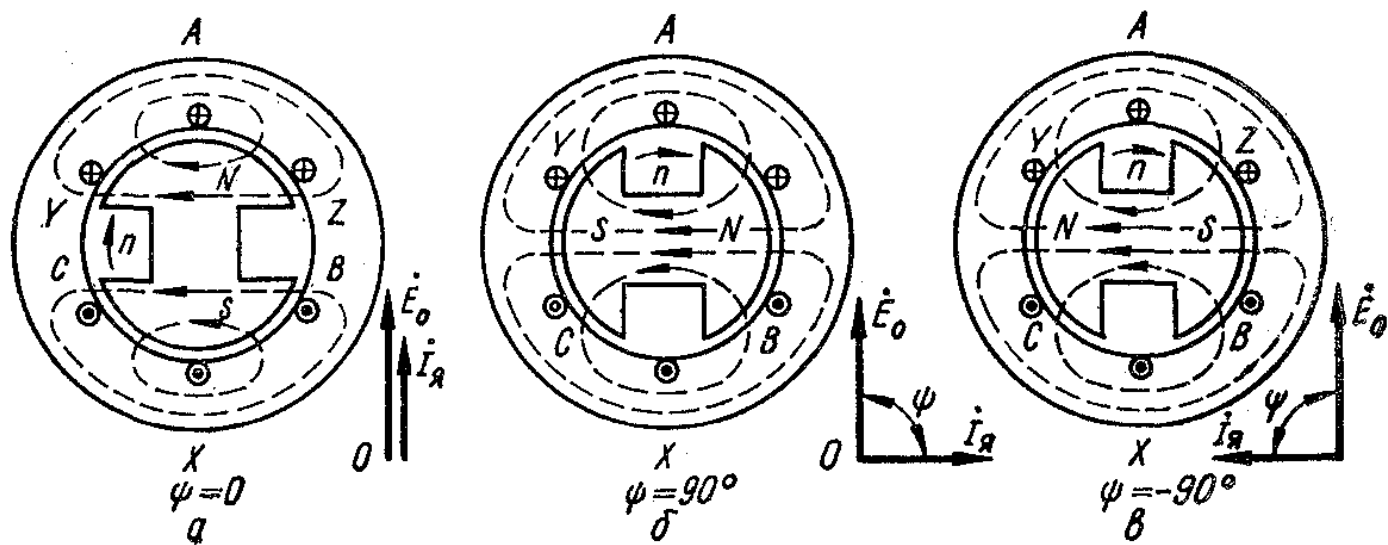


Рис 12.3. Поперечна (а), поздовжньо-розмагнічувальна (б) і поздовжньо-намагнічувальна (в) реакції якоря реакції якоря синхронної машини

Якщо до статора під'єднати навантаження I_y ; в результаті взаємодії МРС якоря і індуктора виникає результуюче магнітне поле (потік $\Phi_{рез}$). Це результуюче поле відрізняється від основного (при холостому ході) як за величиною, так і за формою. Тому всі параметри, що прямо побічно залежать від магнітного поля (наприклад ЕРС, що виникає в статорі), також переживають зміни. Для поля якоря (статора) на поле полюсів, як і в машин постійного струму, називається *реакцією якоря*.

Розглянемо дію реакції якоря на прикладі трифазного двополюсного генератора. Отримані результати можна розповсюдити на машину в режимі роботи двигуна. Для простоти на рис. 12.3 зобразимо кожну фазу обмотки статора у вигляді одного витка ($A-X, B-Y, C-Z$). Буквами N і S позначимо полярність полюсів ротора: магнітні силові лінії виходять з "північного" полюса і на рисунку не показані.

При *активному* навантаженні синхронного генератора його струм і ЕРС співпадають за фазою тобто кут між ними $\psi = 0$. Отже, в момент найбільшого струму у фазі A і виникатиме і найбільша ЕРС. А для цього ротор повинен розміщуватися так, щоб вісь полюсів співпадала з площиною витка, що зображає фазу A (рис. 12.3а).

Напрямок струму у фазах A, B і C легко визначити за правилом правої руки, і вони на рис 12.3а вказані хрестиками і крапками. При таких напрямках струмів у фазах магнітні лінії поля якоря (потік \hat{O}_y) напрямлений вздовж поперечної магнітної осі. А так як ротор і поле якоря обертаються синхронно, така орієнтація потоку зберігається завжди.

Значить, якщо навантаження активне і кут $\psi = 0$, то реакція якоря буде *поперечною*. Така реакція якоря, підмагнічуючи один край полюса і розмагнічуючи інший створює результуюче магнітне поле у повітряному проміжку машин.

При *чисто індуктивному* навантаженні струм відстає від ЕРС на кут $\psi = 90^\circ$ і максимум струму у фазі A настає на чверть періоду пізніше, коли ротор повернеться на 90° за ходом годинникової стрілки (рис. 12.3б). А струми у фазах статора при цьому збережуть ті ж значення, що і в попередньому випадку (див. рис. 12.1а); тому магнітне поле якоря збереже своє положення в просторі. Як бачимо з рис. 12.3б, поле якоря напрямлене вздовж поздовжньої осі полюсів назустріч основному магнітному потоку. Таким чином, при індуктивному навантаженні, коли $\psi = 90^\circ$ має місце *поздовжньо-розмагнічуюча* реакція якоря, що послаблює потік полюсів.

При *чисто ємнісному* навантаженні, струм випереджує ЕРС на кут $\psi = 90^\circ$, а максимум струму у фазі A настає в порівнянні з чисто активним навантаженням на чверть періоду раніше, коли ротор ще

не дійшов на 90° до положення показаного на рис. 12.3а. Струми у фазах надалі зберігають своє положення, тому магнітне поле якоря займає попереднє положення в просторі. Як бачимо з рис. 12.3в, при випереджаючому струмі, коли кут $\psi = 90^\circ$, поле якоря також напрямлене вздовж повздовжньої осі плюсів, але його напрям, збігає з напрямом основного магнітного полюсу. Отже, при ємнісному навантаженні має місце *повздовжньо-намагнічуюча* реакція якоря, яка посилює потік полюсів.

В загальному випадку струм зсунутий по фазі відносно ЕРС на деякий кут ψ межах від $+90^\circ$ до -90° . Очевидно, в цьому випадку вектор струму \dot{I}_i можна розкласти на дві складові, одна з яких буде співпадати за фазою з вектором \dot{E}_0 , а інша – знаходитись з ним у квадратурі. Таким чином, при змішаному навантаженні одночасно буде мати місце і поперечна і поздовжня реакція якоря.

12.4. ЕРС синхронного генератора

Істотною ознакою, за якою розрізняють неявно і явнополюсні синхронні машини, є різний магнітний опір для потоку якоря, діючого по поздовжній ($d-d$) і поперечній ($q-q$) магнітними осями. Така різниця пояснюється розміром повітряного проміжку: рівномірному по всьому колу у неявно полюсній машині і різко зростаючої у явнополюсній за полюсним башмаком у зоні між полюсного простору (див. рис. 12.1).

Ця обставина змушує у явнополюсній машині умовно розділяти результуючий магнітний потік якоря Φ_y на складові по осях $d-d$ і $q-q$, вважаючи, що діючи по них потоки, відповідно Φ_{yd} і Φ_{yq} наводять "власні" ЕРС \dot{E}_{yd} і \dot{E}_{yq} .

Як і в трансформаторах (див. п. 8.4) існує потік розсіювання $\Phi_{роз}$, а наводить ЕРС $E_{роз}$.

Таким чином повна ЕРС навантаженого неявнополюсного генератора

де ЕРС \dot{E}_y пропорційна потокові Φ_y , тобто струмові I_y . На основі цього ЕРС E_y можна розглядати як ЕРС самоіндукції, індуковану в обмотці якоря, і представити у вигляді $\dot{E}_y = -j\dot{I}_y x_y$ де x_y індуктивний опір, зумовлений потоком реакції якоря. Аналогічно розсіювання $\dot{E}_{роз} = -j\dot{I}_y x_{роз}$, де $x_{роз}$ - індуктивний опір зумовлений потоком розсіювання.

Отже, рівняння (12.2) дістає вигляд

$$\dot{E} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_y x_y - j\dot{I}_y x_{роз} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_y x_c \quad (12.3)$$

де $x_c = x_y + x_{роз}$ - синхронний індуктивний опір.

