

Зміст

1. <u>Лекція №1</u>	
Вступ. Загальні відомості про електричні машини.....	2
Будова та різновиди трансформаторів.....	5
2. <u>Лекція №2</u>	
Тема: Робочий процес трансформаторів.....	9
Комплексні рівняння і векторна діаграма приведеного трансформатора..	12
3. <u>Лекція №3</u>	
Тема: Рівняння та схема заміщення трансформатора.....	16
Зовнішні характеристики, втрати та ККД трансформатора.....	18
4. <u>Лекція №4</u>	
Тема: Регулювання напруги трансформатора. Схеми з'єднання обмоток трансформаторів. Паралельна робота трансформаторів, багатообмоткові трансформатори	25

Лекція №1

Тема: «Вступ. Загальні відомості про електричні машини. Будова та різновиди трансформаторів»

Вступ. Загальні відомості про електричні машини.

Метою викладання дисципліни “Електричні машини” є отримання студентами теоретичних і практичних знань процесів електромагнітного та електромеханічного перетворення енергії, конструкцій та характеристик електричних машин і трансформаторів, а також впливу їх параметрів на експлуатаційні якості машин в стаціонарних та перехідних режимах їх роботи.

Класифікація

1. Класифікація за призначенням:

- 1.1) генератори – перетворюють механічну енергію в електричну. Їх установлюють на електричних станціях і різних транспортних установках: автомобілях, літаках, тепловозах, кораблях, пересувних електростанціях і ін. На електростанціях вони приводяться в обертання за допомогою могутніх парових і гідравлічних турбін, а на транспортних установках – від двигунів внутрішнього згоряння і газових турбін. У ряді випадків генератори використовують як джерела живлення в установках зв'язку, пристроях автоматики, вимірювальної техніки й ін.;
- 1.2) електричні двигуни – перетворюють електричну енергію в механічну. Вони приводять в обертання різні машини, механізми і пристрої, які використовуються в промисловості, сільському господарстві, зв'язку, на транспорті, у військовій справі і побуті. У сучасних системах автоматичного керування їх використовують у якості виконавчих, регулюючих і програмуючих органів;
- 1.3) електромашинні перетворювачі – перетворюють змінний струм у постійний і навпаки; змінюють величину напруги змінного і постійного струмів, частоту, число фаз і ін. Їх широко використовують у промисловості, на транспорті й у військовій справі, хоча в останнє десятиліття роль електромашинних перетворювачів істотно зменшилася внаслідок застосування статичних напівпровідникових перетворювачів;
- 1.4) електромашинні компенсатори – здійснюють генерування реактивної потужності в електричних установках для поліпшення енергетичних показників джерел і приймачів електричної енергії;
- 1.5) електромашинні підсилювачі – використовуються для керування об'єктами відносно великої потужності за допомогою електричних сигналів малої потужності, які подаються на їхні обмотки збудження (керування). Роль електромашинних підсилювачів останнім часом також зменшилася через широке застосування підсилювачів, виконаних на напівпровідникових елементах (транзисторах, тиристорах);

1.6) електромеханічні перетворювачі сигналів – генерують, перетворюють й підсилюють різні сигнали. Їх виконують звичайно у вигляді електричних мікромашин і широко використовують у системах автоматичного регулювання, вимірювальних і лічильно-обрахункових пристроях як різні сенсори, диференціюючих і інтегруючих елементів, порівнюючих і регулюючих органів і ін.

2. Класифікація за видом струму і принципом дії

Електричні машини за видом струму поділяють на машини змінного (МЗС) і постійного струму (МПС). МЗС в залежності від принципу дії й особливостей електромагнітної системи підрозділяють на трансформатори, асинхронні, синхронні і колекторні машини.

2.1. Трансформатори широко застосовують для перетворення напруги: у системах передачі і розподілу електричної енергії, у випрямних установках, пристроях зв'язку, автоматики й обчислювальної техніки, а також при електричних вимірах (вимірювальні трансформатори) і функціональних перетвореннях (обертіві трансформатори).

2.2. Асинхронні машини використовують головним чином як електричні двигуни (ЕД) трифазного струму. Простота і висока надійність дозволяють застосовувати їх у різних галузях техніки для приводу верстатів, вантажопідйомних і землерийних машин, компресорів, вентиляторів і ін. У системах автоматичного регулювання широко використовують одно- і двофазні керовані АД, асинхронні тахогенератори, а також сельсини.

