

Волинський національний університет імені Лесі Українки
Навчально-науковий фізико-технологічний інститут

**Кафедра експериментальної фізики,
інформаційних та освітніх технологій
Кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики
імені А.В. Свідзинського**

Андрій Кевшин, Сергій Федосов, Володимир Галян

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Конспект лекцій

Луцьк

2020

УДК 539.2
К-33

Рекомендовано до друку науково-методичною радою Волинського національного університету імені Лесі Українки (протокол № 4 від 16.12.2020 р.).

Рецензенти: *Яцинський Л. В.* – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра фундаментальних наук, Луцький НТУ;

Шигорін П. П. – канд. фіз.-мат. наук, доцент, кафедра теоретичної та комп'ютерної фізики імені А. В. Свідзинського, ВНУ імені Лесі Українки.

К 33 Кевшин А. Г., Федосов С. А, Галян В. В. **Електричні машини** : конспект лекцій. Луцьк, 2020. 62 с.

Конспект лекцій з «Електричні машини» – складова комплексу робочих матеріалів написаних на українській мові, створених для забезпечення якісної підготовки фахівців галузей знань 01 Освіта/Педагогіка, 10 Природничі науки, галузей знань технічних наук. Розділи видання охоплюють курси «Електричні машини», «Електричні приводи» та інших спецкурсів, і містить набір матеріалів необхідних для організації повноцінної аудиторної та самостійної роботи студентів. Матеріал конспекту лекцій рекомендовано використовувати після засвоєння навчальних дисциплін «Електрика і магнетизм», «Електротехніка», «Основи електротехніки та електроніки» тощо.

Навчальне видання відповідає чинним навчальним програм підготовки й рекомендовано студентам спеціальностей 014 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали, спеціальностей галузей технічних наук.

УДК 539.2

© Кевшин А. Г. та ін., 2020

© Вежа-Друк, 2020

ЗМІСТ

ВСТУП	5
ЛЕКЦІЯ № 1. ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ І БУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН	6
1.1. Історія розвитку електричних машин	6
1.2. Класифікація електричних машин та їх номінальні величини	7
1.3. Матеріали, які застосовуються в електромашинобудуванні	8
1.4. Будова та режими роботи електричної машини	9
1.5. Втрати потужності в електричних машинах	10
Контрольні запитання до лекції № 1	12
ЛЕКЦІЯ № 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ	13
2.1. Принцип роботи електричних машин	13
2.2. Виникнення обертового магнітного поля	15
2.3. Будова та принцип роботи асинхронної машини	18
2.4. Основні параметри та характеристики трифазного асинхронного електродвигуна	20
Контрольні запитання до лекції № 2	21
ЛЕКЦІЯ № 3. ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В АСИНХРОННІЙ МАШИНІ	22
3.1. ЕРС в обмотках статора і ротора. Струм ротора	22
3.2. Обертовий момент і механічна характеристика асинхронного двигуна	24
3.3. Робочі характеристики асинхронного двигуна	26
Контрольні запитання до лекції № 3	28
ЛЕКЦІЯ № 4. ПУСК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ	29
4.1. Основні вимоги та способи пуску АД	29
4.2. Запуск асинхронних двигунів з короткозамкненим (к.з.) ротором	29
4.2.1. Пряме вмикання двигунів у мережу	29

4.2.2. Пуск при зниженій напрузі	31
4.3. Запуск асинхронних двигунів з фазним ротором.	31
Контрольні запитання до лекції № 4	33
ЛЕКЦІЯ № 5. ОДНОФАЗНІ АД ТА ЇХ РІЗНОВИДИ	34
5.1. Однофазні асинхронні двигуни	34
5.2. Різновиди однофазних АД	36
5.3. Робота трифазного АД від однофазної мережі	39
Контрольні запитання до лекції № 5	40
ЛЕКЦІЯ № 6. СИНХРОННІ МАШИНИ	41
6.1. Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин	41
6.2. Будова і принцип дії машин постійного струму	43
6.3. Синхронні генератори	46
Контрольні запитання до лекції № 6	47
ЛЕКЦІЯ № 7. ГЕНЕРАТОРИ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ТА САМОЗБУДЖЕННЯМ. ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	48
7.1. Класифікація генераторів за способом збудження	48
7.2. Принцип дії двигуна постійного струму	51
7.3. Електромагнітний момент машини постійного струму	52
Контрольні запитання до лекції № 7	54
ЛЕКЦІЯ № 8. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ	55
8.1. Будова та принцип дії трифазного трансформатора	55
8.2. З'єднання обмоток трифазних трансформаторів	56
8.3. Групи з'єднань обмоток трансформатора	57
8.4. Автотрансформатори	59
Контрольні запитання до лекції № 8	60
ЛІТЕРАТУРА	61

ВСТУП

Конспект лекцій з навчальної дисципліни «Електричні машини» складений відповідно до освітньо-професійної програми підготовки магістрів за спеціальностями 014 Середня освіта (Фізика), 104 Фізика та астрономія, 105 Прикладна фізика та наноматеріали. У курсі розглядаються фізичні явища та процесів, які лежать в основі роботи електричних машин, особливості їх роботи в різних режимах, процеси генерування та перетворення електричної енергії (генератори, двигуни, трансформатори).

Предметом дисципліни «Електричні машини» є вивчення особливостей роботи електричних машин та трансформаторів.

Метою даної дисципліни є формування теоретичних знань та практичних навичок у галузі електричних машин та трансформаторів, їх електричних та механічних властивостей, енергетичних і теплових процесів, що мають місце при їх роботі.

Основним завданням вивчення дисципліни «Електричні машини» є надання студентам поняття спільності дії електричних машин усіх типів, встановлення взаємозв'язку характеристик електричних машин та навчити студентів методам експериментальних досліджень машин.

Згідно з вимогами освітньо-професійної програми студенти повинні:

знати:

- принципи генерації, передавання, розподілу й використання електричної енергії; первинні джерела електричної енергії;
- основні характеристики кіл змінного струму; трифазні кола;
- принципи дії електровимірювальних приладів
- принцип дії та будову трансформатора;
- основи роботи машин змінного струму (асинхронна машина, синхронний генератор, колекторна машина);
- принцип дії машин постійного струму.

вміти:

- користуватися символічним методом та законами Ома та Кірхгофа, здійснювати вимірювання струмів, напруг, потужностей у трифазних колах;
- користуватися електровимірювальними приладами, знаходити зведену, абсолютну та відносні похибки;
- проводити вимірювання для визначення характеристик трансформаторів;
- вмикати машини змінного струму(асинхронний двигун, синхронний генератор; машини постійного струму;
- використовувати машини постійного струму для сервісних цілей та у ШФЕ.

Лекція № 1.

ЗАГАЛЬНІ ПИТАННЯ ТЕОРІЇ І БУДОВИ ЕЛЕКТРИЧНИХ МАШИН

1.1. Історія розвитку електричних машин

Електричні машини є електромеханічними перетворювачами, в яких механічна енергія перетворюється в електричну або, навпаки, електрична в механічну. Ті електричні машини, в яких відбувається перетворення механічної енергії в електричну, називаються електричними генераторами, а машини, в яких відбувається зворотнє перетворення, називаються електричними двигунами.

Початок історії розвитку електричних машин, а з нею і початок використання їх на транспорті відноситься до 1834 р, коли 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 інженери працювали над вдосконаленням машин постійного струму, які до кінця 80-х років минулого століття прийняли сучасний вигляд. У 1883-1889 рр. 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. 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 застосовуються одні, й ті ж самі матеріали.

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

Існує велика різноманітність електричних машин. Вони розрізняються за принципом дії, потужності, частоті обертання. Габаритні розміри машин коливаються в широких межах – від кількох міліметрів до 16 м. В даний час

переважне поширення мають мережі змінного струму, тому в промисловості знаходять застосування головним чином машини змінного струму. Разом з тим широко використовуються і машини постійного струму, незважаючи на те що вартість їх вище, ніж машин змінного струму. Це пояснюється тим, що вони мають кращі експлуатаційні характеристики щодо регулювання частоти обертання, пуску, зміни напрямку обертання і допускають більш високі перевантаження в порівнянні з машинами змінного струму.

Широке застосування машин постійного струму вимагає великої різноманітності їх номінальних даних (потужності, частоти обертання, напруги) і різних конструктивних виконань відповідно до умов їх установки та експлуатації.

Машини постійного струму виготовляються на потужності від часток вата до 12000 кВт. Номінальна напруга їх зазвичай не перевищує 1500 В і тільки іноді для потужних машин доходить до 3000 В. Частота обертання машин коливається в широких межах – від декількох оборотів в хвилину до декількох тисяч.

Найбільш широке застосування знайшли машини постійного струму з механічним комутатором – колектором. Колектор ускладнює умови роботи машини, але досвід експлуатації в найважчих умовах роботи показав, що правильно спроектована і якісно виготовлена машина постійного струму є не менш надійною, ніж більш прості за конструкцією машини змінного струму.

1.2. 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 *електромашинними підсилювачами*. Для перетворення 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.

Номинальний 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.

1.3. Матеріали, які 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 однакову магнітопровідність в напрямку і поперек прокату, або анізотропною, у якій намагнічувана провідність різко відрізняється у вказаних напрямках.

Струмопровідні 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°C 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/м³. Істотно більший (практично в 1,6 рази) питомий опір алюмінію і гірші механічні властивості перешкоджають його широкому використанню в електричних машинах.

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 високоефективну машину з довгим терміном служби.

1.4. Будова та режими роботи електричної машини

Обертові електричні машини незалежно від їхнього виконання мають деякі однотипні елементи конструкції. Кожна обертова машина має дві основні частини: обертовий ротор 1 і нерухомий статор 2 (рис. 1.1). У більшості випадків ротор розташовується усередині статора. Між ними завжди є повітряний зазор 3. Ротор кріпиться на валу 4, який спирається на підшипники 5. Один кінець вала подовжений для сполучення з іншими робочими механізмами. Підшипники зазвичай розташовуються в підшипникових щитах 6, прикріплених болтами до корпусу (станіні) 7. Статор також кріпиться до корпусу.

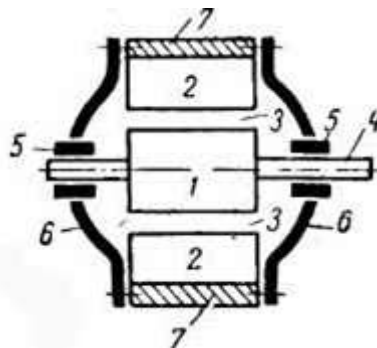


Рис. 1.1. Будова електричних машин:

1 – ротор; 2 – статор; 3 – повітряний зазор; 4 – вал; 5 – підшипники; 6 – підшипникові щити; 7 – корпус.

Режим роботи електричної машини може бути *тривалим, короткочасним і повторно-короткочасним*. Машини тривалого режиму

роботи призначаються для безперервної експлуатації протягом тривалого періоду часу. Передбачається, що машина працює настільки довго, що перевищення її температури досягає сталого значення. При цьому перевищення температури окремих її частин над температурою навколишнього повітря не повинне перевершувати значень, що допускаються стандартом.

Машини *короткочасного режиму* призначаються для роботи протягом нетривалого часу, за який температура окремих частин машин не повинна виходити за межі, встановлені стандартом, після чого вони повинні відключатися або працювати вхолосту. Робочий процес передбачається настільки коротким, що температура машини не досягає усталеного значення, а неробочий період - настільки тривалим, що машина повністю остигає. Стандартом встановлені короткочасні режими з тривалістю робочого періоду 15, 30, 60 і 90 хв.

Машини *повторно-короткочасного режиму* призначаються для роботи з частими пусками. При цьому робочий цикл, що складається з часу, протягом якого машина працює, і паузи, передбачається настільки нетривалим, що за час роботи машина не встигає нагрітися до усталеної температури, а за час зупинки - не встигає охолонути.

Повторно-короткочасний режими роботи характеризуються різною тривалістю включення. Встановлені стандартом тривалості робочого періоду по відношенню до повного періоду циклу складають 15, 25, 40 і 60 %. Вважають, що під час паузи машина знаходиться в спокої і що тривалість одного циклу не перевищує 10 хв.

1.5. Втрати потужності в електричних машинах

Класифікація втрат. При роботі електричної машини в її активних матеріалах виникають втрати енергії. До них відносяться магнітні втрати в сталі магнітопровода і електричні втрати в провідниках обмоток. При обертанні машини виникають механічні втрати, викликані тертям. Крім того, мають місце додаткові втрати в обмотках і в сталі магнітопровода.

Магнітні втрати ($\mathcal{E}_{i\alpha}$). Явище електромагнітної індукції пов'язане із зміною магнітного потоку, внаслідок чого на ділянках магнітопроводу виникають втрати на перемагнічування і вихрові струми. Втрати на перемагнічування залежать від характеру перемагнічування, яке може бути обертальним (виникає при обертанні сталевого магнітопроводу в магнітному полі), циклічним (вироблене змінним струмом) і статичним (при повільному зміні струму, який намагнічує в певних межах). Втрати на вихрові струми в листах сталі залежать від властивостей матеріалу і товщини листів. Для зниження цих втрат зменшують товщину листів і ізолюють їх один від одного.

Електричні втрати (P_e). При проходженні струму по провідниках виникають втрати енергії. В машинах мають місце наступні види

електричних втрат:

1) втрати в провідниках обмотки якоря

$$P_a = mI_a^2 r_a,$$

де I_a – діюче значення струму в обмотці, r_a – активний опір обмотки якоря, визначений з врахуванням нагріву; m – число фаз (для машини постійного струму $m=1$).

2) втрати в обмотці збудження

$$P_{\dot{a}} = I_{\dot{a}}^2 r_{\dot{a}},$$

де $I_{\dot{a}}$ – струм обмотки збудження, $r_{\dot{a}}$ – опір обмотки збудження, визначений з врахуванням нагрівання.

3) втрати в щіткових контактах

$$D_{\dot{u}} = 2\Delta U_{\dot{u}} I_{\dot{u}},$$

де $\Delta U_{\dot{u}}$ – спад напруги в щітковому контакті ($\Delta U_{\dot{u}} = 0,2-1$ В); $I_{\dot{u}}$ – струм в щітках.

Загальні електричні втрати дорівнюють сумі

$$D_{\dot{a}} = D_a + D_{\dot{a}} + D_{\dot{u}}$$

Активний опір обмоток мікромашин є відносно великим, тому електричні втрати в мікромашинах мають відносно більшу величину, ніж в інших електричних машинах.

Механічні втрати ($D_{\dot{a}\dot{o}}$). Механічні втрати $D_{\dot{a}\dot{o}}$ складаються з втрат на тертя в підшипниках і на тертя в ковзних контактах між щітками і колектором або контактними кільцями, а також з втрат на вентиляцію. Втрати на тертя залежать від матеріалу тертьових деталей, механічного тиску на поверхню тертя, стану цієї поверхні і швидкості обертання валу машини. Втрати в ковзних контактах залежать від сорту щіток і тиску на щітки.

Додаткові втрати ($P_{\dot{o}}$). Додаткові втрати $P_{\dot{o}}$ виникають внаслідок нерівномірного розподілу струму по перерізі міді в обмотках і потоку в магнітопроводі. Крім того, додаткові втрати виникають в поверхневих шарах магнітопроводу при різних пульсаціях потоку які можуть бути викликані зубчастістю ротора або статора. Додаткові втрати виникають також у стяжних болтах, гайках, скобах та інших деталях і конструктивних елементах машини, по яких можуть замикатися які-небудь пульсуючі потоки. У короткозамкнутих роторах асинхронних двигунів виникають додаткові втрати внаслідок розтікання струмів між неізолюваними стрижнями клітки ротора по листам сталевому пакета магнітопроводу.

Отже, загальні втрати потужності дорівнюють:

$$D_{\zeta} = D_{\dot{a}\dot{o}} + D_a + D_{\dot{a}\dot{o}} + D_{\dot{u}}.$$

Коефіцієнтом корисної дії називається відношення корисної, вторинної потужності P_2 до підведеної, первинної потужності P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}.$$

У випадку генераторного режиму P_1 – механічна потужність

первинного двигуна, P_2 – електрична потужність, що віддається генератором в мережу. У разі режиму двигуна P_1 – електрична потужність, яка споживається з мережі, P_2 – механічна потужність на валу двигуна.

Якщо відома сумарна потужність всіх втрат, то ККД може бути записаний так:

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \sum P_\zeta} = \frac{D_1 - D_\zeta}{D_1} = 1 - \frac{D_\zeta}{D_1}.$$

Контрольні запитання до лекції № 1

1. Що називають електричними машинами?
2. Хто і коли розробив перший у світі електродвигун постійного струму?
3. Який фізичний закон лежить в основі роботи електричних двигунів?
4. Як класифікують електричні машини згідно діапазону потужностей?
5. Як класифікують електричні машини за принципом їх дії?
6. Назвіть матеріали, які застосовуються в електромашинобудуванні.
7. Зобразіть будову електричної машини та вкажіть її основні структурні одиниці.
8. Вкажіть основні режим роботи електричної машини та дайте кожному режиму відповідну характеристику.
9. Назвіть основні види втрат потужності в електричних машинах.
10. Як знайти ККД електричної машини?

Лекція № 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ

2.1. Принцип роботи електричних машин

Електричні машини поділяються на *машини змінного й постійного струму*. Машини змінного струму поділяють на *синхронні, асинхронні, колекторні*. Найбільше застосування мають синхронні генератори змінного трифазного струму й трифазні асинхронні електродвигуни. Колекторні електродвигуни змінного струму мають обмежене застосування внаслідок складності будови, обслуговування й більш високої вартості. Основною їхньою перевагою є можливість регулювання швидкості обертання в широких межах, що важко досягти в асинхронних двигунах. Електричні машини постійного струму являють собою комбінацію машин змінного струму з механічним випрямлячем – колектором, що є невід’ємною частиною цих машин. За допомогою колектора змінний струм перетвориться в постійний.