Згідно другого закону Кірхгофа напруга неявнополюсного генератора $\dot{U} = \dot{E}_y - \dot{I}_y r_y$, де r_y - опір обмотки статора. Величина r_y звичайно дуже незначна, тому можна прийняти $\dot{I}_y r_y = 0$; тоді

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_y x_c \quad (12.4)$$

У навантаженого явнополюсного генератора ЕРС

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{yd} + \dot{E}_{yq} + \dot{E}_{роз} \quad (12.5)$$

а напруга

$$\dot{U} = \dot{E} - \dot{I}_y r_y = \dot{E}_0 + \dot{E}_{yd} + \dot{E}_{yq} + \dot{E}_{роз} - \dot{I}_y r_y \quad (12.6)$$

Це рівняння можна перетворити, ввівши, аналогічно попередньому, поняття про індуктивні опори по повздовжній (x_{yd}) і поперечній (x_{yq}) осям і прийнявши $\dot{I}_y r_y = 0$.

12.5. Характеристики і зміна напруги синхронного генератора

Зовнішні характеристики синхронного генератора представляють залежність $\dot{U} = f(I_y)$ при незмінному струмі $I_{зов.} \cos \varphi$, і частоті обертання. Побудуємо їх для неявнополюсного генератора за допомогою векторних діаграм згідно рівняння (12.4).

Підбираючи значення струму збудження домагаємося положення, при якому номінальному струму $I_{ном.}$, відповідає номінальна напруга $U_{ном.}$. Знижуючи струм навантаження до нуля, отримуємо напругу при холостому ході $U_0 = E_0$. Побудувавши векторні діаграми для різних характеристик навантаження, побачимо, як відрізняються відповідні їм значення U_0 .

При активному навантаженні (рис 12.4а) вектори струму і напруги, співпадають за фазою ($\varphi = 0$); під кутом 90° проведений вектор $j\dot{I}_я x_c$, а вектор $\dot{E}_о$ є гіпотенузою прямокутного трикутника, тобто $E_o > U$, або $U_o > U_{ном}$

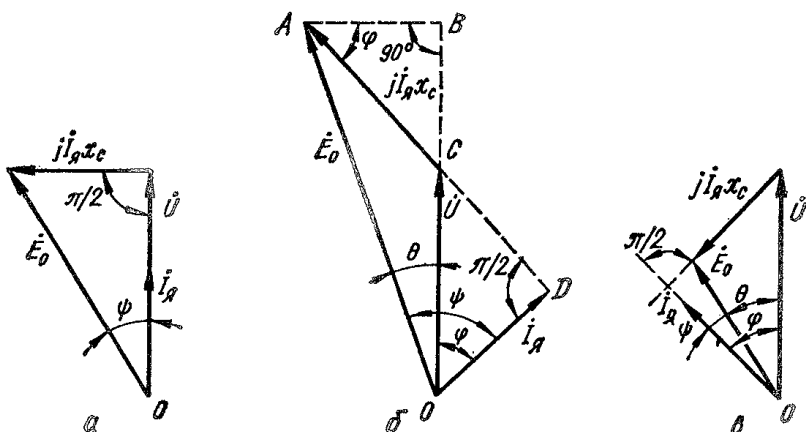


Рис. 12.4. Векторні діаграми неявнополюсного синхронного двигуна

$j\dot{I}_я x_c$ побудований до кінця вектора напруги, перпендикулярно до вектора струму. Отриманий вектор $\dot{E}_о$ зріс ще більше у порівнянні з попереднім випадком; знову $U_o = E_o > U_{ном}$.

При активно-ємнісному навантаженні (рис. 12.4в) вектор $\dot{I}_я$ випереджує вектор \dot{U} на кут φ ; аналогічно попередньому проведений вектор $j\dot{I}_я x_c$. Тепер вже $E_o < U$, тобто

$$U_o = E_o < U_{ном}$$

Викладене дозволяє побудувати зовнішні характеристики при різних характеристиках навантаження (рис. 12.5а).

Отже, при чисто активному ($\varphi = 0$) і активно-індуктивному навантаженнях ($\varphi > 0$) напруга генератора зі зростанням струму зменшується, а при активно-ємнісному навантаженні $\varphi < 0$ - зростає. Це пояснюється тим, що в останньому випадку діє поздовжньо-намагнічувальна реакція якоря, що збільшує магнітний потік, а у двох перших - повздовжньо-розмагнічувальна, що зменшує потік. При чисто активному навантаженні $\psi > 0$ обмотка статора володіє значною індуктивністю.

Номінальною зміною напруги синхронного генератора називається зміна напруги на виводах окремо працюючого генератора при зміні навантаження від номінального до холостого ходу.

При активно-ємнісному навантаженні зміна напруги буде від'ємною величиною.

Зміна напруги синхронних генераторів достатньо велика: $\Delta u_{ном} = 25 \div 35\%$, що ускладнює роботу споживачів. В даний час досконалі швидкодіючі регулятори дозволяють підтримувати заданий рівень напруги з їх допомогою за необхідним законом змінюється струм збудження, а значить і магнітний потік. Як потрібно регулювати струм збудження, щоб при зміні навантаження напруга синхронного генератора залишалася незмінною, показують регульовальні характеристики.

Регульовальні характеристики представляють собою залежність струму збудження від струму навантаження $I_{зб} = f(I_я)$ при $U = const$. Вигляд регульовальних характеристик при різному характері навантаження показаний на рис. 12.5, причому вважається, що у всіх трьох випадках напруга U однакова.

Вигляд регульовальних характеристик пояснюється також характером дії реакції якоря. При відстаючому струмі ($\varphi > 0$) для компенсації її впливу на потік і напругу зі збільшенням струму навантаження зі збільшенням струму навантаження $I_я$ необхідно збільшувати струм збудження $I_{зб}$. При чисто активному навантаженні ($\varphi = 0$) розмагнічуюча повздовжня реакція якоря слабка і вимагається менше збільшення $I_{зб}$. При випереджаючому струмі ($\varphi < 0$) для збереження постійності напруги необхідно зі збільшенням струму $I_я$ зменшити струм $I_{зб}$.

12.6. Потужність і електромагнітний момент синхронної машини

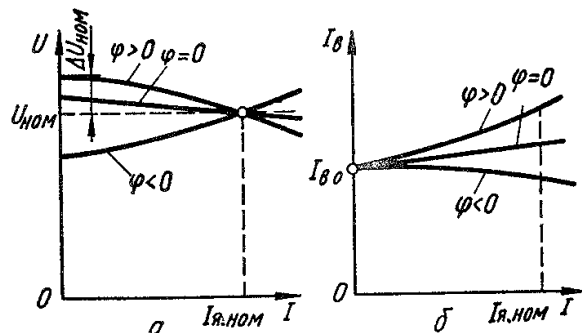


Рис 12.5. Зовнішні (а) і регульовальні (б) характеристики синхронного генератора

При активно-індуктивному навантаженні (рис. 12.4б) вектор $\dot{I}_я$

відстає від вектора \dot{U} на кут φ , а вектор

Активна потужність. Розглянемо векторну діаграму на рис. 12.4б, на котрій зсув між векторами напруги \dot{U} і ЕРС \dot{E}_o визначається кутом навантаження $\theta = \psi - \varphi$, а проекція вектора \dot{E}_o на продовження вектора \dot{U} дорівнює, відрізку OB . Отриманий в результаті побудови трикутник ABC подібний трикутнику CDO , отже, $\angle BAC = \varphi$.

Спільна сторона AB двох трикутників OBA і CBA

$$AB = Oa \sin \theta = Ac \cos \varphi$$

або з урахуванням модулів відповідних векторів $E_o \sin \theta = I_a x_c \cos \varphi$, звідси $I_a \cos \varphi = \frac{E_o}{x_c} \sin \theta$.

Отже, активна потужність m -фазної машини

$$P = mUI_a \cos \varphi = \frac{mUE_o}{x_c} \sin \theta \quad (12.7)$$

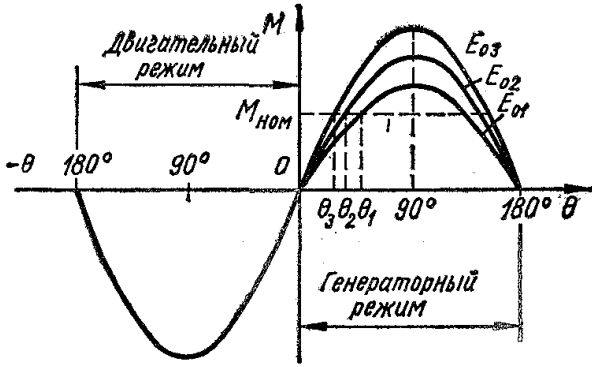
вона пропорційна $\sin \theta$.