2.3. Синхронні машини застосовують як генератори змінного струму промислової частоти на електричних станціях і генераторів підвищеної частоти в автономних джерелах живлення (на кораблях, літаках і т.п.). В електричних приводах великої потужності застосовують також СД. У пристроях автоматики широко використовують різні СМ малої потужності (реактивні, з постійними магнітами, гістерезисні, крокові, індукторні й ін.).

2.4. Колекторні машини ЗС використовують порівняно рідко і головним чином як ЕД. Вони мають складну конструкцію і вимагають ретельного догляду. У пристроях автоматики, а також у різного роду електро побутових приладах застосовують універсальні колекторні двигуни, що працюють як на постійному, так і на змінному струмі.

2.5. Машини постійного струму застосовують як генератори й електродвигуни у пристроях електропривода, які вимагають регулювання частоти обертання в широких межах: залізничний і морський транспорт, прокатні стани, електротрансмисії великовантажних автомобілів, вантажопідйомні і землерийні машини, складні металообробні верстати й ін., а також у тих випадках, коли джерелами електричної енергії для живлення ЕД служать акумуляторні батареї (стартерні двигуни, двигуни підводних човнів, космічних кораблів і т.п.).

Останнім часом ГПС замінюються ГЗС, що працюють разом з напівпровідниковими випрямлячами.

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

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

- силові мікро двигуни – приводять в обертання різні механізми автоматичних пристроїв, самописних приладів і ін.;
- керовані (виконавчі) двигуни – перетворюють підведений до них електричний сигнал у механічне переміщення вала, тобто відпрацьовують відповідні команди;
- тахогенератори – перетворюють механічне обертання вала в електричний сигнал – напругу, пропорційну частоті обертання вала;
- оберткові трансформатори – дають на виході напругу, пропорційну тій чи іншій функції кута повороту ротора, наприклад синусові або косинусові цього кута або самому куту;
- машини синхронного зв'язку (сельсини, магнесини) – здійснюють синхронний і синфазний поворот або обертання декількох механічно не зв'язаних між собою осей;
- мікромашини гіроскопічних приладів (гіроскопічні двигуни, сенсори кута, сенсори моменту) – здійснюють обертання роторів гіроскопів з високою частотою і корекцію їхнього положення;
- електромашинні перетворювачі і підсилювачі.

Електричні мікромашини перших двох груп часто називають силовими, а третьої – п'ятої груп – інформаційними.

3. Класифікація по потужності:

- мікромашини (потужність від долей вата до 500 Вт. Працюють як на постійному, так і на змінному струмі нормальної і підвищеної (400-2000 Гц) частоти);
- машини малої потужності (від 0,5 до 10 кВт. Працюють як на постійному, так і змінному струмі нормальної або підвищеної частоти);
- середньої потужності (від 10 кВт до декількох сотень кіловатів);
- великої потужності (понад декілька сотень кіловатів).

Машини великої і середньої потужності звичайно призначають для роботи на постійному або змінному струмі нормальної частоти.

4. Класифікація по частоті обертання:

- тихохідні (до 300 об/хв.);
- середньохідні (300–1500 об/хв.);
- швидкохідні (1500–6000 об/хв.);
- зверхшвидкохідні (понад 6000 об/хв.).

Мікромашини виконують для частот обертання від декількох об/хв до 60000 об/хв; машини великої і середньої потужності – звичайно до 3000 об/хв.

Будова та різновиди трансформаторів.

2.1. Призначення й області застосування трансформаторів

Трансформатором називають статичний електромагнітний пристрій, що має дві або більше число індуктивно зв'язаних обмоток і призначений для перетворення за допомогою електромагнітної індукції однієї або декількох систем змінного струму в одну або кілька інших систем змінного струму.

За допомогою трансформаторів підвищується або знижується напруга, змінюється число фаз, а в деяких випадках перетворюється частота змінного струму.