Вивчення електричних машин ґрунтується на знаннях фізичної суті електричних і магнітних явищ – перш за все законі електромагнітної індукції. В процесі роботи електричної машини в режимі генератора здійснюється перетворення механічної енергії в електричну. Природа цього явища пояснюється законом електромагнітної індукції: *якщо зовнішньою силою F діяти на помещений в магнітне поле провідник і переміщувати його (рис. 2.1а), наприклад, зліва направо перпендикулярно вектору індукції B магнітного поля зі швидкістю v , то у провіднику буде наводитися електрорушійна сила ЕРС:*

$$E = Blv,$$

де B – магнітна індукція, Тл; l – активна довжина провідника, тобто довжина його частини, яка знаходиться в магнітному полі, м; v – швидкість руху провідника, м/с.

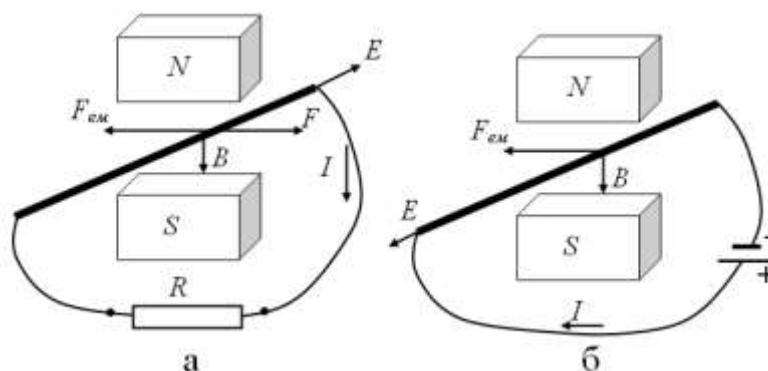


Рис. 2.1. Поняття про «елементарний генератор» (а) та «елементарний двигун» (б)

Для визначення напрямку ЕРС слід скористуватися правилом «правої руки» (рис. 2.1а): *якщо розташувати праву долоню так, щоб відставлений великий палець збігався з напрямом руху провідника, а силові лінії магнітного поля входили в долоню, то напрям індукційного струму в провіднику збіжиться з напрямом витягнутих пальців*. Застосувавши це правило,

визначимо напрямок ЕРС в провіднику (від нас). Якщо кінці провідника замкнені на зовнішній опір R (споживач), то під дією ЕРС в провіднику виникає струм такого ж напрямку.

Таким чином, провідник у магнітному полі можна розглядати в цьому випадку як елементарний генератор. У результаті взаємодії струму I з магнітним полем виникає діюча на провідник електромагнітна сила:

$$F_{\dot{a}i} = BIl.$$

Напрямок сили $F_{\dot{a}i}$ можна визначити за правилом «лівої руки» (рис. 2.1б): якщо ліву руку розташувати так, щоб магнітні силові лінії входили в долоню, а витягнуті пальці долоні спрямувати в напрямі струму через провідник, то відігнутий великий палець укаже напрям сили, яка діє на провідник у магнітному полі. З рис. 2.1а бачимо, що у розглянутому елементарному генераторі сила $F_{\dot{a}i}$ є гальмівною по відношенню до рухомої сили F .

При рівномірному русі провідника $F = F_{\dot{a}i}$. Помноживши обидві частини на швидкість руху провідника, отримаємо:

$$Fv = F_{\dot{a}i} v,$$

$$Fv = BIlv = EI.$$

Ліва частина рівняння визначає значення механічної потужності, яка витрачається на переміщення провідника в магнітному полі; права частина – значення електричної потужності, яка розвивається в замкненому контурі електричним струмом I . Знак рівності між цими частинами показує, що в генераторі механічна потужність, яка витрачається зовнішньою силою перетворюється в електричну.

Якщо зовнішню силу F до провідника не прикладати, а від джерела електроенергії підвести до нього напругу U , так щоб струм I в провіднику мав напрямок, вказаний на рис. 2.1б, то на провідник буде діяти лише електромагнітна сила $F_{\dot{a}i}$. Під дією цієї сили провідник починає рухатися в магнітному полі. При цьому ми можемо записати:

$$U = E + IR,$$

де E – ЕРС, що індуктується в провіднику, R – електричний опір провідника.

Помножимо обидві частини останнього рівняння на струм I і підставимо значення ЕРС:

$$UI = BlvI + I^2 R$$

або

$$UI = F_{\dot{a}i} v + I^2 R.$$

З цього рівняння випливає, що електрична потужність (UI), яка надходить в провідник, частково перетворюється в механічну енергію, а частково витрачається на покриття електричних втрат в провіднику. Отже, провідник зі струмом, поміщений в магнітному полі, можна розглядати як елементарний електродвигун.

2.2. Виникнення обертового магнітного поля

Однією з основних причин великого поширення трифазної системи є можливість одержання за її допомогою обертового магнітного поля, яке й було використане М. О. Доліво-Добровольським для утворення дуже простого за своєю будовою електродвигуна – так званого асинхронного двигуна.

Якщо взяти три прямокутні рамки, обмотані однаковим числом витків дроту, i , розмістивши їх так, щоб їх площини утворювали між собою кути по 120° (рис. 2.2), приєднати утворені котушки до затискачів трифазної сітки, з'єднавши зіркою або трикутником, то магнітне поле у спільному центрі O котушки буде складатися з трьох магнітних полів, створюваних кожною котушкою зокрема. Позитивні напрями цих полів утворюють між собою в просторі кути по 120° .

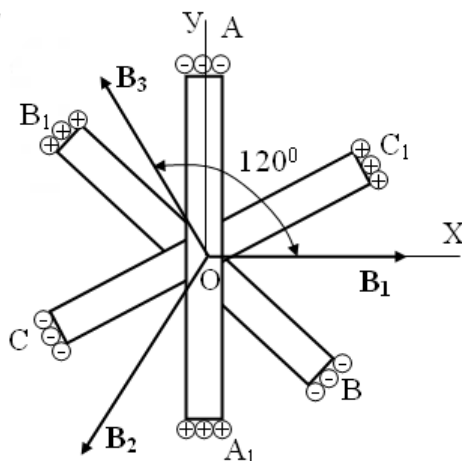


Рис. 2.2. Утворення обертового магнітного поля

Якби рівні за амплітудою змінні струми в котушках збігалися між собою по фазі, ми мали б три пульсуючі поля, сума яких у спільному центрі котушок дорівнювала б нулю. Але через те, що при трифазному струмі пульсуючі поля окремих котушок не тільки мають різні напрями у просторі, але й зміщені між собою по фазі, то сумарне поле у центрі котушок не дорівнює нулю. Наприклад, на момент позитивного максимуму струму у фазі A , коли поле B_1 цієї фази позитивне і також проходить через максимум, струми і поля у фазах B і C негативні, а за величиною дорівнюють половині амплітуди. Пропорційні струмам пульсуючі поля кожної фази можна виразити формулами:

$$B_1 = B_i \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$B_2 = B_i \sin(\omega t - 120^\circ) \quad (2.2)$$

$$B_3 = B_i \sin(\omega t + 120^\circ), \quad (2.3)$$

де B_i – однакова для всіх фаз амплітуда пульсуючого поля. Щоб визначити величину і напрям сумарного поля, спроектуємо всі три поля на осі прямокутної системи координат, вісь абсцис якої збігається з позитивним

напрямом поля B_1 .

Горизонтальна проекція сумарного поля

$$B_x = B_{1x} + B_{2x} + B_{3x} = B_1 - B_2 \cos 60^\circ - B_3 \cos 60^\circ = B_1 - \frac{1}{2}(B_2 + B_3),$$

а його вертикальна проекція

$$B_y = B_{3y} + B_{2y} = B_3 \sin 60^\circ - B_2 \sin 60^\circ = \frac{\sqrt{3}}{2}(B_3 - B_2).$$

Але згідно з формулами (2.1–2.3)

$$B_2 + B_3 = B_i (\sin(\omega t + 120^\circ) + \sin(\omega t - 120^\circ)) = B_i \cdot 2 \sin \omega t \cos 120^\circ =$$

$$= B_i \cdot 2 \sin \omega t \left(-\frac{1}{2}\right) = -B_i \sin \omega t$$

i

$$B_3 - B_2 = B_i (\sin(\omega t + 120^\circ) - \sin(\omega t - 120^\circ)) = B_i \cdot 2 \cos \omega t \sin 120^\circ =$$

$$= B_i \cdot 2 \cos \omega t \cdot \frac{\sqrt{3}}{2} = B_i \sqrt{3} \cos \omega t.$$

Отже

$$B_x = B_i \sin \omega t + \frac{B_i}{2} \sin \omega t = \frac{3}{2} B_i \sin \omega t$$

$$B_y = \frac{\sqrt{3}}{2} B_i \sqrt{3} \cos \omega t = \frac{3}{2} B_i \cos \omega t.$$

Знаходимо величину вектора сумарного поля

$$B = \sqrt{B_x^2 + B_y^2} = \frac{3}{2} B_i \sqrt{\sin^2 \omega t + \cos^2 \omega t}$$

або

$$B = \frac{3}{2} B_i,$$

яка буде незалежною від часу. При $t=0$ горизонтальна проекція вектора \vec{B} дорівнює нулеві і вектор займає вертикальне положення (в площині котушки A). Із збільшенням t вертикальна проекція вектора зменшується, а горизонтальна зростає, так що вектор \vec{B} відхиляється від вертикалі вправо (за годинниковою стрілкою), тобто в напрямі від позитивної сторони фази A до позитивної сторони фази B . За один період таке поле зробить один повний оберт, а за хвилину $n=60f$ обертів. Таке поле і називається обертовим магнітним полем.

У довільний момент t вектор \vec{B} утворює з своїм початковим положенням кут α , який визначається з умови:

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{B_x}{B_y} = \frac{\sin \omega t}{\cos \omega t} = \operatorname{tg} \omega t.$$

Звідси

$$\alpha = \omega t,$$

тобто вектор \vec{B} обертається з постійною кутовою швидкістю ω в напрямі від фази A до фази B і потім до фази C .

Якщо струми у фазах трифазного двигуна не дорівнюють за амплітудою або зсунуті по фазі не на 120° , то в двигуні теж виникає обертове поле, проте воно обертається у цьому випадку із змінною кутовою швидкістю і його амплітуда періодично змінює свою величину.

Розглянемо графічно механізм виникнення обертового магнітного поля. Залежності струмів в котушках від часу зображені на рис. 2.3. Виберемо чотири моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4 через $1/6$ частину періоду.

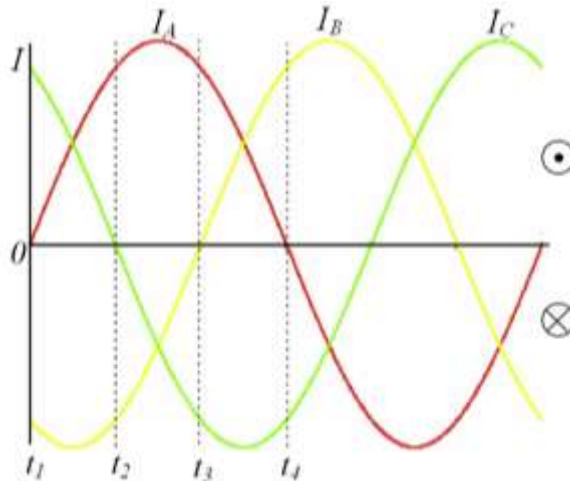


Рис. 2.3. Струми у фазних обмотках статора

Для кожного з цих моментів послідовно опишемо напрямки результуючого магнітного поля (рис. 2.4). Початки обмоток позначені буквами А, В і С, а кінці – Х, Y і Z відповідно. Струм на початку обмотки будемо вважати спрямованим до нас (позначається крапкою), якщо його значення позитивне. Хрестиком позначено напрямок від нас.

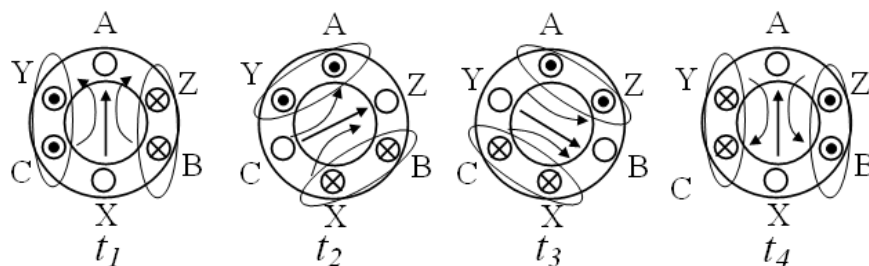


Рис. 2.4. Напрямки магнітного поля в моменти часу t_1, t_2, t_3, t_4

У момент часу t_1 обмотка А-Х потоку не створює ($I_A=0$). На початку обмотки В струм направлений від нас ($I_B<0$), а в кінці цієї обмотки Y – до нас. На початку обмотки С струм направлений до нас ($I_C>0$), а в кінці цієї обмотки Z – від нас. Таким чином, в двох розташованих поруч провідниках С і Y, перпендикулярних до площини малюнку, струми в момент t_1 спрямовані в одну сторону і створюють магнітне поле, спрямоване за правилом свердлика проти годинникової стрілки, а струми в провідниках В і Z створюють магнітне поле, спрямоване за годинниковою стрілкою. Обидва магнітних поля в центрі мають однаковий напрямок (вгору) і складаються. Напрямок сумарного магнітного поля показано на рис. 2.4 стрілкою.

Визначаючи аналогічним чином напрямок сумарного магнітного поля в моменти часу t_2 , t_3 і t_4 , ми побачимо, що напрямок магнітного поля за половину періоду зміниться на 180° . Легко переконатися, що за період напрямок сумарного магнітного поля зробить один оборот і, отже, швидкість обертання магнітного поля в даному випадку буде дорівнює частоті змінного струму.

Цей спосіб створення обертового магнітного поля покладено в основу пристрою трифазних асинхронних двигунів. Якщо поміняти дві будь-які фази місцями (при цьому зміниться послідовність струмів), то сумарний вектор магнітної індукції \vec{B} обертатиметься проти годинникової стрілки. Зміною послідовності фаз користуються для зміни напрямку обертання ротора трифазного асинхронного двигуна, тобто для реверсування.

2.3. Будова та принцип роботи асинхронної машини

Трифазні асинхронні машини були розроблені у 1888 р. М.О. Доливо-Добровольським. *Асинхронна машина* – це машина змінного струму, в котрій збуджується обертове магнітне поле, при цьому ротор і магнітне поле обертаються з різними швидкостями, тобто асинхронно.

Асинхронні машини принципово можуть бути генераторами або двигунами. Характеристики асинхронних двигунів (АД) дуже добрі, і вони широко застосовуються в техніці. Асинхронні генератори практично не використовуються, тому що мають дуже низькі експлуатаційні якості.

Основними конструктивними елементами АД є *нерухомий статор і обертовий ротор*. Статор складається із станини, що є одночасно корпусом двигуна, і закріплених у ній магнітопроводу і обмотки. Ротор АД складається з пакета магнітопроводу і обмотки. Залежно від типу обмотки ротор АД може бути короткозамкненим або фазним. У пази короткозамкнених роторів вкладені мідні стрижні, що з'єднуються з торців короткозамкненими кільцями; така обмотка має вигляд клітки (рис. 2.5а).

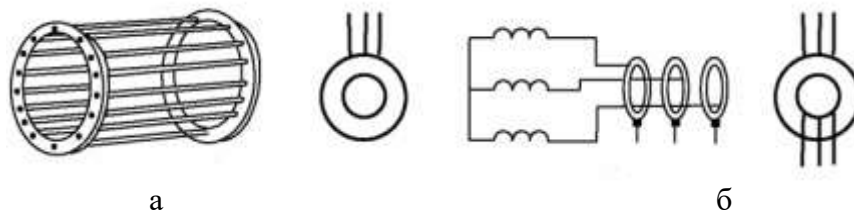


Рис. 2.5. Обмотки ротора АД: а – короткозамкнена; б – з фазним ротором

У пази фазного ротора укладають провідники секцій трифазної обмотки, що з'єднуються в «зірку» (рис. 2.5б). Вільні виводи фаз обмотки ротора приєднують до трьох ізольованих одне від одного контактних кілець. На кільця накладені закріплені в щіткотримачах щітки, за допомогою яких обмотки ротора з'єднуються з регулювальним або пусковим реостатом. Умовне графічне позначення асинхронного двигуна з фазним ротором

наведене на рис. 2.5б.

Принцип роботи асинхронної машини заснований на використанні обертового магнітного поля. Нерухома обмотка статора асинхронного двигуна, сполучена з мережею напруги, створює обертаючий магнітний потік, який перетинає обмотки ротора і наводить у них ЕРС, що створює струми ротора. Взаємодія струмів ротора з магнітним потоком машини створює момент, що обертає ротор. Якщо швидкості обертання ротора і поля статора однакові, то магнітний потік нерухомий відносно обмотки ротора і не наводить у ній струмів, унаслідок чого не виникає обертаючого моменту. Тому ротор і поле статора завжди обертаються асинхронно, тобто з різною швидкістю.

Станина виготовляється з чавуну, сталі або алюмінію. Осердя статора набирається з тонких пластин спеціальної електротехнічної сталі, які ізолюються одна від одної (щоб запобігти втратам енергії). На внутрішній стороні осердя є канавки, в які закладаються провідники статорної обмотки. Статорна обмотка виготовляється із мідного дроту або мідної шини і складається із трьох частин, які називаються фазами статорної обмотки. Передбачається можливість вмикання фаз цієї обмотки за схемою «зірка» (рис. 2.6а) або «трикутник» (рис. 2.6б) залежно від напруги в електричній мережі. Початки фаз позначаються C_1, C_2, C_3 , а їх кінці – C_4, C_5, C_6 .