Електромагнітний момент. У синхронних машинах великої і середньої потужності втрати в обмотках статора незначні в порівнянні з потужністю P що віддається (в генераторі) або споживається (у двигуні) цією обмоткою. Тому можна вважати, що електромагнітна потужність $P_{ем} = P$; тоді електромагнітний момент [див. рівняння

(11.16)] з урахуванням (12.7)

$$M = \frac{P_{ем}}{\Omega_1} = \frac{mUE_o}{x_c} \sin \theta \quad (12.8)$$

Рис.12.6. Кутові характеристики неявнополюсної синхронної машини при різних струмах збудження



З рівняння (12.8) випливає, що у неявнополюсної машини залежність $M = f(\theta)$ є синусоїда, симетрична відносно осей координат. Відзначимо, що у явнополюсної машини ця залежність трохи спотворюється, але подальше пояснення процесу зручно проводити на прикладі неявнополюсної машини.

Форма кривої $M = f(\theta)$ її називають *кутовою характеристикою* (рис. 12.6) - обумовлена тим, що основний Φ_0 і результуючий $\Phi_{рез}$ магнітні потоки зсунуті як і вектори $\dot{E}_o, i\dot{U}$, на кут θ . Якщо $\theta = 0$ (холостий хід), то між ротором і статором існують тільки сили притягання і момент $M=0$. При $\theta > 0$ (режим генератора) вісь потоку Φ_0 випереджує вісь потоку $\Phi_{рез}$ на кут θ . Пружні магнітні силові лінії "розтягуються", причому тим сильніше, чим більше навантаження, тобто поперечна реакція якоря. Ротор ніби "веде" за собою статор. При цьому створюється гальмівний момент M . Максимум моменту відповідає значенню $\theta = 90^\circ$, коли вісь полюсів розміщена між осями результуючого потоку.

При $\theta < 0$ (режим двигуна) вісь потоку Φ_0 відстає від осі потоку $\Phi_{рез}$ ротор є "веденим", "розтягнуті" магнітні силові лінії, тягнучі його за собою, створюють обертальний момент.

Відношення максимального моменту (при $\theta = 90^\circ$) до номінального (при $\theta = \theta_{ном}$) характеризує *перевантажувальну здатність* машини $k_m = M_{max} / M_{ном} = 1 / \sin \theta_{ном}$, тим більша перевантажувальна здатність. При $\theta = 90^\circ$ магнітні силові лінії, що зв'язують статор і ротор "розриваються", момент падає, стійка робота стає неможливою.

Якщо генератор працював паралельно з мережею, то при розриві магнітних силових ліній магнітні поля ротора і статора, почнуть обертатися з різними частотами, їх взаємодія буде порушена; відбувається *випадання з синхронності*, котре є аварійним режимом, бо супроводжується протіканням через обмотку якоря значних струмів.

Стійкість генератора можна підвищити, збільшивши струм збудження; при цьому зростають ЕРС E_c і, згідно (12.6), момент M_{max} . На рис. 12.6 зображені кутові характеристики при різних струмах збудження, причому $E_{03} > E_{02} > E_{01}$, звідки випливає, що при заданому навантаженні кут θ зменшується зі зростанням струму збудження; значить, росте і значення k_m .

Реактивна потужність. Розглянемо на прикладі неявнополюсної машини залежність реактивної потужності Q від кута θ . На рис. 12.4б сторона трикутника OBA $OB = OC + CB$, або з урахуванням модулів відповідних векторів $E_0 \cos \theta = U + I_\alpha x_c \sin \varphi$, звідки $I_\alpha \sin \varphi = (E_0 \cos \theta - U) / x_c$.

Отже, реактивна потужність m -фазної машини

$$Q = mUI_\alpha \sin \theta = mU \frac{E_0 \cos \theta - U}{x_c} \quad (12.9)$$

вона є функцією кута θ і максимальна при $\theta = 0$, тобто при холостому ході

$$Q = mU \frac{E_0 - U}{x_c} \quad (12.10)$$

Зміною значення E_0 можна регулювати реактивну потужність. Якщо генератор працює паралельно з мережею, напруга, на якій U , то можливі три випадки регулювання: $E_0 = U$; $E_0 > U$; $E_0 < U$.

Струм збудження $I_{зб.м}$, при якому $E_0 = U$ називається *нормальним*; при цьому $Q_{\max} = 0$, $\cos \varphi = 1$.

Якщо струм збудження більший від нормального, тобто $I_{зб} > I_{зб.н}$ (машина сильно збуджена), то $E_0 > U$, $Q_{\max} > 0$, тобто реактивна потужність додатна, а синхронна по відношенню до мережі еквівалентна ємності (конденсатору).

Якщо $I_{зб} < I_{зб.н}$, то $E_0 < U$, і $Q_{\max} < 0$, тобто реактивна потужність від'ємна, а машина по відношенню до мережі еквівалентна індуктивності.

Таким чином, синхронна машина без активного навантаження може використовуватися для регулювання коефіцієнта потужності і підтримання нормального рівня напруги в мережі; така машина називається *синхронним компенсатором*.

Можна показати, що і в режимі активного навантаження синхронна машина володіє такою ж хорошою властивістю - здатністю змінювати свою реактивну потужність і тим самим регулювати $\cos \varphi$ мереж.

Коливання синхронних машин. Деякі коливальні рухи ротора, що обертається на пружних магнітних силових лініях, що зв'язують його зі статором, можливі при порушенні рівноваги між розвинутим електромагнітним моментом і моментом, прикладеним до вала. Коливання пов'язані зі зміною кута θ від одного значення до іншого. Такі коливання називаються *власними*.

Коливання ротора призводять до перетину стержнями заспокійливої обмотки (див. п. 12.2) магнітного поля, в результаті чого в ній і в осерді ротора течуть вихрові струми, котрі, взаємодіючи з магнітним полем «заспокоюють» коливання.

Особливу небезпеку становлять вимушені коливання, викликані нерівномірним обертальним моментом провідного двигуна (наприклад, дизеля на тепловозах). Якщо виникає резонанс коливань (співпадання власних і вимушених частот), то генератор може випасти із синхронності і може статися пошкодження його вала. Коливанням підвладні також синхронні двигуни.

12.7. Синхронні двигуни.

Синхронна машина що працює паралельно з мережею, автоматично переходить в режим двигуна, якщо до її вала, від'єднавши первинний двигун, прикласти гальмівний момент. При цьому машина споживає з мережі основну потужність і виникає обертальний момент. Частота обертання ротора залишається *незмінною*, жорстко зв'язаною з частотою мережі співвідношенням (12.1). Приведені на рис 12.6 кутові характеристики при $\theta < 0$ справедливі для двигунів такого режиму.

Корисною властивістю синхронного двигуна є його здатність панювати з $\cos \varphi = 1$ навіть з випереджувачим $\cos \varphi$ в режимі значного збудження.

Запуск в хід синхронного двигуна викликає певні труднощі, оскільки двигун не має початкового пускового моменту. Якщо двигун зі збудженим індуктором ввімкнути в мережу змінного струму, то ротор через інерцію не може бути відразу поведений полем статора, електромагнітний момент двічі змінить свій напрям і стійкий зв'язок між полями ротора і статора не виникне. Отже, для запуску в хід необхідно *розігнати ротор за допомогою зовнішнього моменту до частоти обертання, близької до синхронної.*

Джерелом такого зовнішнього моменту може бути сторонній двигун (синхронний або постійного струму). Але запуск при цьому можливий практично без навантаження. Коли ротор двигуна досягає частоти обертання, близької до синхронної, статор вмикається в мережу.

Найбільше розповсюдження дістав асинхронний запуск. В цьому випадку двигун запускається в роботу як асинхронний, для чого він забезпечений спеціальною короткозамкнутою обмоткою запуску (див. п. 12.2). При досягненні частоти обертання, близької до синхронної ($n \approx 0,95n_1$), обмотку збудження вмикають до джерела постійного струму, що створює синхронізуючий момент і ротор втягується в синхронізм. При асинхронному запуску обмотку збудження не можна залишати розімкнутою бо поле статора, яке обертається, наводить в ній дуже велику ЕРС, небезпечну для цілісності ізоляції і обслуговуючого персоналу. Тому обмотку збудження на період запуску замикають на резистор, опір якого приблизно в 10 разів перевищує її опір.

У деяких випадках можливий *частковий запуск*, коли двигун живлять від окремого синхронного генератора, частоту якого плавно піднімають від нуля. При цьому двигун приходить в синхроне обертання вже при невеликій частоті.

Порівняння синхронного двигуна з асинхронним дозволяє відзначити його переваги і недоліки.

Що переваг синхронного двигуна відносяться:

а) можливість роботи не тільки з $\cos \varphi = 1$, але й випереджуючим $\cos \varphi$, що істотно покращує коефіцієнти потужності мереж; струм синхронного двигуна менший, ніж у асинхронного з однаковою потужністю;

б) менша чутливість до коливань напруги, бо його обертальний момент пропорційний напрузі в першій степені, а не в квадраті [пор. рівняння (12.8) і (11.26)];

в) суворості постійності частоти обертання незалежно від навантаження на валу.

Недоліками синхронного двигуна є:

а) складність конструкції і вартість, особливо у порівнянні з короткозамкненим асинхронним двигуном;

б) порівняна складність запуску в роботу;

в) складність регулювання частоти обертання, яке можливе тільки зі зміною частоти напруги живлення.

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 кутлова характеристика?
7. Як змінюється взаєморозміщення магнітних осей ротора і результуючого поля при роботі в режимі двигуна і генератора?
8. Що може призвести до випадання із синхронності?
9. Як змінюється реактивна потужність синхронної машини при зміні струму збудження? Чому можна регулювати коефіцієнт потужності мережі?
10. Які існують способи запуску в хід синхронних двигунів?
11. Порівняйте експлуатаційні показники асинхронних і синхронних двигунів; як змінюються їх максимальні моменти при зменшенні напруги мережі на 20%?

Розділ четвертий

НАВАНТАЖУВАЛЬНА ЗДАТНІСТЬ І ТЕХНІКО-ЕКОНОМІЧНІ ПОКАЗНИКИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

Частина 13. Втрати енергії і ККД електричних машин і трансформаторів

13.1 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: 1) втрат у підшипниках p_{Π} ; 2) втрат на тертя щіток об колектор або контактні кільця p_{κ} ; 3) 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

$$p_{мх} = p_{\Pi} + p_{\kappa} + p_{в.н} \quad (13.1)$$

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

$$p_c = p_{1/50} (f/50)^8 B^2 G_c \quad (13.2)$$

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

$$p_m = I^2 R \quad (13.3)$$

і перехідних втрат в контактні щіток

$$p_{щ} = \Delta U_{щ} I \quad (13.4)$$

де $\Delta U_{щ}$ - падіння напруги на щітковому контакті, який, згідно ГОСТ 2582-81, дорівнює 3 або 2 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 0,5-1% номінальної потужності, а для тягових двигунів, згідно ГОСТ 2582-81, - 30% втрат у сталі при номінальному навантаженні. При зміні навантаження можна вважати, що додаткові втрати змінюються пропорційно квадрату струму.

Повні втрати представляють собою суму всіх втрат

$$\sum p = p_{мх} + p_c + p_m + p_{щ} + p_{доd} \quad (13.5)$$

і їх можна розділити на три групи:

- 1) втрати, що залежать від струму, $p_0 = p_{мх} + p_c$,
- 2) втрати, що залежать від струму, $p_{щ}$;
- 3) 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

де $k_n = I / I_{ном}$ - коефіцієнт навантаження.

Перехідні втрати в контактні щіток навіть у машин постійного струму відносно малі. Їх значення у висковольтних машин невеликої потужності складає звичайно частину відсотка, а у порівняно низьковольтних машин - 2 ÷ 5% повних втрат. Ця обставина дозволяє знехтувати цим видом втрат, тобто вважати . Тоді вираз (13.6) приймає вигляд

$$\Sigma p = p_0 + k_n^2 p_{м.ном} \quad (13.7)$$

13.2. ККД і його визначення

ККД машини чи трансформатора представляє собою відношення корисної (віддаваної) 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 85-90%, потужністю 200 кВт - 90 ÷ 92%, потужністю 400-700 кВт - 93 ÷ 95%. Потужні трансформатори мають ще вищий ККД, що досягає 99+99,5%.

Таким чином, різниця між значеннями I'_2 і P_1 порівняно невелика, що накладає певні труднощі при дослідному чи аналітичному визначенні ККД. Тому для різноманітних умов зручніше визначити ККД за виведеними формулами, маючи на увазі, що $P_1 = P_2 + \Sigma p$.

Для двигуна, у якого легко виміряти підведену електричну потужність $P_1 = U_{\text{ов}} I$, ККД

$$\eta_{\text{дв}} = \frac{P_2}{P_1} = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \quad (13.8)$$

Для генератора, що віддає потужність $P_2 = U_r I$, вираз (13.8) можна представити у вигляді

$$\eta_r = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = 1 - \frac{\Sigma p}{P_2 + \Sigma p} \quad (13.9)$$

при цьому отримується більш правильний результат, бо значення втрат Σp складає лише незначну частину корисної потужності P_2 .

Проаналізуємо зміни ККД в залежності від навантаження, взявши для прикладу генератор постійного струму, хоча аналогічний результат може бути отриманий для будь-якої машини або трансформатора.

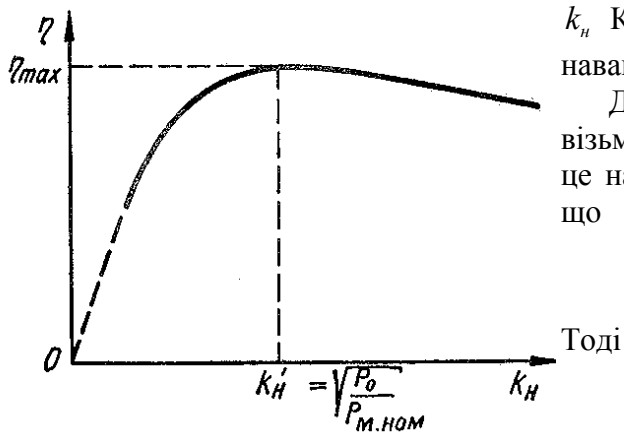
Корисна потужність генератора, що має номінальну потужність $P_{2ном} = U_r I_{ном}$, при довільно вибраному струмі I складає

$$P_2 = U_r I = U_r I_{ном} = k_n P_{2ном}$$

Вираз (13.9) з урахуванням (13.6) при цьому набуде вигляду

$$\eta_r = \frac{P_2}{P_2 + \Sigma p} = \frac{k_n P_{2ном}}{k_n P_{2ном} + p_0 + k_n^2 P_{м.ном}} \quad (13.10)$$

З (13.10) 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 $P_2 = k_n P_{2ном}$, але одночасно швидше, ніж P_2 зростають втрати, пропорційні квадратові струму, $k_n^2 p_{м.ном}$. Тому зростання ККД сповільнюється і після досягнення максимуму при деякому значенні



k_n ККД поступово спадає. Залежність ККД від коефіцієнту навантаження показана на рис. 13.1.

Для знаходження умов, при яких ККД досягає максимуму, візьмемо похідну від η по k_n і прирівняємо її до нуля. Зробимо це на прикладі двигуна постійного струму, коли $P_{ш} = I^2 R$, так що

$$\eta_{\text{ов}} = 1 - \frac{\Sigma p}{U_{\text{ов}} I} = 1 - \frac{\Sigma p}{U_{\text{ов}} k_n I_{ном}}$$

$$\frac{d\eta_{\text{ов}}}{dk_n} = \frac{\frac{d\Sigma p}{dk_n} U_{\text{ов}} k_n I_{ном} - U_{\text{ов}} I_{ном} \Sigma p}{U_{\text{ов}}^2 k_n^2 I_{ном}^2}$$

Рис. 13.1. Залежність ККД від коефіцієнту навантаження електричних машин і трансформаторів

Очевидно, цей дріб дорівнює нулю, якщо чисельник його дорівнює нулю, тобто $(d\Sigma p / dk_n) k_n - \Sigma p = 0$, або з урахуванням

(13.6)

$$(d\Sigma p / dk_n) k_n = p_0 + k_n p_{щ.ном} + k_n^2 p_{м.ном}$$

Звідси

$$(0 + p_{ц.ном} + 2k_n p_{м.ном}) k_n = p_0 + k_n p_{ц.ном} + k_n^2 p_{м.ном}$$

Перетворивши останній вираз, отримаємо

тобто 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 ($p_m, p_{ц}, p_{од}$) визначають вирахуванням згідно відповідних формул.

ККД трансформатора визначають за формулою (13.9), вважаючи, що

$$P_2 = U_{2ном} k_n I_{2ном} \cos \varphi_2 = k_n S_{ном} \cos \varphi_2 \quad (13.12)$$

$$\Sigma p = p_c + k_n^2 p_{м.ном} = P_0 + k_n P_k \quad (13.13)$$

де $S_{ном} = U_{2ном} I_{2ном}$ - номінальна потужність трансформатора, а P_0 і P_k - відповідно потужності холостого ходу і короткого замикання (див. п.8.8 і 8.9).