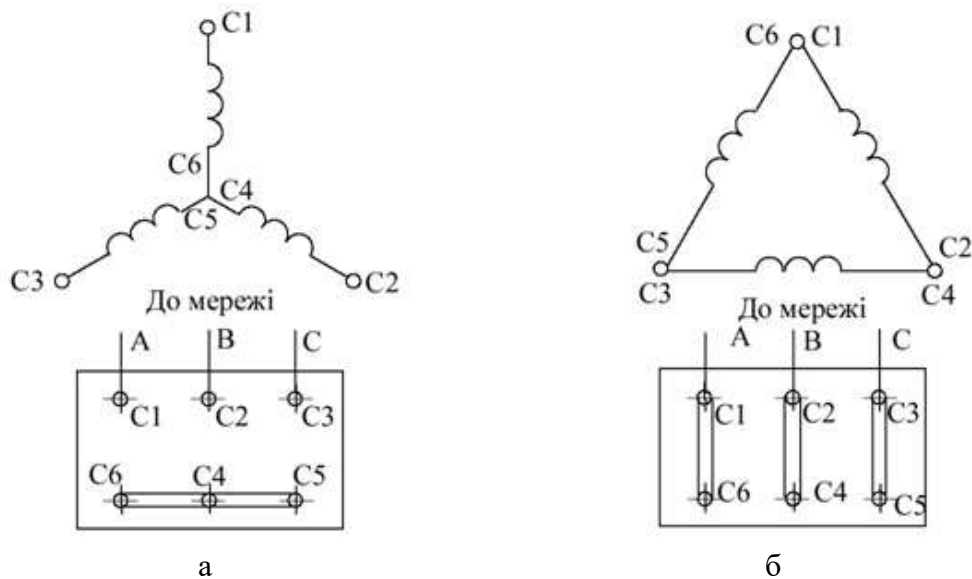


Рис. 2.6. Вмикання фаз АД за схемою «зірка» (а) та «трикутник» (б)

Обмотки двигунів малої та середньої потужності виготовляються на напруги 380/220 і 220/137 В. Напруга в знаменнику відповідає номінальній напрузі фази двигуна. Тому при лінійній напрузі мережі 380 В, двигун напругою 380/220 В сполучаємо зіркою ($U_l = U_\phi \sqrt{3}$), при лінійній напрузі мережі 220 В – трикутником ($U_l = U_\phi$). Аналогічно для двигуна напругою 220/137 В: при лінійній напрузі 220 В обмотку двигуна сполучаємо зіркою, а при лінійній напрузі 137 В – трикутником.

2.4. Основні параметри та характеристики трифазного асинхронного електродвигуна

До основних параметрів трифазного асинхронного двигуна відносяться: ковзання, частота ЕРС і струму в обмотці ротора, ЕРС статора і ротора, електромагнітний момент.

При підключенні до статора двигуна трифазного струму всередині машини виникає трифазне обертаюче поле статора n_1 . Швидкість обертання магнітного поля статора n_1 визначається за формулою:

$$n_1 = \frac{60f_1}{p},$$

f_1 – частота мережі, що живить статор; p – число пар полюсів статора.

У робочому режимі швидкість обертання ротора асинхронного двигуна n_2 [об/хв] менша, ніж швидкість обертання магнітного поля статора n_1 , [об/хв]. Швидкість n_1 , обертання магнітного поля статора називають *синхронною швидкістю обертання*.

Ступінь відставання ротора від обертання магнітного поля статора характеризується ковзанням, яке позначається літерою S . Ковзання визначається за формулою

$$S = \frac{n_1 - n_2}{n_1}.$$

При номінальному навантаженні ковзання переважно невелике і становить 0,02-0,05, тобто частота обертання ротора близька до синхронної (до n_1). В загальному випадку величина ковзання двигуна знаходиться в межах $S=1$ при нерухомому роторі ($n_2=0$) і $S=0$ – при синхронній швидкості ($n_2=n_1$). Синхронна частота обертання може бути одержана, якщо ротор обертати за допомогою іншого двигуна. Якщо збільшити n_2 вище від синхронної, то електрична машина перейде в генераторний режим. Отже для генераторного режиму $n_2 > n_1$ і $S < 0$. Тобто, асинхронна машина, як і всі електричні машини, оборотна, тобто якщо: $n_2 > n_1$ – машина працює в режимі генератора; $n_2 = n_1$ – штучний режим ідеального неробочого ходу; $n_2 < n_1$ – машина працює в режимі двигуна. Якщо, гальмуючи ротор, зупинити його ($S=0$), і почати обертати сторонньою силою в протилежний обертання поля бік, то машина перейде в режим електромагнітного гальма. В цьому режимі $n_2 < 0$ (при $n_1 > 0$) та $S > 1$.

З останньої формули можна знайти швидкість обертання ротора при навантаженні:

$$n_2 = n_1(1 - S) = \frac{60f_1}{p}(1 - S).$$

Поле статора обертається відносно ротора зі швидкістю:

$$n = n_1 - n_2 = n_1 \frac{n_1 - n_2}{n_1} = n_1 S.$$

Відповідно до цієї швидкості в обмотці ротора наводиться ЕРС і струм,

частота яких називається частотою ковзання, може бути обчислена за формулою:

$$f_2 = \frac{pn}{60} = \frac{pn_1}{60} S = f_1 S.$$

Частота струму в роторі пропорційна ковзанню, тобто залежить від навантаження двигуна. При холостому ході, коли ковзання меле, частота струму в роторі біля 1 Гц. При пуску, коли ковзання рівне 1, частота струму в роторі буде рівною частоті струму в статорі:

$$f_2 = sf_1 = 1 \cdot 50 = 50 \text{ } \ddot{\text{A}}\ddot{\text{o}}.$$

Контрольні запитання до лекції № 2

1. Поясніть механізм виникнення обертового магнітного поля?
2. Як змінити напрям обертання магнітного поля?
3. Що таке асинхронна машина?
4. Поясніть принцип роботи асинхронної машини?
5. Зобразіть схематично вмикання статорної обмотки за схемою «зірка» та «трикутник»?
6. В чому полягає різниця між короткозамкненою і фазною роторною обмоткою?
7. Поясніть принцип дії асинхронної машини.
8. Запишіть формулу визначення швидкості обертання магнітного поля статора.
9. Що таке ковзання і за якою формулою його можна визначити?
10. Запишіть умови при яких асинхронна машина працює в режимі двигуна, генератора і електромагнітного гальма?

Лекція № 3.

ЕЛЕКТРОМАГНІТНІ ПРОЦЕСИ В АСИНХРОННІЙ МАШИНІ

3.1. ЕРС в обмотках статора і ротора. Струм ротора

Магнітний потік Φ обертового магнітного поля, який перетинає провідники обмоток статора та ротора, індукуює в них електрорушійні сили статора E_1 і ротора E_2 діюче значення яких визначається за формулами:

$$E_1 = 4,44k_1\omega_1f_1\hat{O}$$
$$E_2 = 4,44k_2\omega_2f_2\hat{O},$$

де ω_1 і ω_2 – кількість послідовно з'єднаних витків фаз обмоток статора і ротора; k_1 , k_2 – обмоткові коефіцієнти, які враховують конструктивні особливості обмоток статора і ротора відповідно.

Враховуючи, що $f_2 = f_1S$, останню формулу можна переписати так:

$$E_2 = 4,44k_2\omega_2Sf_1\hat{O}.$$

Якщо ротор буде обертатись з такою частотою, як обертове магнітне поле Φ , то $S=0$, і $E_2 = 0$. При нерухомому (загальмованому) роторі, коли $S=1$, ЕРС ротора:

$$E_{2i} = 4,44k_2f_1\omega_2\hat{O}.$$

З останніх двох формул можемо записати:

$$E_2 = SE_{2i}.$$

Величина

$$k = \frac{E_1}{E_{2i}} = \frac{\omega_1 k_1}{\omega_2 k_2}$$

називається коефіцієнтом трансформації. E_1 відрізняється від прикладеної напруги мережі U_1 лише на значення активного й індуктивного падіння напруги на статорній обмотці.

Струм нерухомого ротора I_2 дорівнює:

$$I_{2i} = \frac{E_{2i}}{\sqrt{R_2^2 + X_{2i}^2}},$$

де R_2 – активний опір обмотки нерухомого ротора; X_{2i} – індуктивний опір розсіювання нерухомого ротора.

Діюче значення струму обертового ротора визначається зі співвідношення

$$I_2 = \frac{E_2}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}} = \frac{SE_{2i}}{\sqrt{R_2^2 + X_2^2}},$$

де R_2 – активний опір обмотки нерухомого ротора, який дуже малий і практично не залежить від частоти; X_2 – індуктивний опір розсіювання обертового ротора, який значно залежить від частоти.

Між X_2 і X_{2i} існує наступний зв'язок:

$$X_2 = X_{2i}.$$

Тоді можемо записати:

$$I_2 = \frac{SE_{2i}}{\sqrt{R_2^2 + (SX_{2i})^2}} = \frac{E_{2i}}{\sqrt{\left(\frac{R_2}{S}\right)^2 + X_{2i}^2}}.$$

Струм у фазах обмотки ротора, який виникає під час пуску електродвигуна, коли ротор ще не рухається, а електрорушійна сила E_2 та індуктивний опір розсіювання ротора X_2 мають максимальну величину, називається *початковим струмом* і позначається символом I_{2n} .

У цей же час кут зсуву фаз φ_2 між струмом та електрорушійною силою E_2 дорівнює:

$$\varphi_2 = \arctg \frac{X_2}{R_2}.$$

Потужність двигуна обчислюється за формулою:

$$P = \sqrt{3}UI \cos\varphi \cdot \eta,$$

де U , I – лінійні напруга та струм; φ – кут між напругою та струмом; η – ККД двигуна.

В асинхронних двигунах з коротко замкнутим ротором є два суттєвих недоліки:

1. Велика кратність струму на початку пуску:

$$K_i = \frac{2_i}{2_i}$$

$K_i = 5 \div 8$. Це приводить до значної посадки напруги в мережі живлення, особливо при запуску двигунів великої потужності або одночасному запуску групи електродвигунів.

2. Двигун дуже різко набирає обороти при запуску, що небажано для приводу механізмів з великою інерційною масою.

Задача. Асинхронний двигун, який працює в мережі промислової частоти, має кількість пар полюсів $P=1$, ковзання $S=0,06$. Визначити швидкість обертання ротора двигуна.

Розв'язок.

$$\text{Синхронна швидкість: } n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{1} = 3000 \text{ об/хв.}$$

Швидкість обертання ротора двигуна при заданому ковзанні:

$$n_2 = n_1(1 - S) = (1 - 0,06) \cdot 3000 = 2820 \text{ об/хв.}$$

Задача. Трифазний асинхронний короткозамкнутий двигун має такі параметри: номінальна потужність $P_{\text{ном}}=20$ кВт, номінальна (лінійна) напруга $U_{\text{н}}=380$ В, коефіцієнт потужності двигуна $0,85$, $\cos\varphi=0,85$, кратність пускового струму $K=6$, швидкість обертання ротора $n_2=1440$ об/хв., кількість пар полюсів $p=2$.

а) Розрахувати номінальний та пусковий струми двигуна; б) визначити ковзання двигуна.

Розв'язок.

$$P_n = \sqrt{3}U_n I_n \cos \varphi \cdot \eta.$$

Звідси: $I_n = 38,3 \text{ A}$

б) Синхронна швидкість поля статора: $n_1 = \frac{60f_1}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв.}$

Тоді ковзання: $S = \frac{n_1 - n_2}{n_1} = 0,04$

3.2. Обортовий момент і механічна характеристика асинхронного двигуна

В асинхронних двигунах вся потужність від статора до ротора передається обортовим магнітним полем. Ця потужність називається електромагнітною потужністю P_{EM} . Вона створює обортовий момент M , який приводить ротор в обертання. Можна показати, що вираз для обортового моменту задається формулою:

$$M = C_M U_1^2 \frac{r_2 / S}{(r_2 / S)^2 + X_{2i}^2}, \quad (3.1)$$

де $\tilde{N}_i = \frac{m_2}{2\pi k^2 n_1}$. Тут m_2 – кількість фаз обмотки ротора, U_1 – спад напруги на обмотці статора, k – коефіцієнт трансформації, r_2 – резистивний опір фази ротора, X_{2i} – індуктивний опір нерухомого ротора, S – ковзання.

На рис. 3.1 наведена графічна залежність $M=f(S)$ згідно (3.1). Проаналізуємо вираз (3.1) і характеристику $M(S)$.

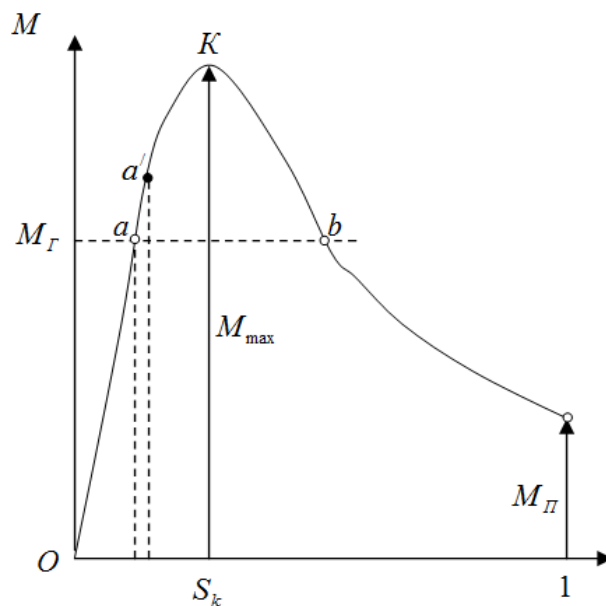


Рис. 3.1. Залежність обортового моменту від ковзання

Будь-який електричний двигун в ustalеному режимі працює за умови рівності обертового гальмівного (протидійного) моментів. Допустимо, що робочий механізм, який приводиться в обертання асинхронним двигуном має постійний гальмівний момент M_T . На рис. 3.1 є і точки a і b , для яких справедлива рівність $M=M_T$.

Точка a характеризує стійку роботу двигуна. Дійсно, якщо двигун змінить частоту обертання, наприклад, загальмується, зменшиться n_2 , а ковзання зросте – робота двигуна перейде з точки a в точку a' , що приведе до збільшення моменту двигуна. Внаслідок цього збільшиться n_2 і знову настане динамічна рівновага $M=M_T$. В точці b робота двигуна не може бути стійкою: випадкове відхилення частоти обертання призведе або до зупинки двигуна, або до переходу в точку a . Отже, вся висхідна частина характеристик (OK) є областю стійкої рівноваги двигуна, а вся нисхідна частина ($K-M_n$) областю нестійкої роботи. Дослідивши функцію $M=f(S)$ на екстремуми (прирівнявши до нуля похідну $\left(\frac{dM}{dS} = 0\right)$) знайдемо, що

$$S_{\text{ед}} = \frac{r_2}{X_{2i}}. \quad (3.2)$$

Підставивши (3.2) в (3.1), одержимо вираз для максимального моменту:

$$M_{\text{max}} = C_M U_1^2 \frac{1}{2X_{2i}}. \quad (3.3)$$

Висновки: 1) Як видно, величина M_{max} не залежить від резистивного опору кола ротора. 2) Обертовий момент пропорційний квадрату напруги, тому асинхронні двигуни дуже чутливі до пониження напруги мережі (при зменшенні напруги вдвічі обертовий момент зменшується в чотири рази).

Якщо уявити кілька однакових двигунів, але роторні обмотки виконані з різних провідникових матеріалів, наприклад, міді, алюмінію, латуні, то для всіх цих двигунів величина X_{2n} буде однакою (залежить лише від геометричних розмірів обмотки), але опір r_2 буде різним. Тоді, згідно з одержаними формулами для $S_{\text{ед}}$ і M_{max} хід кривих $M=f(S)$ матиме вигляд, як показано на рис. 3.2.

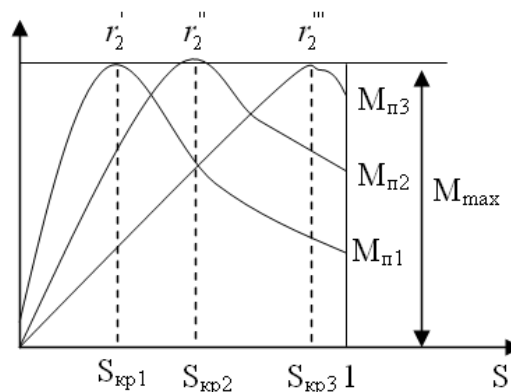


Рис. 3.2. Залежність максимального обертового моменту АД від ковзання для різних значень опору обмотки

Чим більше значення має опір r_2 , тим правіше знаходиться точка $S_{\partial\partial}$ і тим більшим є пусковий момент $r_2' < r_2'' < r_2'''$. При великих значеннях r_2 M_n великий (може зрівнятись з M_{max}), але при цьому механічна характеристика двигуна стає м'якою.

Під механічною характеристикою розуміють залежність швидкості обертання ротора від гальмівного моменту на валу $n_2=f(M_{\text{гальм}})$ (рис. 3.3). Механічна характеристика є жорстка і м'яка. Жорстка – означає, що швидкість обертання ротора при збільшенні $M_{\text{гальм}}$ спадає повільно, а м'яка – швидкість зменшується швидко. Жорсткість механічної характеристики і величину M_n момента можна довільно змінювати, якщо маємо двигун з фазною обмоткою на роторі. Підключаємо до цієї обмотки трифазний реостат і змінюючи його опір, можна одержати різні значення r_2 , отже і різні положення механічної характеристики.

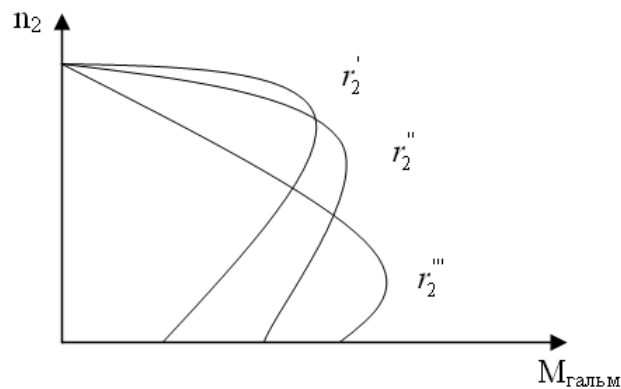


Рис. 3.3. Механічна характеристика АД

3.3. Робочі характеристики асинхронного двигуна

Робочими характеристиками асинхронного двигуна є:

- залежність ККД η від корисної потужності на валу P_2 ;
- залежність коефіцієнта потужності $\cos\phi$ від корисної потужності на валу P_2 ;
- залежність обертаючого моменту M від корисної потужності на валу P_2 ;
- залежність швидкості обертання вала ротора n_2 від корисної потужності на валу P_2 ;
- залежність ковзання s від корисної потужності на валу P_2 ;
- залежність струму I , споживаного двигуном, від корисної потужності на валу P_2 .

Ці характеристики зображені на рис. 3.4 та знімаються за природних умов, тобто двигун нерегульований, частота f_1 і напруга U_1 мережі залишаються постійними, а змінюється тільки навантаження на валу двигуна.