При наявності двох цілком однакових машин постійного струму (наприклад, тягових двигунів) ККД можна визначити *методом взаємного навантаження*, поєднавши обидві машини механічно та електрично. При цьому одна машина працює двигуном, а інша - генератором: двигун обертає генератор, а генератор живить двигун електроенергією. З мережі споживається енергія, що необхідна для покриття втрат в обох випробовуваних машинах, що робить цей метод значно економічним.

Контрольні запитання і задачі

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?
6. Чому дорівнює ККД трансформатора, якщо $P_2=920 \text{ кВт}$, $p_c=5,1 \text{ кВт}$ і $p_m=15 \text{ кВт}$?
7. При випробовуванні методом взаємного навантаження двох тягових двигунів сума втрат в агрегаті склала 50 кВт при напрузі 1500 В і струмі 300 А . Визначити ККД машин і їх потужності.

Частина 14. Нагрів і охолодження електричних машин і трансформаторів

14.1. Перегрів і його визначення

В електричних машинах і трансформаторах в результаті виділення теплоти найбільше страждають ізоляційні матеріали (див. п. В.7). 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 зменшено.

Таким чином, абсолютна температура нагрітої машини

$$\vartheta_{ГАР} = \tau + \vartheta_0 \quad (14.1)$$

Температуру різних частин машин і трансформаторів можна визначити: 1) термометром; 2) методом опору, що полягає у зміні опору провідника при зміні температури; 3) термоіндикаторами.

Термометром вимірюють температуру колектора; термоіндикатори (термопари) 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

Дію тягових машин ГОСТ 2582-31 рекомендує опір обмоток ненагрітої машини r_{20} приводити до 20°C. Тоді при будь-яких температурах в холодному $\vartheta_{хол}$, і гарячому, $\vartheta_{ГАР}$ станах опори відповідно дорівнюють

$$\kappa_{хол} = r_{20} [1 + \alpha (\vartheta_{хол} - 20)] \quad (14.2)$$

$$\kappa_{гар} = r_{20} [1 + \alpha (\vartheta_{гар} - 20)] \quad (14.3)$$

де α - температурний коефіцієнт матеріалу провідника, що дорівнює збільшенню його опору при підвищенню його температури на 1°C; для міді $\alpha = 1/250$, а для алюмінію . Розділивши (14.3) на(14.2) і перетворивши, отримаємо

$$\vartheta_{гар} = \frac{r_{гар}}{r_{хол}} (230 + \vartheta_{хол}) - 230 \quad (14.4)$$

Розв'язок рівняння (14.4) може бути недостатньо правильним, через близькість значень $r_{гар}$ і $r_{хол}$. Точність можна підвищити, якщо до чисельника правої частини (14.4) додати і відняти від нього $r_{хол}$; тоді

$$\vartheta_{гар} = \frac{r_{гар} + r_{хол} - r_{хол}}{r_{хол}} (230 + \vartheta_{хол}) - 230 = \frac{r_{гар} - r_{хол}}{r_{хол}} (230 + \vartheta_{хол}) - \vartheta_{хол} \quad (14.5)$$

Отже, згідно (14.1) перегрівання

$$\tau = \vartheta_{гар} - \vartheta_0 = \frac{r_{гар} - r_{хол}}{r_{хол}} (230 + \vartheta_{хол}) + \vartheta_{хол} - \vartheta_0 \quad (14.6)$$

Якщо за опір обмотки в холодному стані приймати його значення» приведене до 20°C, то

При використанні формул (14.4) - (14.7) для алюмінієвих обмоток треба підставляти 240 замість 230 і 260 замість 250.

14.2. 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:

$$Qdt - S\lambda\tau dt = Gcd\tau \quad (14.8)$$

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 (14.8) матиме вигляд

$$Qdt - S\lambda\tau_k dt = 0$$

звідки

$$\tau_k = Q/(S\lambda) \quad (14.9)$$

З рівняння (14.9) випливає, що кінцевий перегрів тіла від його маси і теплоємності не залежить, а прямо пропорційний тепловому потоковій Q , і обернено пропорційний площі поверхні тіла S і коефіцієнту тепловіддачі λ .

Розділивши (14.8) на $S\lambda$, отримаємо

$$Q \dots \dots Gc \dots \dots (14.10)$$

Виявляється, що множник $\frac{Gc}{S\lambda}$ у правій частині рівняння (14.10) має розмірність часу. Дійсно, згідно (14.9) $S\lambda = Q/\tau_k$, то

$$T = Gc/(S\lambda) = Gc\tau_k / Q \quad (14.11)$$

Величини, що входять в (14.11) мають такі розмірності: G - кг, $c = \frac{Bm \cdot c}{C \cdot кг}$, $\tau_k = C$, Q - 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 - квадратів його розмірів, постійна T пропорційна лінійним розмірам тіла. Величина T характеризує *швидкість протікання теплових процесів*. Наприклад, для тягових електродвигунів, що мають осьову довжину і однаковий з нею поперечний розмір близько 1 м, постійна $T \approx 1$ год.

Підставивши (14.9) і (14.11) у (14.10) і перетворивши отриманий вираз, знайдемо $(\tau_k - \tau) dt = T d\tau$, або

$$\frac{dt}{T} = \frac{d\tau}{\tau_k - \tau} \quad (14.12)$$

Інтегрування (14.12) дає

$$\frac{t}{T} = -\ln(\tau_k - \tau) + C$$

де стала інтегрування C знаходиться з умови того, що у початковий момент часу ($t = 0$) перевищення температури поверхні тіла над температурою навколишнього середовища дорівнює τ_0 . Тоді

$$0 = -\ln(\tau_k - \tau_0) + C, \text{ або } C = \ln(\tau_k - \tau_0)$$

так що

$$\frac{t}{T} = \ln \frac{\tau_k - \tau_0}{\tau_k - \tau}$$

Звідси остаточно знаходимо τ як функцію часу t :

$$\tau = \tau_k (1 - e^{-t/T}) + \tau_0 e^{-t/T} \quad (14.13)$$

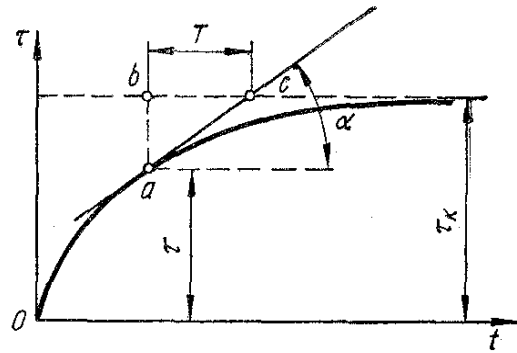
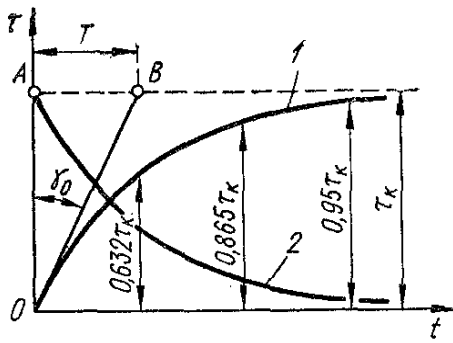
де $e = 2.718$ - основа натуральних логарифмів.

Якщо в початковий момент часу ($t = 0$) тіло мало температуру навколишнього середовища, тобто ($\tau_0 = 0$), то

$$\tau = \tau_k (1 - e^{-t/T})$$

У цьому вигляді рівняння для визначення перегрівання тіла представляє собою найбільший практичний інтерес. Крива I , побудована за рівнянням (14.14), зображена на рис. 14.1. З рівняння (14.14) випливає, що $\tau = \tau_k$ при $t = \infty$, тобто тіло досягає встановленого перегріву через нескінченно довгий час. Однак, так як $\tau/\tau_k = 1 - e^{-t/T}$, то можна скласти таку залежність:

t/T	12	2	3	4	5
τ/τ_k	0,632	0,865	0,950	0,982	0,993



Таким чином, можна вважати, що при $i = (4 \div 5)T$ тепловий процес встановився.

Рис.14.1. Криві нагрівання (1) і охолодження (2) твердого тіла

Рис.14.2. Графічне визначення сталої часу нагрівання

Сталу часу нагрівання тіла можна визначити таким чином. Провівши до кривої нагрівання (рис.14.2) під кутом α до осі абсцис дотичну в будь-якій довільно вибраній точці a і продовжити її до перетину у точці c з лінією кінцевої температури τ_k , з прямокутного Δabc з урахуванням (14.12) маємо:

$$bc = \frac{ab}{\tan \alpha} = \frac{\tau_k - \tau}{\tan \alpha}$$

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. 14.1).