При збільшенні навантаження на валу двигуна ковзання зростає, причому при великих навантаженнях ковзання збільшується дещо швидше, ніж при малих.

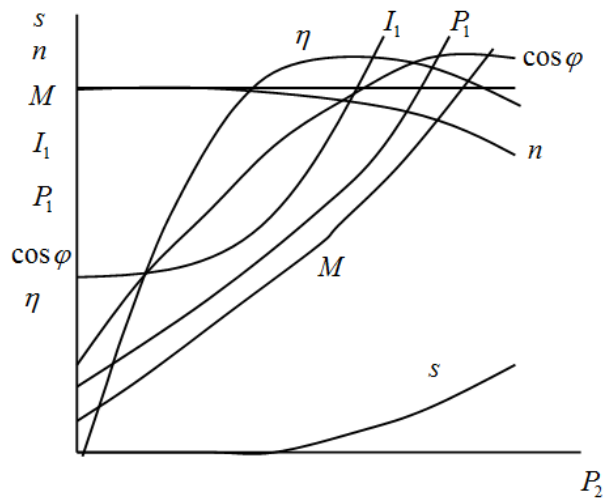


Рис. 3.4. Робочі характеристики АД

При холостому ході двигуна $n_2=n_1$ або $s=0$. При номінальному навантаженні ковзання зазвичай становить $s=3-5\%$.

Так як при збільшенні навантаження на валу двигуна ковзання зростає, то число оборотів буде зменшуватися. Однак зміна швидкості обертання при збільшенні навантаження від 0 до номінальної дуже незначне і не перевищує 5%. Тому швидкісна характеристика асинхронного двигуна є жорсткою – вона має дуже малий нахил до горизонтальної осі.

Обертаючий момент, що розвивається двигуном M , урівноважений гальмівним моментом на валу M_2 і моментом, що йде на подолання механічних втрат M_0 , тобто

$$M = M_2 + M_0 = \frac{P_2}{\Omega_2} + M_0 = \frac{P_2}{2\pi n_2 / 60} + M_0,$$

де P_2 – корисна потужність двигуна; Ω_2 – кутова швидкість ротора.

При холостому ході двигуна, обертаючий момент дорівнює M_0 ; зі збільшенням навантаження на валу цей момент також збільшується, причому за рахунок деякого зменшення швидкості ротора збільшення обертаючого моменту відбувається швидше, ніж збільшення корисної потужності на валу. Сила струму I_1 споживаного двигуном з мережі, нерівномірно змінюється зі збільшенням навантаження на валу двигуна. При холостому ході $\cos\varphi$ малий і струм має велику реактивну складову і дуже малу активну складову. При малих навантаженнях на валу двигуна активна складова струму статора менше реактивної складової, а тому зміна навантаження, тобто зміна активної складової струму, викликає незначну зміну сили струму I_1 (яка визначається в основному реактивною складовою). При великих навантаженнях активна складова струму статора стає більше реактивної і зміна навантаження викликає значну зміну сили струму I_1 .

Споживана двигуном потужність P_1 при графічному зображенні має вигляд майже прямої лінії, незначно відхиляється вгору при великих навантаженнях, що пояснюється збільшенням втрат в обмотках статора і ротора зі збільшенням навантаження.

Зміна коефіцієнта потужності при зміні навантаження на валу двигуна відбувається таким чином. При холостому ході $\cos\varphi$ малий (порядку 0,2), так як активна складова струму статора, обумовлена втратами потужності в машині, мала в порівнянні з реактивною складовою цього струму, що створює магнітний потік. При збільшенні навантаження на валу $\cos\varphi$ зростає (досягаючи найбільшого значення 0,8-0,9) в результаті збільшення активної складової струму статора. При дуже великих навантаженнях відбувається деяке зменшення $\cos\varphi$, так як внаслідок значного збільшення ковзання і частоти струму в роторі зростає реактивний опір обмотки ротора.

Крива ККД має такий самий вигляд, як у будь-якій машині або трансформаторі. При холостому ході ККД рівний нулю. Зі збільшенням навантаження на валу двигуна ККД різко збільшується, а потім зменшується. Найбільшого значення ККД досягає при такому навантаженні, коли втрати потужності в сталі і механічні втрати, які не залежать від навантаження, дорівнюють втратам потужності в обмотках статора і ротора, які залежать від навантаження.

Робочі характеристики дають змогу визначити решту величин, які визначають режим роботи двигуна при різних навантаженнях. Ці характеристики можна розрахувати аналітично, знаючи параметри двигуна й можна зняти експериментально, поступово навантажуючи двигун і вимірюючи при цьому всі необхідні величини.

Контрольні запитання до лекції № 3

1. Запишіть формули діючих значень електрорушійних сил статора E_1 і ротора E_2 , які виникають під дією обертового магнітного поля.
2. Що називається коефіцієнтом трансформації. Запишіть формулу для його визначення.
3. Запишіть формули визначення струму нерухомого та обертового ротора.
4. Який струм називається початковим у фазах обмотки ротора?
5. Запишіть формулу визначення кут зсуву фаз між струмом та електрорушійною силою в момент пуску електродвигуна.
6. Запишіть формулу визначення потужності двигуна.
7. Зобразіть графічно залежність обертового моменту двигуна від ковзання та проаналізуйте її.
8. Зобразіть графічно залежність максимального обертового моменту АД від ковзання для різних значень опору обмотки та проаналізуйте її.
9. Зобразіть графічно механічну характеристику АД. Яка характеристика називається м'якою, а яка жорсткою?
10. Зобразіть графічно залежність робочих характеристик АД та проаналізуйте її.

Лекція №4 ПУСК АСИНХРОННИХ ДВИГУНІВ

4.1. Основні вимоги та способи пуску АД

Пускові характеристики в АД не дуже добрі. Під час запуску під повною напругою виникають значні пускові струми в обмотці статора, що у кілька разів (4-7) перевищують номінальні. Це небезпечно й для двигуна, й для мережі. Пусковий момент двигуна малий, тому при пуску двигун потрібно розвантажити. Для цього штучно підвищують опір обмотки ротора, що приводить до збільшення пускового моменту та зменшення пускового струму.

Основні вимоги, що накладаються при пуску АД:

- процес пуску повинний здійснюватися без складних пускових пристроїв;
- пусковий момент повинен бути досить великим, а пускові струми – по можливості малими.

Іноді до цих вимог додають й інші, обумовлені особливостями конкретних приводів, у яких використовують двигуни.

Додаткові вимоги, обумовлені особливостями певних виробничих механізмів:

- необхідність плавного пуску,
- максимального пускового моменту й ін.

Використовують такі способи пуску:

- 1) безпосереднє підключення обмотки статора до мережі (прямий пуск);
- 2) пониженням напруги, яка підводиться до обмотки статора при пуску;
- 3) частотний пуск;
- 4) підключення до обмотки ротора пускового реостата (реостатний пуск).

Перші три способи пуску можуть бути використані як для АД з КР, так і АД з ФР. Четвертий спосіб пуску може бути реалізованим лише для АД з ФР.

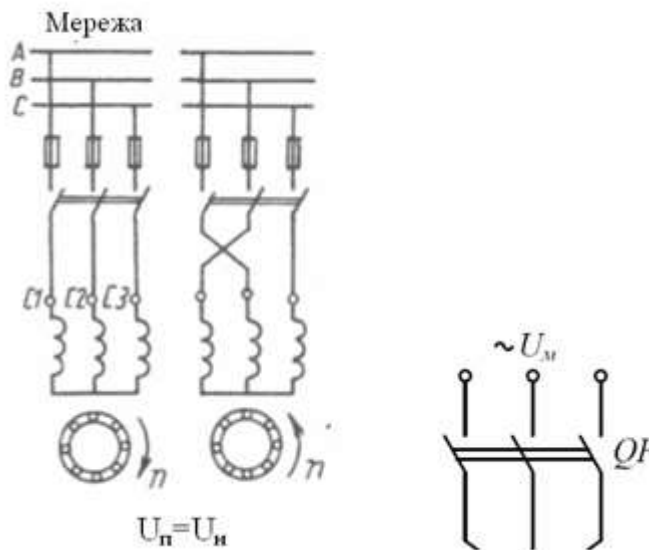
4.2. Запуск асинхронних двигунів з короткозамкненим (к.з.) ротором

4.2.1. Пряме вмикання двигунів у мережу.

При прямому пуску обмотку статора АД під'єднують безпосередньо до повної напруги мережі U_m (рівної номінальній напрузі двигуна) за допомогою автоматичного вимикача QF або магнітного пускача.

При пуску частота обертання ротора поступово збільшується, а його ковзання та ЕРС зменшується, в результаті чого знижуються струми в обмотках статора та ротора. Процес пуску закінчується при досягненні

частоти обертання і струмів усталених значень, що визначаються моментом статичного навантаження на валові ($M=M_{cm}$).



Відношення пускового моменту M_n до номінального $M_{ном}$ називають кратністю початкового пускового моменту.

$$k_v = \frac{\dot{I}_i}{I_i}$$

При прямому запуску к.з. асинхронних двигунів маємо значно завищені пускові струми при порівняно невеликих пускових моментах:

$$\frac{I_i}{I_i} = 4 \div 7; \quad \frac{\dot{I}_i}{I_i} = 0,8 \div 1,5.$$

Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно змінити послідовність приєднання обмоток статора до мережі (поміняти місцями будь-які дві фази, напр. **A** і **B**): початок обмотки C_1 з'єднати з лінійним провідником **B**, початок обмотки C_2 – з провідником **A**, а початок обмотки C_3 залишити приєднаним до провідника **C**.

Такий запуск, як правило, застосовують для двигунів невеликих потужностей. Для двигунів великої потужності надмірні пускові струми приводять до значного пониження напруги в мережі, що негативно впливає на освітлювальні лампи і на роботу інших асинхронних машин. Однак в потужних заводських мережах пряме вмикання к.з. асинхронних двигунів застосовують і для двигунів потужністю інколи в сотні кіловат. Нині асинхронні двигуни з к.з. ротором проектується з таким розрахунком, щоб вони витримували великі пускові струми. Тому прямий пуск завжди можливий при достатній потужності мережі. Напруга в мережі внаслідок пускових струмів не повинна падати більше ніж на 10-15 %.

Переваги прямого пуску:

- простота;
- низька вартість;
- високі енергетичні показники (η , $\cos \varphi$ та ін.).

Недоліки даного способу пуску:

- порівняно невеликий пусковий момент $M_n=(0,7\div 2,0)M_{ном}$;
- великий кидок пускового струму $I_n = (5\div 7)I_{ном}$.

У випадку виникнення великих спадів напруги в мережі (10%), викликаних при прямому пуску через невелику потужність мережі, – АД цим способом під'єднувати до мережі не можна.

4.2.2. Пуск при зниженій напрузі.

Є кілька способів реалізації такого пуску:

- переключення обмотки статора з робочої схеми «трикутник» Δ на пускову схему «зірка» Y . При цьому напруга, яка подається на фази обмотки статора, зменшується в 3 разів, що обумовлює зменшення фазних струмів у 3 разів і лінійних струмів у 3 рази. Після закінчення процесу пуску і розгону двигуна до номінальної частоти обертання обмотку статора переключають назад на робочу схему.

- включенням у коло обмотки статора на період пуску додаткових активних (резисторів) або реактивних (реакторів) опорів LR . При цьому на зазначених опорах створюються деякі спади напруги, пропорційні пусковому струму, внаслідок чого до обмотки статора подається знижена напруга. В міру розгону двигуна знижується ЕРС E_{2s} , індукована в обмотці ротора, а разом з нею і пусковий струм. У результаті зменшується спад напруги на зазначених опорах і автоматично зростає прикладена до двигуна напруга. Після закінчення розгону додаткові резистори або реактори замикаються накоротко контактором.

- підключення двигуна до мережі через понижуючий автотрансформатор $T1$, який може мати кілька ступіней, які переключаються в процесі пуску відповідною апаратурою;

- підключення двигуна до мережі через тиристорний регулятор напруги ТРН. Цей спосіб базується на попередньому, відмінність полягає в заміні автотрансформатора безконтактними керованими ключами, що дозволяють регулювати напругу, яка подається на статорну обмотку АД, від нульового значення до номінального шляхом зміни напруги управління U_u (напруги відкривання тиристорів).

Переваги пуску АД при зниженій напрузі:

- можливість зменшення пускового струму;
- плавність пуску;
- надійність установки;
- можливість здійснювати регулювання частоти обертання.

Недолік даного способу пуску: зменшення пускового та максимального моментів двигуна, які пропорційні квадратові прикладеної напруги. Тому їх можна використовувати тільки при пуску двигунів без навантаження.

4.3. Запуск асинхронних двигунів з фазним ротором

Пускові властивості асинхронного двигуна залежать від особливостей його конструкції, зокрема від будови ротора. Пуск асинхронного двигуна

супроводжується перехідним процесом машини, пов'язаним з переходом ротора зі стану спокою в стан рівномірного обертання, при якому момент двигуна врівноважує момент сил опору на валу машини.

При пуску асинхронного двигуна має місце підвищене споживання електричної енергії в мережі живлення, що витрачається не тільки на подолання прикладеного до вала гальмівного моменту і покриття втрат в самому асинхронному двигуні, але і на надання рухомим ланкам виробничого агрегату певної кінетичної енергії. Тому при пуску асинхронний двигун повинен розвинути підвищений обертаючий момент.

Запуск двигуна з фазним ротором здійснюється вмиканням обмотки статора в мережу з попередньо введеним в коло ротора пусковим реостатом R_n . У міру розгону двигуна опір R_n за допомогою повзунка реостата виводиться й після закінчення пуску R_n доводиться до нуля: обмотка ротора при цьому замкнена накоротко, як у двигунах з к.з. ротором. Введення додаткового опору в коло ротора на час пуску дає змогу збільшити пусковий момент аж до максимального значення M_{\max} і одночасно значно зменшити пусковий струм. Це є однією з головних причин застосування асинхронних двигунів з фазним ротором

$$M_{\text{ПУСК}} \cong M_{\max}; \quad \frac{I_{\text{ПУСК}}}{I_H} \leq 1,6 - 2,2$$

Пусковий реостат підбирається так, щоб: по-перше – пусковий момент був якомога ближчим до максимального, це скорочує процес пуску; по-друге, щоб пусковий струм не перевищував номінальний більше ніж у 1,6-2,2 рази; по-третє, щоб за 1-5 с реостат не перегрівся. В потужних двигунах пускові реостати мають олійне охолодження.

Розглянемо механічні характеристики двигуна під час запуску при виведенні ступенів пускового опору з кола ротора. На рис. 4.1 наведена схема триступеневого пускового реостата, який вмикається в коло ротора двигуна. Перед пуском двигуна контакти К1, К2 і К3 розімкнені – в фазу кола ротора введений повністю пусковий опір $R_i = r_{a1} + r_{a2} + r_{a3}$, котрому відповідає характеристика 1.

Після ввімкнення обмотки статора в мережу ротор розганяється. Двигун працює згідно з характеристикою 1. Після досягнення точки, яка відповідає точці а, де двигун розвиває момент M_2 , автоматично замикаються контакти К1 і вимикають (шунтують) опір r_{a1} . Внаслідок цього двигун працюватиме згідно з характеристикою 2, яка відповідає опору $r_{a2} + r_{a3}$. Двигун розганяється від швидкості, що відповідає точці б, до швидкості, що відповідає точці в. Після досягнення вказаної швидкості автоматично замикаються контакти К2 і переводять роботу двигуна на механічну характеристику 3. Після досягнення на характеристиці точки ä замикаються контакти К3 і виводять двигун на його природну характеристику 4, розганяння двигуна продовжується аж до усталеної швидкості $n_{уст}$, при якій момент двигуна і гальмівний момент робочого механізму будуть рівними.

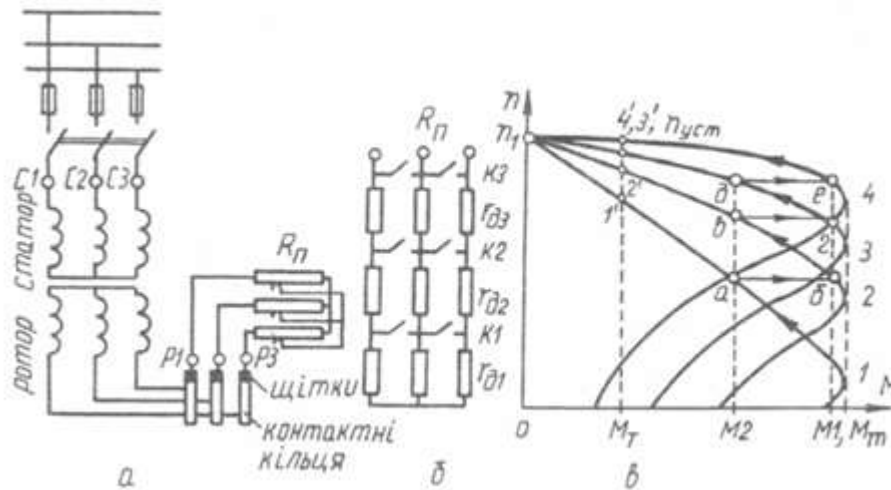


Рис. 4.1. Схема триступеневого пускового реостата

При вимкненні двигуна з мережі контакти К1, К2 і К3 пускового реостата розмикаються – реостат R_n повністю вмикається в ротор, а при ручному керуванні (рис. 4.1а) реостат R_n потрібно поставити на максимальний опір. Тим самим буде підготовлена схема до наступного пуску.

Переваги реостатного пуску АД:

- обмеження пускового струму;
- наявність великого пускового моменту, рівного максимальному;
- плавність пуску.

Недоліки даного способу пуску:

- відносна складність;
- необхідність застосування дорожчих двигунів з ФР, які мають трохи гірші робочі характеристики, ніж двигуни з КР такої самої потужності (криві η і $\cos\varphi$ проходять нижче).

У зв'язку з цим АД з ФР застосовують тільки при важких умовах пуску, коли необхідно розвивати максимально можливий пусковий момент.

Контрольні запитання до лекції № 4

1. Які основні вимоги накладаються при пуску АД?
2. Назвіть способи пуску АД.
3. В чому полягає суть прямого включення двигунів в мережу?
4. Що називають кратністю початкового пускового моменту АД?
5. Як змінити напрям обертання двигуна.
6. Назвіть способи пуску АД при зниженій напрузі.
7. Назвіть основні переваги та недоліки пуску АД при зниженій напрузі.
8. Як здійснюється вмикання АД з фазним ротором?
9. Які вимоги ставляться до пускового реостата при запуску АД з фазним ротором?
10. Назвіть основні переваги та недоліки пуску АД з фазним ротором.

Лекція № 5 ОДНОФАЗНІ АД ТА ЇХ РІЗНОВИДИ

5.1. Однофазні асинхронні двигуни

Однофазні АД використовують в системах автоматики та електропобутових приладах, для яких не потрібно здійснювати регулювання частоти обертання. Живлення однофазних двигунів здійснюється від однофазної мережі змінного струму. Однофазний АД має на статорі однофазну обмотку, яку називають *робочою*, а на роторі – обмотку у вигляді білячої клітки, як і в трифазного короткозамкненого двигуна. Статорна обмотка розміщена в пазах, що займають дві третіх окружності статора, яка відповідає парі полюсів, що забезпечує наблизений до синусоїдального розподіл магніторухійних сил та індукції в повітряному зазорі.

Синусоїдальний струм в робочій обмотці породжує *пульсуюче магнітне поле* з амплітудою \hat{O}_i . Цей потік можна розкласти на два поля з індукціями B_I та B_{II} , які обертаються в просторі в протилежні сторони з постійною амплітудою, кожен з яких дорівнює $\frac{\hat{O}_i}{2}$ та з частотами $n_1(I)$ та $n_1(II)$ (рис. 5.1). При цьому

$$n_I = -n_{II} = \frac{60f_1}{p}$$

ці поля є еліптичними.

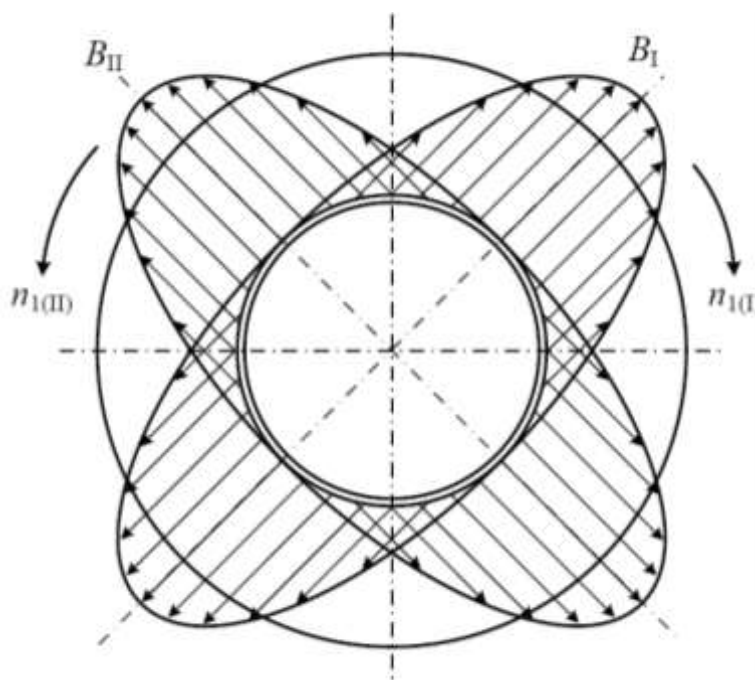


Рис. 5.1. Пульсуючі магнітні поля

При нерухомому роторі ($n=0$, $s=1$) ці поля створюють однакові за значенням, але різні за знаком моменти M_I і M_{II} (рис. 5.2). Тому при пуску результуючий момент двигуна

$$M = M_I + M_{II}$$

що дорівнює нулеві, в результаті чого двигун не може прийти в режим обертання навіть при відсутності гальмівного моменту на валу. Якщо ж ротор приведений в обертання в ту або іншу сторону, то один з моментів M_I або M_{II} буде переважати. Двигун досягне визначеної усталеної швидкості обертання.

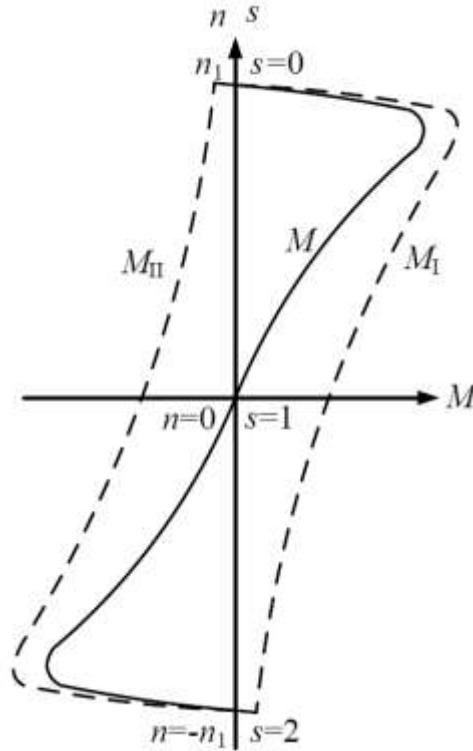


Рис. 5.2. Пульсуючі магнітні поля

Якщо привести ротор двигуна у рух в який-небудь бік, наприклад, за годинниковою стрілкою, то він буде обертатися та розвивати обертаючий момент. Те поле, яке обертається в одному напрямку з ротором, є прямим, інше – зворотнім. Вважатимемо, що працює два двигуни, обертові моменти яких протилежні й осі ковзання напрямлені назустріч одна одній. Якщо загальний вал двигуна нерухомий, то ковзання кожного двигуна дорівнює 1 ($S_{np}=1$, $S_{зв}=1$). Якщо вал за рахунок сторонньої сили розкрутити в одному напрямі, яке буде вважатися прямим (а інший зворотнім), то ковзання двигуна, поле якого обертається в одному напрямі з ротором, тобто в прямому напрямі, буде зменшуватися, наближаючись до нуля (при синхронній швидкості). Ковзання другого двигуна при цьому буде зростати, тому що ротор і поле будуть обертатися в протилежні сторони. Коли „прямий” двигун розвине синхронну швидкість, тобто $n_{np}=n_1$ і $S_{np}=(n_1-n_{np})/n_1=0$, то „зворотній” двигун буде мати ковзання $S_{зв}=[n_1-(-n_{зв})]/n_1=2$. Отже, якщо розкрутити ротор в той чи інший бік, то виникне обертовий момент. Коли обертовий момент перевищить гальмівний момент, двигун самостійно збільшить частоту обертання, при якій ці моменти зрівноважуються.

Проаналізувавши вище сказане, можна зробити такі висновки:

- однофазний двигун не має пускового моменту, тому він обертається в ту сторону, в яку направлена дія прикладеної зовнішньої сили;
- частота обертання однофазного АД на холостому ході менша ніж у трифазного АД через наявність гальмівного моменту, що створюється зворотним полем;
- робочі характеристики однофазного двигуна гірші, ніж у трифазного (має підвищене ковзання, менший ККД, меншу перевантажувальну здатність);
- потужність однофазного двигуна складає біля 2/3 від потужності трифазного двигуна таких самих габаритних розмірів, тому що робоча обмотка однофазного АД займає лише 2/3 пазів статора.

Оскільки однофазний двигун не створює пускового моменту, то для його появи необхідно під час пуску створити в ньому обертове магнітне поле, що можна реалізувати за рахунок зсуву в просторі осей двох пульсуючих магнітних полів на 90 електричних градусів. Для цього використовуються пускові обмотки або конденсатори.

5.2. Різновиди однофазних АД

Двигун з пусковою обмоткою. У такого двигуна на статорі крім робочої обмотки A застосовують ще одну обмотку – пускову Π (рис. 5.3).

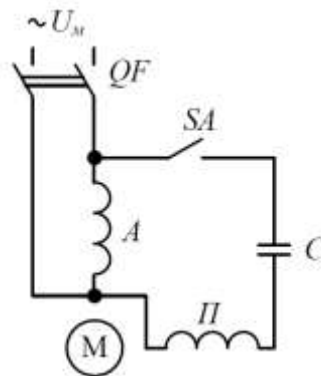


Рис. 5.3. Будова двигуна з конденсаторною обмоткою

Їх розташовують на статорі таким чином, щоб їхні осі були зміщені одна відносно одної на 90° . Крім того, струми в обмотках статора I_A та I_Π повинні бути зсунуті за фазою один відносно одного. Для цього в коло пускової обмотки включають фазозсувний елемент, найкраще для цього використовувати ємність (рис. 5.3.). При досягненні частотою обертання значення, близького до номінального, пускову обмотку Π відключають за допомогою перемикача SA . Таким чином, під час пуску двигун є двофазним, а під час роботи – однофазним.

Для одержання обертового магнітного поля за допомогою двох обмоток на статорі, зміщених одна відносно одної на 90° , необхідно дотримуватися таких умов:

- магніторушійні сили робочої і пускової обмоток повинні бути однакові і зміщені в просторі одна відносно одної на 90 електричних градусів;

- струми в обох обмотках статора повинні бути зміщені за фазою один відносно одного на 90° .

При строгому дотриманні зазначених умов обертове поле статора є круговим, що відповідає найбільшому обертовому моменту. При частковому порушенні однієї з умов поле статора стає еліптичним, яке містить обернену складову, що створює гальмівний момент і погіршує пускові властивості двигуна. Застосування ємності як фазозсувний елемент дозволяє отримати пусковий момент $M_n = (1,6 \div 2,0) M_{ном}$.

Конденсаторний двигун. Такий АД відрізняється від двигуна з пусковою обмоткою (рис. 5.4), в якому конденсатор використовується тільки для пуску, лише тим, що після пуску пускова обмотка з конденсатором не відключається від мережі. Тому вони розраховані на тривале вмикання. Конденсатор при цьому називають робочим. Таким чином, якщо однофазний асинхронний двигун після закінчення процесу пуску працює з пульсуючою магніторушійною силою статора, то конденсаторний двигун – з обертовою. Тому конденсаторні двигуни за своїми властивостями наближаються до трифазних двигунів.

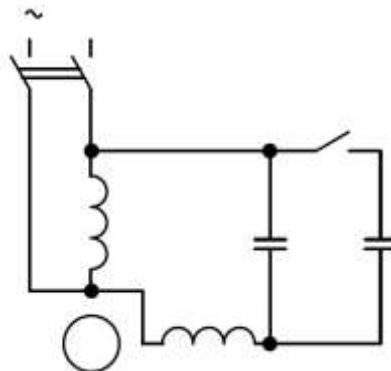


Рис. 5.4. Будова конденсаторного двигуна

Необхідна для одержання кругового обертового поля робоча ємність (мкФ) визначається за формулою:

$$C_{\delta i \dot{a}} = 1,6 \cdot 10^5 \frac{I_A \sin \varphi_A}{f_1 U_A k^2},$$

де I_A – струм, що протікає по обмотці A , яка не містить конденсатора в своєму колі; φ_A – кут зсуву фаз між струмом I_A і напругою U_A (напругою мережі U_m); k – коефіцієнт трансформації

$$k = \frac{\omega_I k_{i \dot{a} i}}{\omega_A k_{i \dot{a} A}},$$

де $k_{обA}$, $k_{обII}$ – обмотувальні коефіцієнти обмоток статора; w_{II} , w_A – кількість витків обмоток статора.

При цьому відношення напруг на головній U_A і на допоміжній U_{II} обмотках повинно бути $\frac{U_A}{U_{II}} = \operatorname{tg} \varphi_A \neq 1$.

Робоча ємність $C_{\text{роб}}$ забезпечує одержання кругового обертового поля лише при одному, попередньо визначеному режимі роботи двигуна. Якщо ж зміниться режим (навантаження), то зміняться і струм I_A , і фазовий кут φ_A , а як наслідок, і $C_{\text{роб}}$, що відповідає круговому полю. Таким чином, якщо навантаження двигуна відрізняється від розрахункового, то обертове поле двигуна стає еліптичним і робочі властивості двигуна погіршуються. Зазвичай розрахунок $C_{\text{роб}}$ здійснюють для номінального навантаження.

Маючи досить високі ККД і коефіцієнт потужності, конденсаторні двигуни мають погані пускові властивості, тому що ємність $C_{\text{роб}}$ забезпечує кругове поле лише при розрахунковому навантаженні, а при пуску двигуна поле статора еліптичне. При цьому пусковий момент не перевищує $0,5M_{\text{ном}}$.

Для підвищення пускового моменту паралельно ємності $C_{\text{роб}}$ включають пускову ємність $C_{\text{пуск}}$. Величину $C_{\text{пуск}}$ вибирають, виходячи з умови одержання кругового поля статора при пуску двигуна, тобто одержання найбільшого пускового моменту. Після закінчення пуску ємність $C_{\text{пуск}}$ необхідно відключити, оскільки при невеликих ковзаннях у колі обмотки статора, яка містить ємність та індуктивність, можливий резонанс напруг, внаслідок чого напруга на обмотці і на конденсаторі може в два-три рази перевищити напругу мережі.

Конденсаторні двигуни іноді називають двофазними, тому що обмотка статора цього двигуна містить дві фази. Двофазні двигуни можуть працювати і без конденсатора або іншого фазозсувального елемента, якщо до фаз обмотки статора підвести двофазну систему напруг (дві напруги, однакові за значенням і частотою, але зсунуті одна відносно одної на 90°).

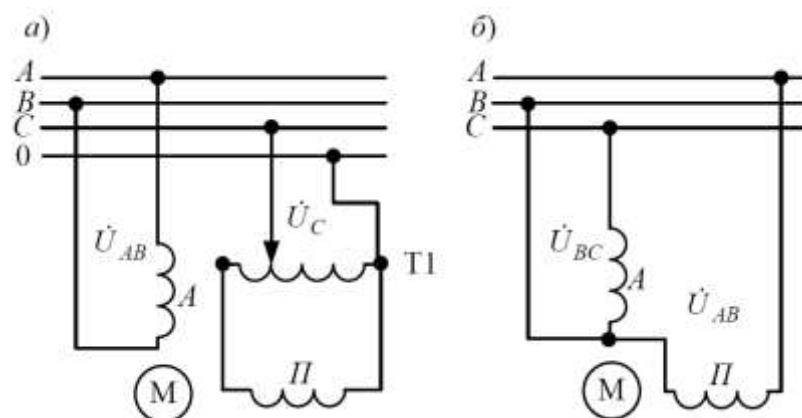


Рис. 5.5. Вмикання конденсаторного двигуна

Для одержання двофазної системи напруг можна скористатися трифазною лінією з нульовим проводом, включивши обмотки статора так, як показано на рис. 5.5, а: одну обмотку – на лінійну напругу U_{AB} , а іншу – на фазну напругу U_C через автотрансформатор T_1 (для вирівнювання значення напруг на фазних обмотках двигуна). Можливе включення двигуна і без

нульового проводу (рис. 5.5б), але в цьому випадку напруги на обмотках двигуна будуть зсунуті за фазою на 120° , що призведе до деякого погіршення робочих властивостей двигуна.

5.3. Робота трифазного АД від однофазної мережі

Трифазний асинхронний двигун може бути використаний для роботи від однофазної мережі. У цьому випадку такий двигун включають як конденсаторний за однією зі схем рис. Залежно від співвідношення напруги в мережі (U_M) і номінальної напруги фази двигуна ($U_{\Phi Д}$).

Значення робочої ємності $C_{роб}$ (мкФ) при частоті змінного струму $f_1=50$ Гц можна орієнтовно визначити за однією з формул

$$\text{для схеми а) } C_{\delta i a} \approx 2700 \frac{I_1}{U_i};$$

$$\text{для схеми б) } C_{\delta i a} \approx 2800 \frac{I_1}{U_i};$$

$$\text{для схеми в) } C_{\delta i a} \approx 4800 \frac{I_1}{U_i},$$

де I_1 – номінальний фазний струм обмотки статора.

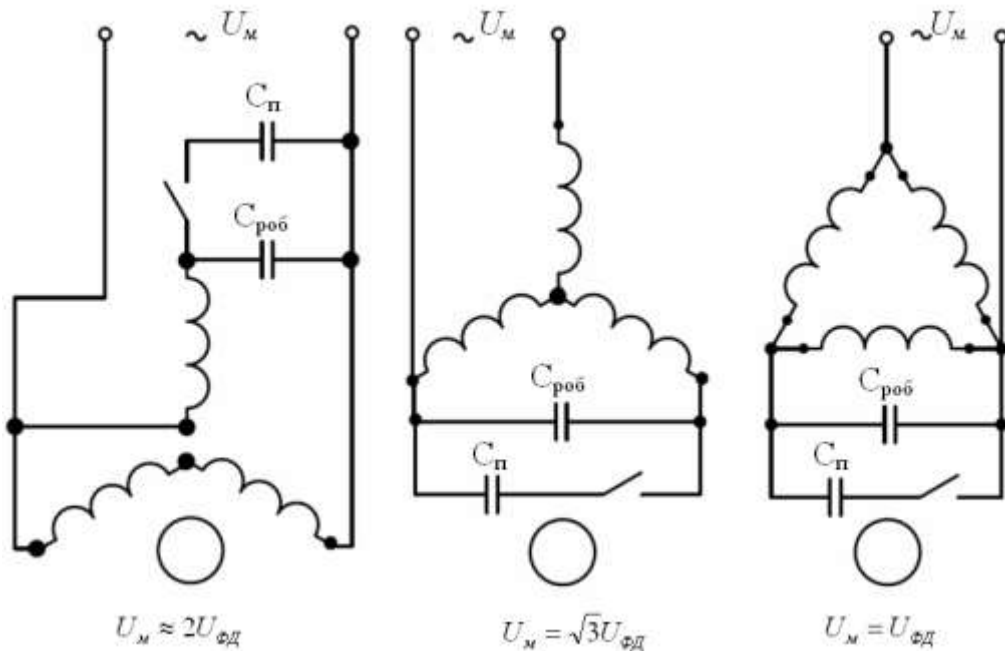


Рис. 5.6. Різні схеми смикання трифазного АД від однофазної мережі

При підборі робочої ємності $C_{роб}$ необхідно стежити за тим, щоб струм у фазних обмотках статора при усталеному режимі роботи не перевищував номінального значення.

Якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валові, то паралельно робочої ємності $C_{роб}$ потрібно включити пускову ємність

$$C_{\tau} = (2,5 \div 3,0 C_{\delta i \acute{a}}).$$

У цьому випадку пусковий момент стає рівним номінальному. При необхідності подальшого збільшення пускового моменту потрібно взяти ще більше значення пускової ємності, але не порушуючи умову

$$C_{\tau} < C_{\delta i \acute{a}}.$$

При використанні трифазного двигуна в однофазному режимі його корисна потужність не перевищує 70-80 % номінальної паспортної потужності, а в однофазному режимі без робочої ємності корисна потужність двигуна не перевищує 60 % номінальної потужності.

У схемах конденсаторних двигунів переважно застосовують паперові конденсатори в металевому герметичному корпусі прямокутної форми. На корпусі конденсатора вказані ємність і робоча напруга постійного струму. При вмиканні такого конденсатора в мережу змінного струму, потрібно зменшити приблизно вдвічі допустиму напругу. Наприклад, якщо на конденсаторі вказана напруга 600 В, то робочу напругу змінного струму (діюче його значення) слід вважати такою, що дорівнює 300 В.

Контрольні запитання до лекції № 5

1. Де розміщена робоча обмотка однофазного АД?
2. Як можна розкласти пульсуюче магнітне поле, що створюється в робочій обмотці однофазного АД?
3. Чому при нерухомому роторі результуючий момент однофазного АД двигуна дорівнює нулю?
4. Чому робочі характеристики однофазного двигуна гірші, ніж у трифазного?
5. Назвіть основні різновиди однофазних АД.
6. Для чого використовується конденсатори для запуску конденсаторних АД двигунів?
7. Як підвищують пусковий момент конденсаторних АД двигунів?
8. Зобразіть різні схеми смикання трифазного АД від однофазної мережі.
9. Як розрахувати робочу ємність, якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валові?
10. чому дорівнює корисна потужність трифазного двигуна при використанні його в однофазному режимі?

Лекція № 6 СИНХРОННІ МАШИНИ

6.1. Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин

Синхронними називаються машини змінного струму, в яких ротор і магнітне поле обертаються з однаковою швидкістю (синхронно)

$$n = n_1 = \frac{60f}{p}.$$

Частота струму, наведеного в обмотці якоря, визначається формулою:

$$f = \frac{pn}{60}.$$

Таким чином, для одержання стандартної частоти $f=50$ Гц потрібно, наприклад, при $2p=2$ мати швидкість обертання $n=300$ об/хв (з такою швидкістю працюють майже всі сучасні турбогенератори).

Синхронні машини використовуються як електричні генератори і в окремих випадках як електричні двигуни. Ці машини переважно виготовляються як трифазні, але також зустрічаються однофазні синхронні двигуни малої потужності (мікродвигуни). За допомогою синхронних трифазних генераторів на електростанціях виробляється електрична енергія. На теплових електричних станціях генератори приводяться в обертання паровими турбінами й називаються турбогенераторами.

Конструктивно синхронна машина складається з нерухомої частини – статора, (який часто називають якорем) у пазах якого розміщена трифазна обмотка, і обертової частини – ротора (або індуктора). За будовою статор синхронної машини майже нічим не відрізняється від статора асинхронного двигуна. Якщо синхронна машина трифазна, то на статорі розташовується трифазна обмотка, яка називається *обмоткою якоря*.

Оскільки частоти обертання ротора і магнітного поля однакові, то обмотці ротора не індукуються струми. Тому обмотка ротора отримує живлення від джерела постійного струму. Для цього на роторі синхронної машини розташовується обмотка, яка через два контактних кільця живиться від джерела постійного струму (*збудника*). Ця обмотка називається *обмоткою збудження*. Вона призначена для створення магнітного потоку Φ_0 в машині. Потужність збудника складає (0,3-3)% від номінальної потужності P_n синхронної машини. Збудник, як правило, розташовується на одному валу із синхронною машиною. Існують і інші способи збудження синхронних машин, наприклад, живлення обмотки збудження від мережі змінного струму через випрямляч.

В обмотках статора під дією магнітного поля ротора наводиться ЕРС, яка подається у зовнішнє коло генератора. Така конструкція генератора дозволяє не використовувати ковзаючі контакти в колі навантаження генератора (обмотки статора безпосередньо з'єднуються з навантаженням) і надійно ізолювати обмотки статора від корпусу машини, що істотно для

потужних генераторів, що працюють при високих напругах.

По конструктивному виконанню ротора синхронні машини поділяють на два типи: явно полюсні і неявно полюсні.

Синхронні машини з явно вираженими полюсами призначені для роботи з швидкостями 1500, 1000, 750 об/хв. і т.д). При цьому кількість полюсів тим більша, чим менша швидкість обертання. Явно виражені полюси (1) виготовляють із електротехнічної сталі й закріплюють на обводі ротора 2 (рис. 6.1а). Обмотки збудження 3, розташовані на явно виражених полюсах, з'єднуються між собою так, щоб північні і південні полюси чергувалися.

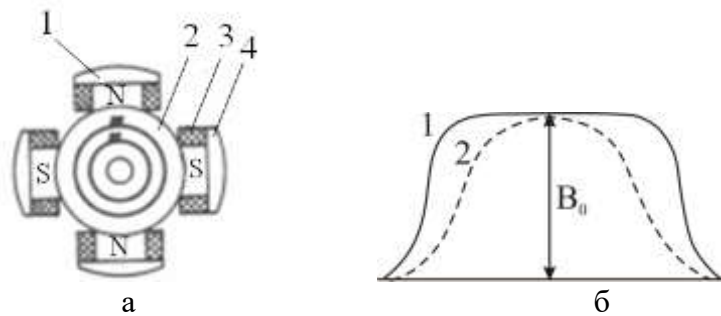


Рис. 6.1. Розташування явно виражених полюсів на обводі ротора (а) та розподіл магнітної індукції в повітряному проміжку синхронної машини (б)

Сердечники полюсів закінчуються полюсними наконечниками 4, які зазвичай обробляють таким чином, щоб повітряний проміжок між полюсним наконечником і статором отримувався нерівномірним. Він мінімальний під серединою полюса і максимальний біля його країв. Робиться це для того, щоб криву магнітної індукції B_0 в повітряному проміжку, що має форму трапеції при рівномірному проміжку 1, максимально наблизити до синусоїди 2 (рис. 6.1б).

На полюсних наконечниках явно виражених полюсів ротора є пази, в яких укладають стержні демпферної короткозамкненої обмотки. Ця обмотка служить для заспокоєння ротора в генераторах, а також для пуску в синхронних двигунах.

Явно полюсні синхронні машини виконуються на частоті обертання, що не перевищують 1000 об/хв. Це пояснюється тим, що при більш високих частотах обертання не забезпечується механічна міцність ротора. Найбільш великі явно полюсні синхронні машини – гідрогенератори.

Типовою неявно полюсною синхронною машиною є генератор теплової електростанції, що приводиться в обертання швидкохідною паровою турбіною. Ці генератори називаються турбогенераторами.

На рис. 6.2 показана конструкція неявно полюсної синхронної машини. На зовнішній поверхні ротора 2 фрезеруються пази, в які укладається обмотка збудження 4. У пазах вона закріплюється сталевими клинами, а по торцях сталевими бандажами. Така конструкція ротора забезпечує високу механічну міцність. Живлення обмотки збудження 4 здійснюється через контактні кільця 3 від джерела постійної напруги.

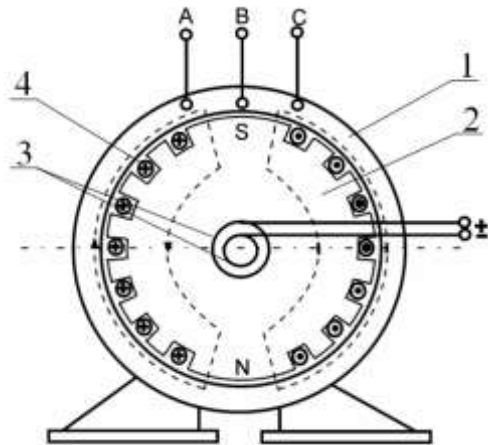


Рис. 6.2. Конструкція неявно полюсної синхронної машини

Ротор неявно полюсної синхронної машини виготовляють у вигляді суцільного сталюого циліндра. Провідники збудження закладаються в поздовжні канавки цього циліндра.

Синхронні машини мають такі переваги над машинами інших класів:

1) високі ККД і коефіцієнт потужності; 2) частота ЕРС синхронного генератора не залежить від навантаження машини.

Недоліки цих машин такі:

1) машини мають складну будову й погані масогабаритні характеристики; 2) двигун потребує два джерела напруги (змінної трифазної та постійної); 3) пуск синхронного двигуна проходить з деяким ускладненням.

6.2. Будова і принцип дії машин постійного струму

Машиною постійного струму називають обертову електричну машину, яка перетворює механічну енергію в електричну (у випадку генератора) і виконує зворотнє перетворення (у випадку двигуна). По конструктивному виконанню розрізняють два типи машин постійного струму:

уніполярні машини постійного струму;

колекторні машини постійного струму.

Уніполярні (безколекторні) машини постійного струму серійно не випускаються, тому що вони мають низькі техніко-економічні показники. Застосовуються тільки в спеціальних установках і виготовляються як машини індивідуального виконання. Колекторні машини постійного струму є їх основним типом. Тому, коли говорять про машини постійного струму, мають на увазі цей тип машин.

Машина постійного струму складається зі статора, ротора (якоря) і повітряного проміжку. Нерухома частина – статор – складається зі станини (корпуса), ярма, головних і додаткових полюсів з обмотками. Ядро в машинах постійного струму призначено для створення шляху, за яким замикається

постійний магнітний потік машини. Зазвичай, ярмо виконується масивним зі сталевих труб (для машин малої потужності), сталю прокату або сталю лиття і одночасно виконує функції станини – частини, до якої кріпляться інші нерухомі частини і за допомогою якої машина закріплюється на фундаменті або основі.

Принцип дії машини постійного струму розглядається на основі моделі машини постійного струму (рис. 6.3).

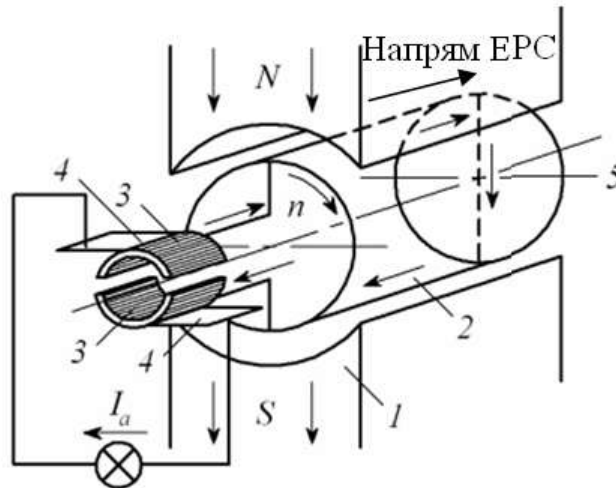


Рис. 6.3. Модель машини постійного струму

Статор машини постійного струму називається індуктором. Він складається з двох полюсів 1, що створюють основний магнітний потік Φ , і ярма (станини), не наведеного на рисунку 1. Ротор найпростішої машини постійного струму складається з якоря 2, який представлений у вигляді сталю осердя з обмоткою з одного витка, і колектора 3, який представлений у вигляді двох ізолюваних одна від одної пластин. До колектора прилягають дві нерухомі щітки 4, що з'єднують обмотку якоря із зовнішніми колами.

Магнітний потік Φ виходить з північного полюса N , пронизує ярмо, входить у південний полюс S і замикається по ярму, повертаючись до північного полюса N . Величина магнітної індукції в повітряному проміжку між якорем і полюсами змінюється від максимального значення під полюсами, до нуля на лінії геометричної нейтралі 5.

Нехай ярмо машини постійного струму обертається первинним двигуном за годинниковою стрілкою. При цьому в провідниках обмотки якоря індукуються електрорушійна сила (ЕРС), напрям якої може бути визначено за правилом правої руки. Оскільки потік полюсів Φ вважається постійним, то індукуються ЕРС створюються виключно внаслідок обертання якоря і називаються ЕРС обертання. Величина ЕРС обертання, що індукуються в провіднику обмотки якоря:

$$e_{\text{в}} = Blv,$$

де B – величина магнітної індукції в повітряному проміжку між полюсом і якорем в місці розташування провідника; l – активна довжина провідника,

тобто довжина, на протязі якої провідник розташований у магнітному полі; ϑ – лінійна швидкість руху провідника.

В обох провідниках, внаслідок симетрії, індуються однакові $e_{i\vartheta}$, які складаються за контуром витка, утворюючи повну ЕРС якоря машини:

$$E_a = 2e_{i\vartheta} = 2Bl\vartheta.$$

Оскільки провідники обмотки якоря при обертанні проходять по чергово під північним та південним полюсом машини, то напрям ЕРС в провіднику змінюється. Частота ЕРС залежить від частоти обертання якоря і кількості пар полюсів.

При підключенні обмотки якоря за допомогою щіток до зовнішньої мережі, по ній і по обмотці якоря потече струм I_a . В обмотці якоря струм буде змінним. Однак в зовнішній мережі напрям струму буде постійним, що пояснюється дією колектора. При обертанні якоря з колектором (рис. 6.3) і зміні напрямку ЕРС в провіднику, одночасно відбувається зміна колекторних пластин під щітками. Внаслідок чого, під верхньою щіткою завжди буде знаходитися пластина, що з'єднана з провідником, розташованим під північним полюсом, а під нижньою щіткою – пластина, з'єднана з провідником, розташованим під південним полюсом. В результаті чого, полярність щіток і напрям струму в зовнішній мережі залишаються незмінними, хоча величина його буде змінюватись (пульсувати) (рис. 6.4а).

Якщо ми накладемо на якір два витки (дві котушки) під кутом 90° один до одного, то пульсації напруги на щітках значно зменшаться (рис. 6.4б). Підрахунок показує, що вже при восьми колекторних пластинах на полюс пульсації напруги на щітках не перевищують 1 % від середнього значення цієї напруги; тому струм, що тече по зовнішньому колі, можна вважати практично постійним струмом.

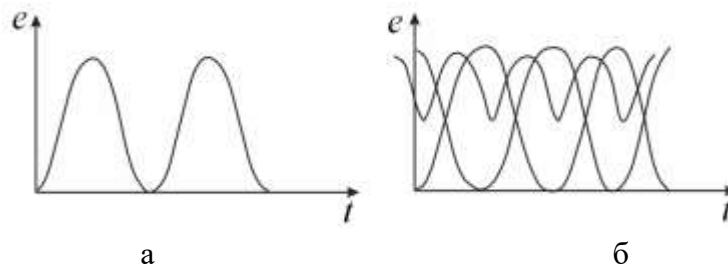


Рис. 6.4. Пульсуюча ЕРС при одному (а) і двох (б) витках на якорі

Напруга постійного струму на затискачах генератора визначається E_a і величиною падіння напруги на опорі обмотки якоря r_a :

$$U_a = E_a - I_a r_a.$$

Провідники обмотки якоря із струмом I_a розташовані в магнітному полі і на них діють електромагнітні сили:

$$F_{i\vartheta} = BI_a,$$

напрямок яких визначається за правилом лівої руки. Електромагнітні сили створюють механічний обертний момент M_{ai} , який називається

електромагнітним моментом:

$$M_{\dot{a}i} = F_{i\dot{\theta}} D_a,$$

де D_a – діаметр якоря, мм.

У режимі генератора $M_{\dot{a}i}$ діє в протилежному обертанню якоря напрямку і є гальмівним.

6.3. Синхронні генератори

Якщо обмотку збудження генератора увімкнути до джерела постійного струму, то намагнічувальна сила обмотки ротора створить основне магнітне поле амплітудою Φ_0 . Лінії цього поля проходять по осердю ротора й статора, а також по повітряному проміжку між ротором і статором.

При обертанні ротора за допомогою первинного двигуна магнітне поле буде теж обертатись. У результаті цього в трьох фазах обмотки статора (якоря) будуть індукуватися три ЕРС, однакові за амплітудою і частотою, але зсунуті за фазою одна відносно одної на $1/3$ періоду, що відповідає 120° . Для того, щоб при постійній швидкості обертання ротора ЕРС в обмотках статора змінювались за синусоїдним законом, магнітна індукція B вздовж повітряного проміжку між ротором і статором теж повинна змінюватись за синусоїдним законом. В машинах з явно вираженими полюсами це досягається вибором певної форми полюсних наконечників, а в машинах з неявно вираженими полюсами – за рахунок відповідного розташування обмотки збудження в пазах осердя ротора.

На рис. 6.5 показана схема синхронного генератора та збудника – генератора постійного струму. Тут: 1 – трифазна обмотка статора синхронної машини; 2 – обмотка ротора (збудження); 3 – контактні кільця; 4 – якір збудника; 5 – обмотка збудження збудника; 6 – регулювальний реостат.

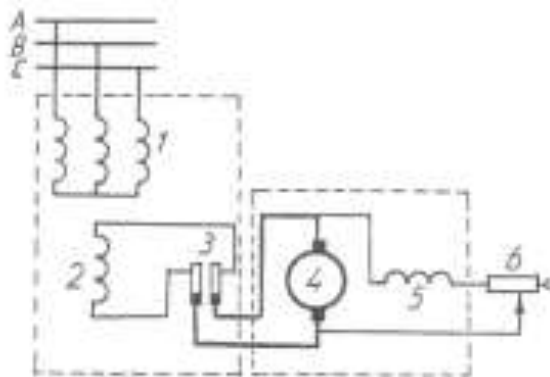


Рис. 6.5. Принцип роботи синхронного генератора

ЕРС фази обмотки статора визначається виразом

$$E_1 = 4,44 f_1 k_{w1} \Phi w_1,$$

де k_{w1} – обмоточний коефіцієнт обмотки статора; Φ – обертовий магнітний потік ротора; w_1 – число витків фази обмотки статора.

Величина лінійної ЕРС на виході синхронного генератора E_L залежить від схеми з'єднання фазних обмоток статора: при з'єднанні в зірку $E_L = \sqrt{3} E_1$; при з'єднанні в трикутник $E_L = E_1$.