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 $\tau_{k,ox}$. Підставивши ці значення у рівняння (14.13) отримаємо рівняння охолодження тіла

$$\tau = \tau_k e^{-t/T}$$

Крива 2, побудована за рівнянням (14.15) показана на рис. 14.1. Як бачимо, вона представляє собою дзеркальне відображення кривої 1.

14.3. 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 ($\tau = \tau_{дон}$).

На основі цих уявлень ГОСТ 183-74 встановлює три основних номінальних режими роботи електричної машини: 1) довготривалий, 2) короткочасний; 3) 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 (14.14) і графічно зображується кривою 1 нарис. 14.1.

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.

Відповідний графік теплового процесу зображено на рис. 14.3а. При навантаженні машини, що відповідає короткочасному режиму, $\tau_{kp} = \tau_{дон} < \tau_k$, 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.

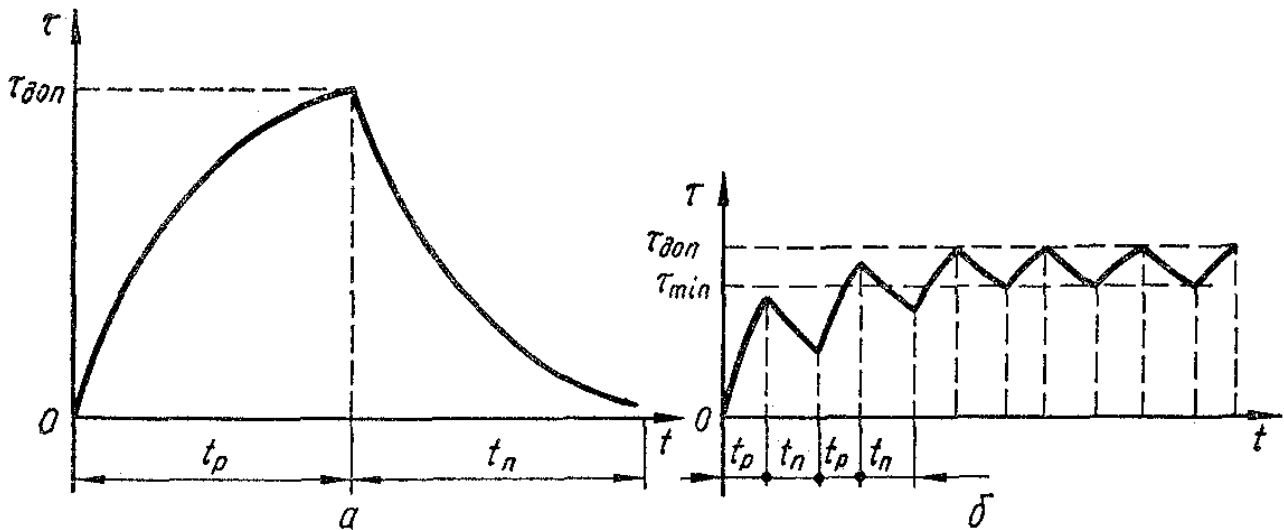


Рис. 14.3. Криві нагрівання при короткочасному (а) і повторно-короткочасному (б) режимах роботи електричної машини

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 (%):

$$TR = \frac{t_p}{t_p + t_n} \cdot 100$$

Графік теплового процесу у цьому режимі зображений на рис. 14.36. Почавши роботу при $\tau_0 = 0$, 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 τ_{\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.

14.4. 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 втратити 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 криогенної машини є криостат, тобто ізольований від зовнішнього середовища резервуар, заповнений рідким гелієм. Всередині криостату 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 охолоджуються 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 пилюкою, що завжди є в повітрі. Особливе значення замкнена система вентиляції має для локомотивів промислового транспорту, що працюють у надзвичайно запиленому середовищі.

Вентиляція повітрям електричних машин буває осьовою, коли повітря спеціальними каналами і по поверхні ротора проходить в осьовому напрямку, або радіальною, коли повітря проходить радіальними каналами всередині ротора і статора машини. Може бути і змішана радіально-осьова вентиляція.

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, складає

де c - теплоємність охолоджуючого середовища; v_{zap} - температура нагрітого охолоджуючого середовища, що виходить, з машини.

Для повітря $c = 1100 \frac{Вт \cdot c}{^{\circ}C \cdot м^3}$; в залежності системи вентиляції, конструкції машини і її потужності $(\vartheta_{zap} - \vartheta_0) = 15 \div 25^{\circ}C$. Отже, на 1000 Вт витрат необхідна кількість повітря

$$Q = \frac{1000}{1100(15 \div 25)} = 0.036 \div 0.06 \frac{м^3}{c}$$

Для тягових двигунів локомотивів витрати охолоджуючого повітря складає приблизно $0,05 \frac{м^3}{c}$.

Для трансформаторного масла $c = 1400 \cdot 1100 \frac{Вт \cdot c}{^{\circ}C \cdot м^3}$; відповідно його об'ємні витрати в 1400 разів менші, ніж повітря.

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?

Частина 15. Габаритні розміри і маса електричних у машин і трансформаторів

15.1. Електрична стала.

Теорія і практика сучасного електромашинобудування виробили певні залежності розмірів машин від їх електромагнітних навантажень, частоти мережі живлення, частоти обертання тощо.

Одним з техніко-економічних показників машини є *електромашинна стала*. Виведемо її рівняння на приклад машини постійного струму, хоча її кінцевий вираз справедливий для будь-яких типів машин.

Електромагнітний момент згідно виразу (3.29),

$$M_{em} = \frac{pN}{2a\pi} \Phi_0 I_a = \frac{pN}{2a\pi} \alpha B_\delta \frac{\pi D_a}{2p} l_a I_a \quad (15.1)$$

де $\Phi_0 = \alpha B_\delta \frac{\pi D_\delta l_\delta}{2p}$ отримано в результаті спільного відношення (3.21) і (3.23).

Згідно рівняння (4.1), $I_\delta = 2\alpha\pi D_\delta A / N$; підставивши це значення струму (15.1) і перетворивши, отримуємо

$$M_{em} = \frac{\pi}{\gamma} A \alpha B_\delta D_\delta^2 l_\delta$$

або

$$\frac{D_\delta^2 l_\delta n}{\pi} = \frac{2}{\gamma} \quad (15.2a)$$

В правій частині рівняння (15.2a) згруповані величини, які наданому історичному етапі розвитку науки і техніки є постійними, оскільки ними - лінійним навантаженням A з індукцією B_δ - визначаються фізичні властивості матеріалів за можливостями їх струмового і магнітного навантаження. Для тягових двигунів ці величини вибираються найбільш можливими; такі машини називають *машинами оптимального виконання* (значення a ; B_δ і A вказані в п. 2.1, 2.3 і 4.2). Очевидно, чим більше значення A і B_δ , тим меншою може бути взята величина $D_\delta^2 l_\delta$ для створення моменту M_{em} .

Формула (15.2a) показує, що *розміри машини (її об'єм) визначаються не потужністю, а електромагнітним моментом.*

Оскільки $M_{em} = \frac{P_{em}}{\Omega} = P_{em} / (2\pi n)$, формулі (15.2a) можна надати вигляд

$$\frac{D_\delta^2 l_\delta n}{P_{em}} = \frac{1}{\pi^2 A \alpha B_\delta} = C_A \quad (15.2b)$$

Величина C_A називається *електромашиною сталою* (сталою Арнольда); вона встановлює загальну залежність основних розмірів від питомих навантажень, характеризуючи, "об'ємні" витрати матеріалів якоря..

Формула (15.2b) показує, що при даних розмірах (об'ємі якоря) потужність машини можна підвищити пропорційно частоті обертання, тобто *при заданій потужності більш швидкісні машини менші за розмірами, а значить легші і дешевші.*

15.2. Вилів частоти на розміри трансформаторів

Як показує досвід, асинхронні двигуни потужністю до 100 кВт виходять найкомпактнішими при чотирьох і шестиполосному виконанні, тобто $p = 2$ або 3 . Якщо цю величину прийняти незмінною, то оскільки $f_1 = pn$, бажано збільшувати частоту f_1 бо при цьому росте значення n_1 і, згідно (15.2b), розміри машини і її маса зменшується (не дивлячись на те, що зі зростанням частоти, щоб не допустити значного зростання втрат, доводиться дещо знижувати електромагнітні, навантаження).

При збільшенні частоти зменшуються розміри трансформатора. Збільшимо частоту від f_1 до f_2 , зберігаючи при цьому незмінними втрати у сталі. Тоді, згідно (13.2) треба витримати рівність $f_1^\beta B_1^2 = f_2^\beta B_2^2$, де прийmemo $\beta = \frac{4}{3} = 1.333$. Отже

$$D = \sqrt[4/3]{\frac{f_2}{f_1}} D_1 = D_1 \left(\frac{f_2}{f_1}\right)^{3/4} \quad (15.2c)$$

Оскільки у трансформатора, згідно (8.4) $E = 4.44wf\Phi_m$, а $\Phi_m = BQ_{cm}$, де Q_{cm} - площа поперечного перерізу стержня магнітопроводу, повна потужність

$$S_{ном} = EI_{ном} = 4.44wfBQ_{cm}I_{ном} \quad (15.4a)$$

Якщо позначити густину струму в провіднику через j , а його площу поперечного перерізу - q , то $I_{ном} = jq$; тоді формула (15.4a) прийме вигляд

$$S_{ном} = 4.44fBQ_{cm} / qw \quad (15.4b)$$

Оскільки густина струму - величина для багатьох трансформаторів практично постійна ($j \approx 3 \div 4 \text{ A/mm}^2$), можна вважати, що добуток площі поперечного перерізу провідника на кількість

витків визначає площу поперечного вікна $Q_{вік}$, в якому розміщується обмотка трансформатора. З урахуванням цього рівняння (15.46) прийме вигляд

$$Q_{cm} Q_{вік} = \frac{S_{ном}}{cfB}$$

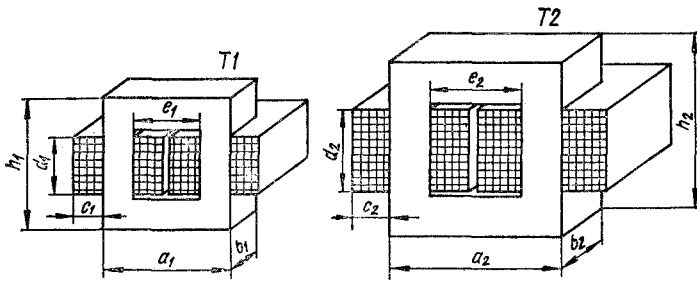


Рис. 15.1. Геометрично подібні трансформатори

де $c = 4.44j$.

Уявімо собі, що у двох подібних за конструкцією трансформаторів всі лінійні розміри (довжина, ширина і висота) відрізняються в λ разів. Тоді на рис. 15.1

$$a_2 / a_1 = b_2 / b_1 = c_2 / c_1 = d_2 / d_1 = e_2 / e_1 = h_2 / h_1 = \lambda.$$

Очевидно, що при цьому співвідношенні площ поперечних перерізів стержнів і вікон $Q_{cm2} / Q_{cm1} = Q_{вік2} / Q_{вік1} = \lambda^2$. При одних і тих і тих самих частотах і індукціях, згідно виразу (15.5)

Маса m і габаритний об'єм V трансформатора змінюється пропорційно до кубу його лінійних розмірів, тобто

$$Q_{cm2} Q_{вік2} = S_{ном2} = \lambda^4 \quad (15.6)$$

$$m_2 / m_1 = V_2 / V_1 = \lambda^3 \quad (15.7)$$

Для трансформатора при частоті f_1 згідно (15.5)

$$Q_{cm1} Q_{вік1} = \frac{S_{ном}}{cf_1 B_1}$$

а при частоті f_2 з урахуванням: (15.3)

Розділивши (15.9) на (15.8) з урахуванням (15.6) отримаємо

$$\frac{Q_{cm2} Q_{вік2}}{Q_{cm1} Q_{вік1}} = \frac{f_1}{f_2 (f_1 / f_2)^{2/3}} = \lambda^4$$

або

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{f_1}{f_2}} = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{1/4} \quad (15.10)$$

Підставивши це значення λ у рівняння (15.7) отримаємо

$$m_2 / m_1 = V_2 / V_1 = \left(\frac{f_1}{f_2}\right)^{3/4} \quad (15.11)$$

Уявімо собі, що частота підвищена з $f_1 = 50 \text{ Гц}$ до $f_2 = 400 \text{ Гц}$; тоді маса і об'єм трансформатора стануть $m_2 = m_1 \left(\frac{50}{400}\right)^{3/4} = 0.59 m_1$, тобто зменшаться майже на 40% або в 1,7 рази.

Ця ж закономірність практично справджується і для електричних машин. Ось чому при автономних системах електропостачання (кораблі, літаки, допоміжні машини деяких видів електричного рухомого складу) застосовують частоти 400 або 500 Гц,

Варто відзначити, що збільшення частоти при незмінній кількості полюсів доцільне лише до деяких меж, вище котрих розміри і маса машин знову починають зростати, бо приходиться знижувати електромагнітні навантаження, оскільки *через механічні, причини максимальна колова швидкість обмежена*. Викладене справджується для машин, аналогічних за своєю конструктивною схемою.

15.3. Техніко-економічні показники тягових двигунів

Характерною особливістю тягових двигунів є широкий діапазон регулювання частоти їх обертання, що визначається відношенням максимальної і мінімальної швидкостей руху локомотива:

$$k_v = v_{\max} / v_{\text{ном}} = n_{\max} / n_{\text{ном}}$$

У тепловозів і промислових електровозів $k_0 = 3 \div 4$, що значно більше, ніж у магістральних електровозів. В цей же час ця величина, що справляє істотний вплив на габарити і масу машини, ніяк не враховується формулою (15.26).

За умовами механічної міцності і стійкості роботи контакту щітка-колектор максимальні колові швидкості якоря і колектора обмежені значеннями $v_{я.макс} \geq 70 м/с$ і $v_{к.макс} \geq 55 м/с$.

Якщо максимально допустимій коловій швидкості відповідає максимальна частота обертання $n_{макс}$, то при номінальній частоті обертання $n_{ном}$ колова швидкість

$$v_{я.ном} = v_{я.макс} \frac{n_{ном}}{n_{макс}} \quad (15.13)$$

В загальному випадку $v_я = \pi D_я n$, або $D_я n_{ном} = v_{я.ном} / \pi$, тоді з урахуванням (15.12) і (15.13)

$$D_я n_{ном} = \frac{v_{я.макс} n_{ном}}{\pi n_{макс}} = \frac{v_{я.макс}}{\pi k_v} \quad (15.14)$$

Підставивши (13.14) в (15.10) і перетворивши, отримаємо

$$P = \frac{\pi}{\pi} A \alpha B_\delta D l v = \frac{D_я l_я v_{я.макс}}{\pi C'_A} = C'_A \frac{D_я l_я}{\pi} \quad (15.15)$$

де $C'_A v_{я.макс} / (\pi C'_A)$ - стала

З рівняння (15.15) випливає, що при обмеженні колової швидкості і заданій потужності розміри якоря зростають з ростом k_v . Це варто врахувати при розрахунку техніко економічних показників (потужність на одиницю маси, витрати матеріалів на одиницю потужності тощо) та оперувати величиною розрахункової потужності $P_p = k_v P_{ем} C'_A D_я l_я$, оскільки вона визначає розміри якоря, що для аналогічних машин рівноцінно розмірам всієї машини. Слід мати на увазі, що ці розміри обмежені тим "життєвим простором", в якому розміщений тяговий двигун під кузовом локомотива.

Приклад. Максимальна і номінальна швидкості магістрального електровоза дорівнюють 110 і 53 км/год, а кар'єрного - відповідного 85 і 25 км/год. Визначити електромагнітну потужність їх тягових гунів, якщо можливі такі значення навантажень і розмірів якоря: $A = 45000 А/м$, $a = 0.68$, $B_\delta = 0.95 Тл$, $v_{я.макс} = 65 м/с$, $D_я = 0.66 l_я = 0.4 м$.

Розв'язання. Скориставшись формулою (15.15) визначимо розрахункову потужність, котра, очевидно, однакова для обох двигунів:

$$P_p = k_v P_{ем} = \pi 45000 \cdot 0.68 \cdot 0.95 \cdot 0.66 \cdot 0.4 \cdot 65 = 1567156 Вт \approx 1567 кВт$$

Коефіцієнти регулювання швидкості магістрального і кар'єрного електровозів відповідно дорівнюють $k_{v,м} = 110/53 = 2.075$; $k_{v,к} = 85/25 = 3.4$.

Електромагнітні потужності, які можуть розвинути тягові двигуни магістрального і кар'єрного електровозів, відповідно дорівнюють

$$P_{ем,м} = 1567 / 2.075 \approx 755 кВт; P_{ем,к} = 1567 / 3.4 \approx 461 кВт$$

15.3. Вибір електродвигуна в залежності від умов його роботи

Вибір електродвигунів здійснюється за такими параметрами і показниками: родом струму і номінальної напруги, номінальною потужністю і частотою обертання, виглядом звичайної механічної характеристики, а також пусковими, регульовальними, гальмівними якостями і конструктивним виконанням. Важливим завданням є правильний вибір двигуна для роботи в певних умовах навколишнього середовища.