При підключенні до виводів обмотки статора навантаження (споживача енергії) Z_H в колі генератора з'являться струми I_a, I_b, I_c . Таким чином, синхронний генератор, споживаючи енергію первинного двигуна, віддає електричну енергію змінного струму.

Контрольні запитання до лекції № 6

1. Які двигуни називаються синхронними?
2. Що є істотним недоліком синхронних двигунів?
3. Як здійснюється пуск синхронного двигуна з електромагнітним збудженням?
4. У чому полягає суть пуску синхронного двигуна з допомогою допоміжного (розгінного) двигуна і частотного пуску.
5. Поясніть принцип роботи генератора постійного струму.
6. Як можна визначити полярність полюсів електромагніту генератора постійного струму?
7. Як визначити напрямок ЕРС, що індукується в якорі генератора постійного струму?
8. Запишіть формулу, що дозволяє визначити повну ЕРС якоря генератора постійного струму.
9. Що називається геометричною нейтраллю якоря генератора постійного струму?
10. Яким способом можна змінити напрям ЕРС в обмотці якоря, полярність щіток, напрям напруги і струму в зовнішньому колі генератора постійного струму?

Лекція № 7.
ГЕНЕРАТОРИ З НЕЗАЛЕЖНИМ ЗБУДЖЕННЯМ ТА
САМОЗБУДЖЕННЯМ.
ДВИГУНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

7.1. Класифікація генераторів за способом збудження

Для нормальної роботи генератора в ньому повинно бути створене основне магнітне поле, для чого обмотка збудження генератора повинна бути підключена до джерела постійної напруги. Властивості генераторів постійного струму залежать від числа і способу підключення обмоток збудження або, як говорять, від способу збудження генераторів. Залежно від способу збудження розрізняють генератори з *незалежним збудженням та з самозбудженням*.

Генератори з незалежним збудженням виконуються з електромагнітним і магнітоелектричним збудженням.

У генераторів з електромагнітним збудженням обмотка збудження F1–F2, розташована на головних полюсах, підключається до незалежного джерела живлення, рис. 7.1. У цьому випадку обмотка збудження називається незалежною обмоткою збудження (НОЗ). Струм кола збудження I_z може змінюватися в широких межах за допомогою резистора R_z . Потужність, споживана обмоткою збудження, невелика й у номінальному режимі складає 1–5 % номінальної потужності, що знімається з якоря генератора. Звичайно, процентне значення потужності збудження зменшується із зростанням номінальної потужності машини.

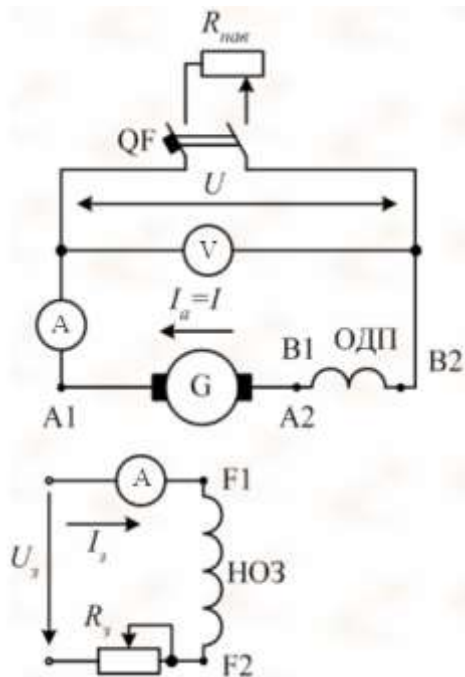


Рис. 7.1. Принцип дії генератора з електромагнітним збудженням

Номинальна напруга обмотки збудження генератора вибирається рівною або (інколи) меншою номінальної напруги обмотки якоря А1–А2. Для зменшення іскріння щіток в коло якоря послідовно з обмоткою якоря вмикається обмотка додаткових полюсів (ОДП) В1–В2. Генератори з незалежним збудженням застосовують у тих випадках, де потрібне регулювання напруги в широких межах: наприклад, для живлення електричних ванн.

Магнітоелектричні генератори збуджуються постійними магнітами, з яких виготовляються полюси машини. З таким способом збудження виконуються генератори переважно невеликої потужності. Недоліком генераторів з магнітоелектричним збудженням є трудність регулювання напруги.

У генераторів із самозбудженням обмотка збудження отримує живлення від власного якоря. Залежно від способу її вмикання генератори із самозбудженням підрозділяються на генератори з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

Схема з'єднання генератора з паралельним збудженням показана на рис. 7.2. Коло обмотки збудження Е1–Е2 вмикають паралельно якорю, від якого вона і отримує живлення; в цьому випадку обмотку збудження називають паралельною обмоткою збудження або шунтовою (ШОЗ), яку розраховують на напругу якоря.

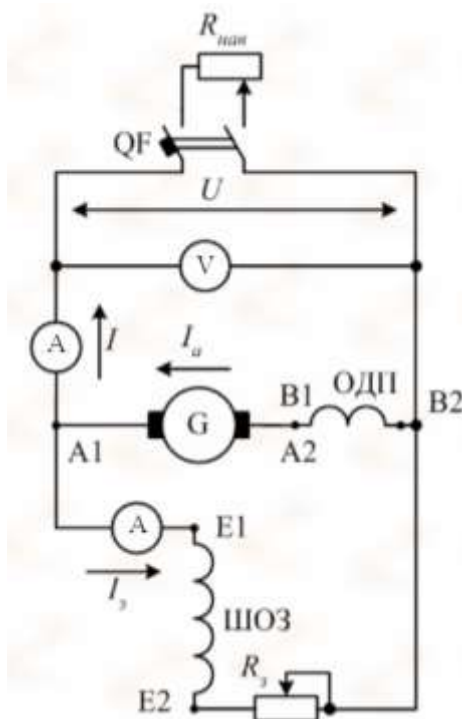


Рис. 7.2. Принцип дії генератора з паралельним збудженням

Резистор R_z дає можливість змінювати струм збудження I_z , а отже, і вихідну напругу U . Струм якоря I_a у такого генератора дорівнює сумі

$$I_a = I + I_z,$$

де I – струм навантаження.

Струм збудження відносно малий і для номінального режиму складає 1–5 % номінального струму машини. Паралельні генератори – найбільш поширені генератори постійного струму.

У генератора з *послідовним збудженням* (рис. 7.3) обмотка збудження з'єднується послідовно з якорем; у цьому випадку обмотку збудження називають послідовною обмоткою збудження або серієсною (СОЗ). Її струм збудження дорівнює струму якоря:

$$I_{\zeta} = I_a = I.$$

Послідовні генератори застосовуються рідко і тільки в спеціальних схемах.

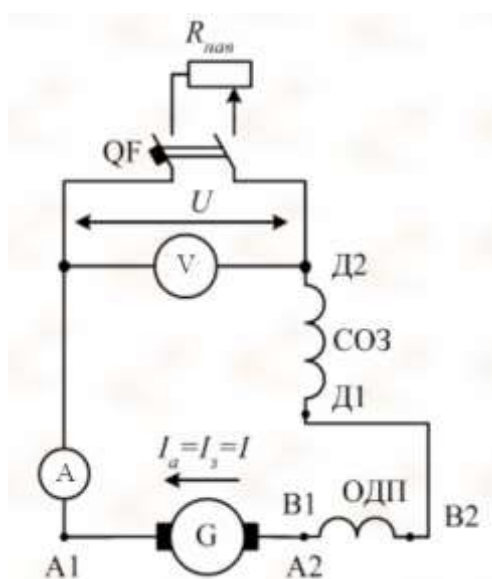


Рис. 7.3. Принцип дії генератора з послідовним збудженням

У генераторів із *змішаним збудженням* (рис. 7.4) на полюсах розміщують дві обмотки. Одна з них має велике число витків і виконана з провідників відносно невеликого перерізу – вмикається паралельно якорю, а інша обмотка з малим числом провідників великого перерізу – вмикається послідовно з якорем. Струм якоря такого генератора

$$I_a = I + I_{\zeta}.$$

В цих генераторів паралельна і послідовна обмотки можуть бути увімкнені узгоджено (магніторушійні сили цих обмоток направлені узгоджено) і зустрічно (їхні магніторушійні сили спрямовані зустрічно). В залежності від цього розрізняють генератори змішаного узгодженого вмикання і генератори змішаного зустрічного вмикання.

В основному в генераторах із змішаним збудженням основна частина магніторушійної сили збудження створюється паралельною обмоткою.

Генератори із паралельним, послідовним і змішаним збудженням називають відповідно *генераторами шунтового, серієсного і компаундного збудження*.

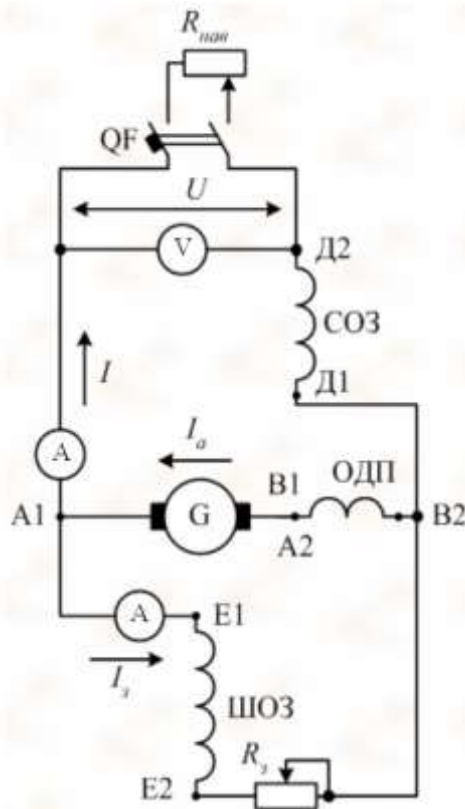


Рис. 7.4. Принцип дії генератора із змішаним збудженням

Номінальна потужність, яка споживається обмоткою збудження, визначається з виразу

$$P_{\zeta.\hat{m}} = U_{\zeta.\hat{m}} \cdot I_{\zeta.\hat{m}} ,$$

а вихідна номінальна потужність генератора –

$$P_{2.\hat{m}} = U_{\hat{m}} \cdot I_{\hat{m}} .$$

7.2. Принцип дії двигуна постійного струму

Принцип дії електричних двигунів постійного струму базується на взаємодії провідників обмотки якоря, по яких протікає струм, з магнітним полем полюсів машини, в якому знаходяться провідники.

Основне поле Φ у двигуні, як і в генераторі, створюється струмом обмотки збудження, а струм i_a в провідниках обмотки якоря протікає під дією підведеної до неї постійної напруги. Сила, що діє на провідник, визначається законом Ампера $F = Bil$. Напрямок цієї сили визначається правилом лівої руки. Обмотка якоря намотується таким чином, щоб одна сторона секції (витка) знаходилась під північним (N) полюсом, а друга – під південним (S). Тому, щоб якір обертався увесь час в одну і ту саму сторону, при переході провідника з-під північного полюса під південний напрям струму в ньому повинен змінюватися на протилежний. Напрямок струму в провідниках обмотки якоря при переході їх через лінію геометричної нейтралі змінюється за допомогою колектора. Таким чином, колектор у двигуні перетворює

постійний струм джерела живлення в змінний струм у секції (витку) обмотки якоря, тобто виконує функцію інвертора струму. Зміна напрямку струму у витку за допомогою колектора показана на рис 7.5.

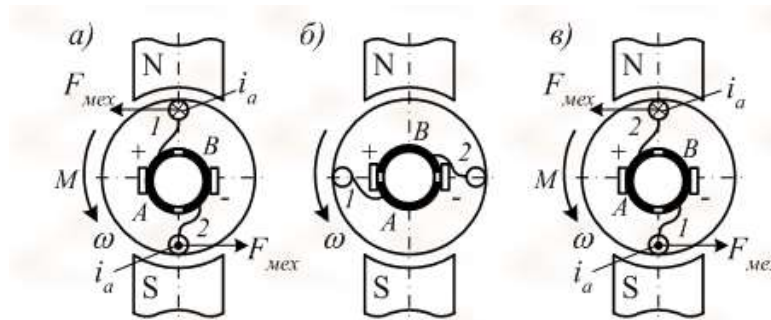


Рис. 7.5. Схема зміни напрямку струму у витку двигуна постійного струму за допомогою колектора

Виток 1-2 (рис. 7.5а) розміщений у магнітному полі полюсів. Кінці його припаяні до колекторних пластин *A* і *B*. Під дією прикладеної до щіток напруги у витку протікає струм i_a . Визначивши за правилом лівої руки напрямки сил, що діють на провідники 1 і 2, бачимо, що виток буде обертатися проти руху годинникової стрілки. В позиції рис. 7.5б виток пройде геометричну нейтраль за рахунок сил інерції (якщо він один) або під дією інших витків, які в цей час не знаходяться на геометричній нейтралі (у реальній машині). В позиції (рис. 7.5в), коли сторона 1 витка перейшла в зону дії південного полюса, а сторона 2 – у зону дії північного, напрям струму у витку зміниться на протилежний, тому що під щіткою позитивної полярності виявилася пластина *B*, а під щіткою негативної полярності – пластина *A*. Отже, на виток діє момент такого ж напрямку, як і в позиції рис. 7.5а, і він буде продовжувати обертатися в ту ж саму сторону.

7.3. Електромагнітний момент машини постійного струму

У режимі генератора електромагнітний момент відповідно до закону Ленца протидіє обертанню якоря і є гальмівним. У режимі двигуна електромагнітний момент є обертовим.

Розрахуємо значення електромагнітного моменту двигуна. Сила, яка діє на провідник обмотки якоря, дорівнює

$$F_{i\delta} = B l i_a / 2a ,$$

де a – кількість пар паралельних віток якоря.

При обертанні якоря сила, що діє на провідник, змінюється внаслідок різних значень B у повітряному проміжку. Середнє значення сили таке:

$$F_{i\delta \bar{n}\delta} = B_{\bar{n}\delta} l i_a / 2a .$$

Середній момент, який діє на якір, дорівнює:

$$M = F_{i\delta \bar{n}\delta} \frac{D_{\bar{y}}}{2} N = B_{\bar{n}\delta} l \frac{i_a}{2a} \frac{D_{\bar{y}}}{2} N ,$$

де B_{cp} – середнє значення магнітної індукції в повітряному проміжку, N – кількість провідників якоря.

$$B_{\tilde{n}\delta} = \frac{\Phi}{\frac{\pi D_y l}{2p}},$$

де Φ – магнітний потік одного полюса; D_y – діаметр осердя якоря; $2p$ – кількість полюсів машини.

Тоді

$$M = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi} \Phi i_a.$$

Позначимо $C_l = \frac{p}{a} \frac{N}{2\pi}$ – коефіцієнт, який залежить від конструктивних даних машин. Остаточно будемо мати:

$$M = \tilde{N}_j \Phi i_a.$$

Отже, електромагнітний момент машини постійного струму визначається магнітним потоком і струмом якоря.

При обертанні якоря в магнітному полі полюсів у провідниках його обмотки буде індукватися ЕРС, напрямок якої визначається, як і в генераторі, за правилом правої руки, але він завжди протилежний напрямку струму в провідниках обмотки якоря. В зв'язку з тим, що струм в обмотці якоря створюється прикладеною напругою, ЕРС якоря спрямована назустріч цій напрузі живлення. Тому таку ЕРС називають *протиЕРС*.

Величина індукованої в обмотці якоря двигуна ЕРС, визначається за формулою:

$$E = \tilde{N}_j \omega \hat{O}.$$

Прикладена до обмотки якоря двигуна напруга врівноважується наведеною в ній протиЕРС, а також спадом напруги в якірному колі:

$$U = E + i_a R_a.$$

У номінальному режимі роботи двигуна велика частина напруги (близько 95 %) врівноважується протиЕРС, а на спад напруги приходиться близько 5 %. В пусковому режимі при вмиканні двигуна в мережу в перший момент якір ще нерухомий ($\omega = 0$), тому $E = \tilde{N}_j \omega \hat{O} = 0$ і вся прикладена напруга врівноважується тільки спадом напруги в якорі $i_a R_a$. Внаслідок цього струм якоря при пуску буде перевищувати струм номінального режиму приблизно в 20 разів, що є недопустимим. Щоб обмежити пусковий струм, у коло якоря двигуна вводять пусковий реостат R_n , який повинен обмежувати струм приблизно до $1,5 I_{a,ном}$ ($I_{a,ном}$ – номінальний струм якоря). По мірі розгону двигуна реостат повинен виводитися і при роботі в номінальному режимі струм у якорі обмежується в основному наведеною в обмотці протиЕРС:

$$i_{a,\tilde{m}} = \frac{U_{\tilde{m}} - \hat{A}_{\tilde{m}}}{R_a}.$$

Для зміни напрямку обертання двигуна необхідно змінити напрям обертового моменту, який він розвиває. Це можна зробити одним із двох способів:

1) зміною полярності напруги, підведеної до якоря двигуна, і, як наслідок, напрямку струму якоря;

2) зміною напрямку магнітного потоку головних полюсів, для чого змінюється напрям струму в обмотці збудження.

На практиці здебільшого використовується перший спосіб.

Контрольні запитання до лекції № 7

1. Як розрізняють генератори залежно від способу збудження?
2. Поясніть принцип дії генератора з електромагнітним збудженням.
3. Поясніть принцип дії генератора з паралельним збудженням.
4. Поясніть принцип дії генератора з послідовним збудженням.
5. Поясніть принцип дії генератора із змішаним збудженням.
6. Як ще називають генератори із паралельним, послідовним та змішаним збудженням?
7. Поясніть принцип дії двигуна постійного струму.
8. Чим виступає електромагнітний момент відповідно до якоря в режимі генератора?
9. Чим виступає електромагнітний момент відповідно до якоря в режимі двигуна?
10. Як можна змінити напрям обертання двигуна?

Лекція № 8. ТРИФАЗНІ ТРАНСФОРМАТОРИ

8.1. Будова та принцип дії трифазного трансформатора

Трансформатор – це статичний електромагнітний апарат, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги у змінний струм іншої напруги при збереженні частоти струму незмінною.

Трансформатори, які зазвичай застосовуються в техніці, складаються зі сталевого магніто проводу (осердя) і двох або декількох обмоток, які електрично не зв'язані між собою.

Обмотка трансформатора, до якої підводиться енергія змінного струму, називається первинною обмоткою, а обмотка, від якої енергія відводиться називається вторинною. Всі параметри і величини, які належать до кола первинної обмотки, називаються первинними і позначаються відповідними літерами з індексом 1, а всі параметри і величини, які належать до кола вторинної обмотки, називаються вторинними і позначаються відповідними літерами з індексом 2.

Якщо вторинна напруга менше первинної, то трансформатор називається знижувальним, а якщо більше – підвищувальним. У залежності від включення тих чи інших обмоток до мережі кожен трансформатор може бути як підвищувальним, так і знижувальним.

Для трансформації трьохфазного струму можна використати три однофазні трансформатори, що працюють як один агрегат (рис. 8.1). Але можна об'єднати три однофазних трансформатора в один трьохфазний апарат й при цьому досягнути економії матеріалів.

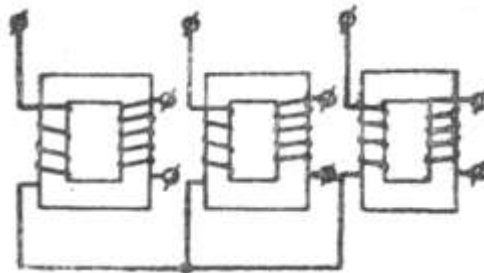


Рис. 8.1. Три однофазні трансформатори з'єднані в одну схему

На кожному стержні трифазного трансформатора розміщують обмотки вищої й нижчої напруг однієї фази. Стержні з'єднуються між собою ярмом зверху і знизу (рис. 8.2). Довжина магнітних ліній потоку середнього стержня менша, ніж крайніх стержнів, отже, магнітний потік зустрічає на своєму шляху менший магнітний опір, ніж магнітні потоки крайніх стержнів. Тому у фазі, обмотка якої розміщена на середньому стержні, протікає намагнічувальний струм меншої сили, ніж у фазах, обмотки яких розміщені на крайніх стержнях.

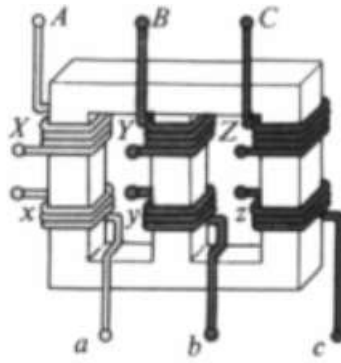


Рис. 8.2. Будова трифазного трансформатора

Конструктивно обмотки трифазних трансформаторів виконують так само, як і однофазних. Початки фаз вищої напруги позначають – А, В, С, а кінці фаз – Х, Y, Z. Якщо обмотка вищої напруги має виведену нульову точку, то цей затискач позначається цифрою 0. Початки фаз нижчої напруги позначають – а, b, с, а кінці фаз – х, у, z; вивід нульової точки – 0.

Обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані зіркою чи трикутником. З'єднання обмоток трифазних трансформаторів зіркою позначається Y, а трикутником Δ . Y – обмотка з'єднана зіркою і має виведену нульову точку.

8.2. З'єднання обмоток трифазних трансформаторів

Звернемося до однофазного трансформатора, обмотки якого показані на рис. 8.3а. Початок і кінець обмотки вищої напруги позначають відповідно великими буквами А і Х. Для обмотки нижчої напруги беруть малі букви: а – початок і х – кінець обмотки. Затискачі обмоток трифазних трансформаторів позначають, як показано на рис. 8.3б.

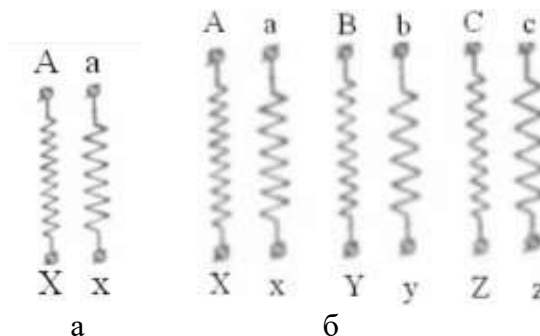


Рис. 8.3. Обмотки однофазного (а) і трифазного (б) трансформаторів

Знаючи позначення затискачів обмоток, ми можемо правильно з'єднати обмотки трифазного трансформатора і трифазної групи в зірку або трикутник. Їх потрібно також знати при увімкненні трансформаторів на паралельну роботу. З'єднання обмотки, наприклад, вищої напруги в зірку показано на рис. 8.4а. Нагадаємо, що в цьому випадку лінійна напруга в $\sqrt{3}$ разів більша від фазної, а лінійний струм дорівнює фазному. На рис. 8.4б

показано з'єднання обмотки в трикутник. Тут лінійна напруга дорівнює фазній, а лінійний струм в $\sqrt{3}$ разів більший від фазного.

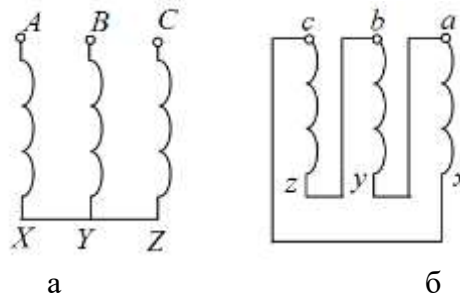


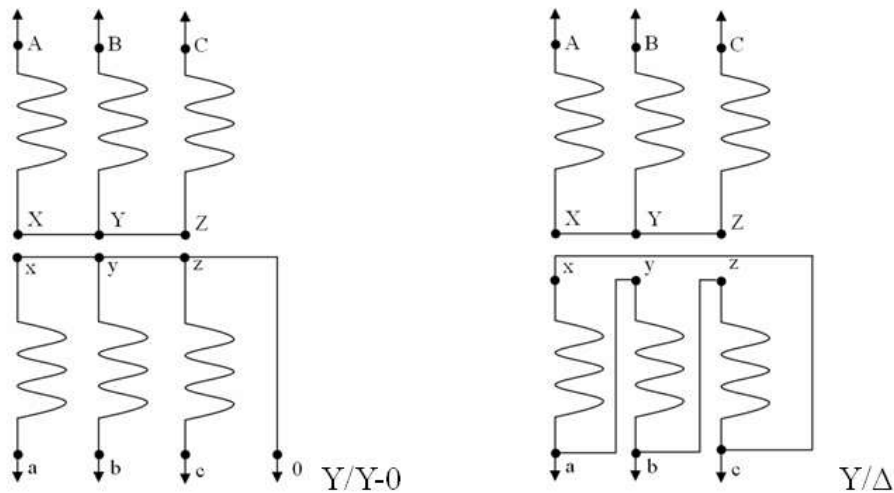
Рис. 8.4. З'єднання обмоток трифазного трансформатора в зірку (а) і трикутник (б)

З'єднання обмоток в зірку і зірку позначають Y/Y і називають «зірка – зірка» або «ігрек – ігрек».

З'єднання обмоток в зірку і трикутник позначають Y/Δ і називають «зірка – трикутник» або «ігрек – дельта». Якщо від обмотки, з'єднаної в зірку, виводиться нульова точка, то таке з'єднання позначають Y₀ і називають «зірка з нулем» або «ігрек нульове».

Слід мати на увазі, що відношення лінійних напруг $U_{л1}$ і $U_{л2}$ трансформатора залежить не тільки від чисел витків ω_1 і ω_2 обмоток (на фазу), а й від способів їх з'єднання:

$$\text{при Y/Y} \quad \frac{U_{\dot{e}1}}{U_{\dot{e}2}} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \text{при Y/\Delta} \quad \frac{U_{\dot{e}1}}{U_{\dot{e}2}} = \frac{\sqrt{3}\omega_1}{\omega_2}; \quad \text{при \Delta/Y} \quad \frac{U_{\dot{e}1}}{U_{\dot{e}2}} = \frac{\omega_1}{\sqrt{3}\omega_2}.$$



8.3. Групи з'єднань обмоток трансформатора

Залежно від зсуву по фазі між лінійними первинною і вторинною напругами трансформатори поділяються на групи з'єднань, причому кожна група складається з трансформаторів з однаковим зсувом по фазі між зазначеними напругами.

Для позначення групи з'єднань вибирають ряд цілих чисел від трансформатор 1 до 12, причому тут умовно прийнято, що одиниця відповідає 30° , за аналогією з кутами між хвилиною і годинною стрілками годинника при 1, 2, ... 12 год. При визначенні групи з'єднань з вектором напруги обмотки вищої напруги треба сумістити хвилину стрілку, а з вектором напруги обмотки нижчої напруги – годинну стрілку. Відлік кута провадять від хвилиної стрілки до годинної в напрямі їх обертання.

Звернемося до однофазного трансформатора, обмотки якого показані на рис. 8.5. Якщо вони виконані при однаковому напрямі намотки (наприклад, за годинною стрілкою, якщо дивитися від A до X і від a до x), то їх напруги (за які ми приймаємо наведені в них ЕРС) будуть зображені векторами, напрямленими в одну і ту ж сторону (рис. 8.5а). Такий трансформатор належить до групи з'єднань, яку позначають числом 12. Його умовне позначення: $Y/Y-12$. Якщо той же трансформатор матиме обмотку, наприклад, нижчої напруги з протилежним напрямом намотки, що можна одержати з попереднього випадку способом перестановки позначень затискачів, то зсув між напругами дорівнюватиме 180° (рис. 8.5б). Такий трансформатор належить до групи з'єднань, яку позначають числом 6.

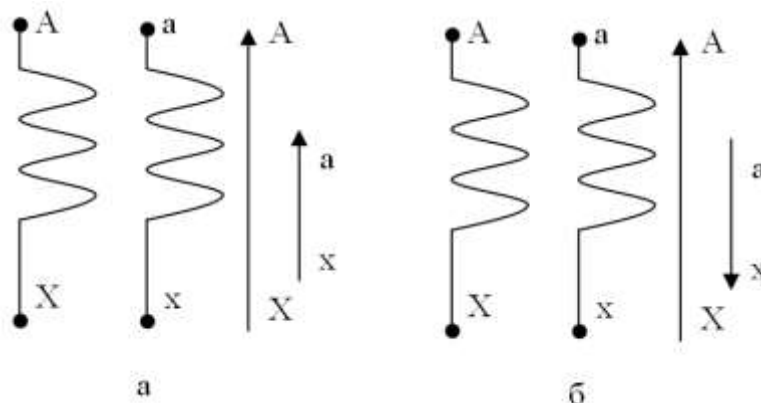


Рис. 8.5. Обмотки однофазного трансформатора намотані в одному напрямку (а) і протилежних напрямках (б)

Якщо в трифазному трансформаторі обидві обмотки з'єднані в зірку і намотані в однаковому напрямі від початків до кінців фаз, то зсув між лінійними напругами AB і ab в даному разі дорівнює 0° . Отже, розглядуваний трансформатор належить до групи 12. Його повне позначення - $Y/Y-12$. Якщо у трифазного трансформатора групи 12 поміняти місцями початки і кінці фаз, наприклад, обмотки нижчої напруги, то буде трансформатор групи 6. Його позначають: $Y/Y-6$.

Трифазні трансформатори із з'єднанням обмоток Y/Y належать до груп 6 і 12, якщо на кожному стержні сердечника розміщені однойменні фази. Якщо ж у однієї з обмоток зробити колове переміщення позначень затискачів, наприклад замість $a-b-c$ зробити $b-c-a$ і потім $c-a-b$, то при кожному переміщенні будемо повертати зірку вторинних напруг на 120° і, отже, переходити від групи 12 до груп 4 і 8, а від групи 6 – до груп 10 і 2. Таким

чином, при з'єднанні обмоток Y/Y можемо одержати всі парні групи з'єднань: 2, 4, 6, 8, 10, 12.

При з'єднанні обмоток Y/Δ або Δ/Y можна одержати всі непарні групи: 1, 3, 5, 7, 9, 11. З дванадцяти можливих груп з'єднань обмоток трансформаторів стандартизовані дві: Y/Y-0 і Y/Δ-11. Вони, як правило, і застосовуються на практиці.

8.4. Автотрансформатори

У звичайних трансформаторах первинні й вторинні обмотки мають між собою тільки магнітний зв'язок. Іноді замість таких трансформаторів економічно доцільно застосовувати трансформатори, в яких первинні й вторинні обмотки мають теж електричний зв'язок. Такі трансформатори називають *автотрансформаторами*. В автотрансформаторах частина витків ω_1 первинної обмотки використовується як вторинна обмотка.

Їх застосовують в одно і трифазних колах, для підвищення і пониження напруги (рис. 8.6). Їх роблять для невеликих коефіцієнтів трансформації $k=1,25-2$. В цьому випадку вони вигідніші від звичайних двохобмоточних трансформаторів. Номінальною потужністю автотрансформатора вважають потужність

$$U_{1i} I_{1i} = U_{2i} I_{2i} = S_i.$$

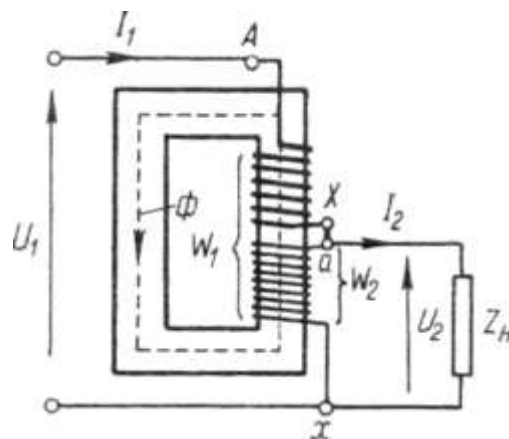


Рис. 8.6. Будова автотрансформатора

Прикладена до обмотки AX напруга U_1 зрівноважується в основному ЕРС E_1 . Електрорушійна сила $E_2 = E_1 \frac{\omega_2}{\omega_1}$ створює струм у вторинному колі, при цьому приблизно $U_2 = E_2$. Для роботи автотрансформатора справедливі такі співвідношення між потужностями, струмами, напругами і числами витків частин обмотки:

$$U_1 I_1 = U_2 I_2; \quad \frac{U_1}{U_2} = \frac{\omega_1}{\omega_2}; \quad \frac{I_1}{I_2} = \frac{\omega_2}{\omega_1}.$$

Для того, щоб порівняти автотрансформатор з двохобмоточним трансформатором, потрібно порівняти їх розрахункові потужності. Можна показати, що

$$S_a = S_i \left(1 - \frac{\omega_2}{\omega_1} \right),$$

де S_n – розрахункова потужність двохобмоточного трансформатора, S_a – розрахункова потужність автотрансформатора. Розміри автотрансформатора розраховуються для потужності S_a , а розміри двохобмоточного трансформатора розраховуються для потужності S_n .

Очевидно, автотрансформатор вигідніший у порівнянні з двохобмоточним трансформатором, чим ближче ω_1 до ω_2 , тобто чим ближче коефіцієнт трансформації до одиниці. При цьому автотрансформатор порівняно із звичайним трансформатором не тільки простіший за конструкцією (одна обмотка замість двох), а й дає значну економію міді й сталі та має вищий ККД.

Недоліком автотрансформатора є те, що в ньому вторинне коло, являється, електрично з'єднане з первинним колом. Воно повинно мати таку ж ізоляцію відносно землі, як і первинне коло. Ця обставина примушує вибирати значення коефіцієнта трансформації автотрансформатора при високих напругах, не вище 1,5–2. При $k > 2$ автотрансформатор стає невигідним через те, що обмотки високої і низької напруг з'єднані між собою електрично, отже, споживачі можуть опинитися під великим потенціалом. Це небезпечно і потребує спеціального захисту вторинного кола від перенапружень.

Автотрансформатори застосовуються як пускові для пуску великих синхронних двигунів, для освітлювальних установок, для зв'язку кіл з напругами, які мало відрізняються одна від одної.

Контрольні запитання до лекції № 8

1. Що таке трансформатор?
2. Що таке первинна і вторинна обмотки трансформатора?
3. Який трансформатор називають підвищувальним, а який знижувальним?
4. Яка будова трифазного трансформатора?
5. Як з'єднуються між собою обмотки трифазних трансформаторів?
6. Зобразіть схематично з'єднання обмоток трифазного трансформатора зіркою.
7. Зобразіть схематично з'єднання обмоток трифазного трансформатора трикутником.
8. Як позначаються групи з'єднань обмоток трансформатора?
9. Поясніть будову автотрансформатора. Чим він принципово відрізняється від звичайного трансформатора?
10. Чому дорівнює коефіцієнт трансформації автотрансформатора?

ЛІТЕРАТУРА

1. Брускин Д. Э., Зорохович А. Е., Хвостов В. С. Электрические машины: в 2 ч. М. : Высш. шк., 1987. 335 с.
2. Вольдек А. И. Электрические машины. М. : Энергия, 1978. 830 с.
3. Кацман М. М. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1990. 462 с.
4. Кевшин А. Г. Електричні машини : метод. рек. до вик. лаб. роб. Луцьк : ПП Іванюк В.П., 2016. 41 с.
5. Кевшин А. Г. Електротехніка : конспект лекцій. Луцьк : Вежа-Друк, 2016. 69 с.
6. Малинівський С. М. Загальна електротехніка. Львів : Ви-во Львів. політех., 2001. 596 с.
7. Метельський В. П. Електричні машини та мікро машини. Запоріжжя : ЗНТУ, 2005. 600 с.
8. Сергеенков Б. М., Киселев В. М., Акимова Н. А. Электрические машины. М. : Высш. шк., 1989. 352 с.
9. Токарев Б. Ф. Электрические машины. М. : Энергоатомиздат, 1990. 624 с.
10. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. Електричні машини. Ч. 1. Машини постійного струму. О. : ОДПУ, 2000. 120 с.
11. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. Трансформатори : навч. посіб. О. : Наука і техніка, 2001. 129 с.
12. Шевченко В. П., Белікова Л. Я. Машини змінного струму : навч. посіб. О. : Наука і техніка, 2005. 270 с.
13. Яцун М. А. Електричні машини. Львів : Ви-во Львів. політех, 2011. 464 с.

Навчальне видання

Кевшин Андрій Григорович
Федосов Сергій Анатолійович
Галян Володимир Володимирович

Електричні машини

Конспект лекцій

Друкується в авторській редакції