При виборі двигуна за потужністю важливо передбачити повне використання її в процесі роботи. Двигун завищеної, у порівнянні з потрібною потужністю працює недовантаженим і має гірший ККД і коефіцієнт потужності. Двигун заниженої потужності буде перевантажений струмом, що призведе до значних втрат енергії і, як наслідок, перегрівання його обмоток понад допустиму норму. Тому температура обмоток двигуна є головним критерієм, за яким вибирають двигун за потужністю.

В ряді випадків завдання по вибору двигуна за потужністю ускладнюється ще я тим, що навантаження на його валі в процесі роботи не залишається постійним, а змінюється, в часі внаслідок чого змінюється температура обмоток двигуна. Якщо зміна навантаження на валі двигуна відома, то можна судити про характер зміни втрат енергії в двигуні, що дозволяє вибрати двигун таким чином, що б

температура його обмоток не перевищувала допустиму. При цьому буде збережена умова забезпечення надійної роботи двигуна впродовж всього терміну його експлуатації.

Для короткочасної роботи можуть використовуватись двигуни, призначені для довготривалого режиму роботи.

Для роботи у повторно – короткочасних режимах використовуються зазвичай спеціально призначені двигуни. Всі їхні механічні дані наводяться в каталогах для стандартних значень TB (по ros $ПВ$). Наприклад, якщо у паспорті двигуна для приводу компресора електровозу вказано, що $TB=50\%$ (21 кВт), то можна реалізувати потужність 21 кВт, не боячись перегрівання двигуна тільки впродовж робочого часу, що складає 50% тривалості циклу. Решту часу циклу (50%) двигун не повинен працювати (пауза). Один і той самий двигун допускає роботу при різноманітних TB . Але чи більша TB , тим меншою має бути її навантаження.

Довготривалий режим роботи може протікати з постійним, або змінним навантаженням. Номінальна потужність, вказана в каталозі і є та найбільша потужність, яка може бути розвинена двигуном при постійному навантаженні на його валі.

Вибір двигуна, що працює довготривалий час зі змінним навантаженням (діаграма навантаження показана на рис.15.2) здійснюється за методом середніх втрат або методом еквівалентних струму, моменту і потужності.

Методи середніх втрат. Заснований на тій же умові, що двигун буде працювати за заданим графіком навантаження без перевищення допустимої температури, якщо середні втрати цього графіку навантаження $\Sigma p_{сер}$ не перевищує повних втрат енергії при номінальному режимі роботи двигуна $\Sigma p_{ном}$, тобто зберігається умова

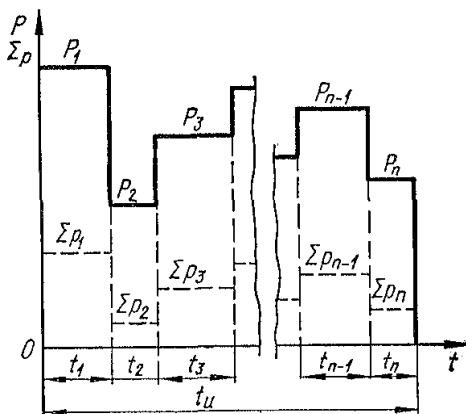
$$\Sigma p_{сер} \leq \Sigma p_{ном} \quad (15.16)$$

Знаючи номінальні значення ККД $\eta_{ном}$ і корисної потужності $P_{2ном}$ і використовуючи формулу (13.8), можна визначити повні втрати в ньому складають Σp_i . Тоді середні витрати за весь час роботи двигуна

$$\Sigma p_{ном} = P_{2ном} (1/\eta_{ном} - 1) \quad (15.17)$$

Нехай будь-якому відрізку часу t_i , згідно навантажувальної діаграми зміни втрат на рис.15.2, відповідає реалізована двигуном потужність P_i при якій повні втрати в ньому складають Σp_i . Тоді середні втрати за весь час роботи двигуна

$$\Sigma p_{сер} = \frac{\Sigma p_1 t_1 + \Sigma p_2 t_2 + \dots + \Sigma p_n t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$



Метод середніх втрат достатньо точний і може бути використаний при виборі електродвигуна будь якого типу. Але він вимагає проведення конкретних розрахунків втрат для кожної ділянки, що не завжди можна виконати.

Метод еквівалентного струму. Оснований на використанні Методу середніх втрат. При цьому вважається, що середні втрати $\Sigma p_{сер}$ створюються у двигуні, навантаженому таким розрахунковим (еквівалентним) струмом і $I_{екв}$, що виділяє за час роботи ту ж

Рис.15.2. Навантажувальна діаграма і кількість теплоти, що і дійсні струми. Відповідний струму $I_{екв}$ коефіцієнт навантаження назвемо еквівалентним: $k_{н.е} = I_{екв} / I_{ном}$. Тоді згідно з виразами (13.7) і (15.8), маємо:

$$\Sigma p_{сер} = p_0 + (k_{н.е})^2 p_{м.ном} = \frac{(p_0 + k_{н1}^2 p_{м.ном}) t_1 + (p_0 + k_{н2}^2 p_{м.ном}) t_2 + \dots + (p_0 + k_{нn}^2 p_{м.ном}) t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}$$

Підставивши сюди значення коефіцієнтів навантаження, і забравши члени з p_0 , скоротивши інші на $p_{м.ном} / I_{ном}^2$ і перетворивши, знайдемо значення еквівалентного струму

$$I_{екв} = \sqrt{\frac{I_1^2 t_1 + I_1^2 t_2 + \dots + I_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n I_i^2 t_i}{t_u}} \quad (15.19)$$

де t_u - тривалість повного циклу роботи двигуна. Двигун вибраний правильно, якщо справджується умова

Метод еквівалентного струму, заснований на методі середніх втрат для вибору будь-яких двигунів.

Метод еквівалентного моменту. Нагадаємо, що обертальний момент двигунів постійного струму паралельного і незалежного збудження, а також синхронних, згідне виразу (7.16), $M = c'_M I_\alpha$.

Ця обставина дозволяє ввести поняття еквівалентного моменту $M_{екв}$ відповідного еквівалентному струмові $I_{екв}$

Отже, аналогічно (15.19) вираз еквівалентного моменту має вигляд

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{M_1^2 t_1 + M_1^2 t_2 + \dots + M_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n M_i^2 t_i}{t_u}} \quad (15.21)$$

Умова правильного вибору двигуна

$$M_{екв} \leq M_{ном} \quad (13.22)$$

Метод еквівалентної потужності. Дозволяє через еквівалентну незмінну потужність $P_{екв}$ (потужність, яка за умовами нагрівання рівноцінна діючій змінній напрузі), оцінити нагрівання двигуна. Цей метод застосовується у тих випадках, коли при зміні навантаження кутова швидкість двигуна залишається сталою або змінюється незначно, тобто $\Omega \approx const$ (жорстка звичайна механічна характеристика)

Оскільки $P_{ном} = M_{ном} \Omega_{ном}$ і $P_{екв} = M_{екв} \Omega_{екв}$, з (15.21) отримаємо вираз еквівалентної потужності

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{P_1^2 t_1 + P_1^2 t_2 + \dots + P_n^2 t_n}{t_1 + t_2 + \dots + t_n}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n P_i^2 t_i}{t_u}} \quad (15.23)$$

Двигун вибраний правильно, якщо виконується умова

$$P_{екв} \leq P_{ном} \quad (15.24)$$

Методи еквівалентних моменту і потужності можуть застосовуватися для попереднього вибору і розрахунків, що не вимагають великої точності. Ці методи *неприйнятні для двигунів постійного струму послідовного збудження*, так як у них магнітний потік і частота обертання різко змінюються зі зміною струму навантаження.

Вибраний по будь-якому з методів двигун необхідно перевірити також на допустиме перевантаження, щоб максимальні значення струму, обертального моменту або потужності (за навантажувальною діаграмою) не перевищили відповідних величин, допустимих для даного двигуна.

Контрольні запитання

- 1..... Чим визначаються розміри якоря електричної машини?
- 2..... Чому вигідно збільшувати частоту обертання машини в номінальному режимі?
- 3..... Як впливає частота напруги живлення на розміри електричних машин і трансформаторів?
- 4..... Чому на моторвагонному складі встановлюють синхронний генератор, який напругою частотою 400 Гц живить допоміжні асинхронні двигуни.
- 5..... Як впливає діапазон регулювання тягових двигунів на їх розміри і потужність?
- 6..... Які ви-

моги висувають при виборі двигуна? В яких випадках застосовують методи середніх втрат і еквівалентних величин?