Можливість передачі електричних сигналів від однієї обмотки до іншої за допомогою взаємоіндукції була відкрита *М. Фарадеєм* у 1831 р.; при зміні струму в одній з обмоток, намотаної на сталевий магнітопровід, в іншій обмотці індукувалась ЕРС. Однак перший практично працюючий трансформатор створив відомий винахідник *П. Н. Яблочков* у співдружності з *И. Ф. Усагіним* у 1816 р. Це був двообмотувальний трансформатор з розімкнутим магнітопроводом.

Трансформатори широко використовують для наступних цілей.

1. Для передачі і розподілу електричної енергії. Звичайно на електростанціях генератори змінного струму виробляють електричну енергію напругою 6-24 кВ. Передавати ж електроенергію на далекі відстані вигідно при великих напругах, тому на кожній електростанції встановлюють трансформатори, що підвищують напругу.

Електрична енергія розподіляється між промисловими підприємствами і населеними пунктами, у містах і сільських місцевостях, а також усередині промислових підприємств по повітряних і кабельних лініях при напрузі 220, 110, 35, 20, 10 і 6 кВ. Отже, у всіх вузлах розподільних мереж повинні бути встановлені трансформатори, що знижують напругу. Крім того, понижуючі трансформатори варто встановлювати в пунктах споживання електроенергії, тому що більшість електричних споживачів змінного струму працює при напругах 220, 320 і 60 В. Таким чином, електрична енергія при передачі від електричних станцій до споживачів піддається в трансформаторах багаторазовому перетворенню (3–5 разів). Застосовувані для цих цілей трансформатори можуть бути одно-и трифазними, двох- і трехобмоточними.

2. Для забезпечення потрібної схеми включення вентилів у перетворювальних пристроях і узгодження напруг на вході і виході перетворювача. У вентильних перетворювачах, що випрямляють змінний струм або перетворюють його з постійного в змінний (інвертори), відношення напруг на вході і виході залежить від схеми включення вентилів. Тому якщо на вхід перетворювача подається стандартна напруга, то на виході виходить нестандартна. Для усунення цього недоліку вентильні перетворювачі, як правило, постачають трансформаторами, що забезпечують стандартну вихідну напругу при прийнятій схемі включення вентилів. Крім того, ряд схем включення вентилів вимагає обов'язкового застосування трансформатора. Трансформатори, застосовувані для цієї мети,

називають *перетворювальними*. Їхня потужність досягає тисяч кіловольт-амперів, напруга 110 кВ; вони працюють при частоті 50 Гц і більш. Розглянуті трансформатори виконують одно-, трьох- і багатофазними з регулюванням вихідної напруги в широких межах і без регулювання.

3. Для різних технологічних цілей: зварювання (зварювальні трансформатори), живлення електротермічних установок (електропічні трансформатори) і ін. Потужність їх досягає десятків тисяч кіловольт-ампер при напрузі до 10 кВ; вони працюють звичайно при частоті 50 Гц.

4. Для живлення різних кіл радіо- і телевізійної апаратури; пристроїв зв'язку, автоматики і телемеханіки, електропобутових приладів; для розділення електричних кіл різних елементів цих пристроїв; для узгодження напруг і т.п. Трансформатори, використовувані в цих пристроях, звичайно мають малу потужність (від декількох вольт-амперів до декількох кіловольт-амперів), невисоку напругу, працюють при частоті 50 Гц і більш. Їх виконують двох-, трьох- і багатообмотувальними; умови роботи, які вимагаються до них, вимоги і принципи проектування досить специфічні.

5. Для включення електровимірювальних приладів і деяких апаратів, наприклад реле, в електричні кола високої напруги або в кола, по яких проходять великі струми, з метою розширення меж виміру і забезпечення електробезпечності. Трансформатори, застосовувані для цієї мети, називають *вимірювальними*. Вони мають порівняно невелику потужність, обумовлену потужністю, споживаної електровимірювальними приладами, реле й ін.

Трансформатори, перераховані в п. 1, 2, 3 і частково в п. 4, призначені для перетворення електричної енергії в мережах енергосистем і споживачів електричної енергії, називають *силовими*. Для режиму їхньої роботи характерна незмінна частота змінного струму і дуже малі відхилення первинної і вторинної напруг від номінальних значень.

Силові трансформатори, що випускаються вітчизняними заводами, розділені на кілька груп (габаритів) від I до VIII. Наприклад, трансформатори потужністю до 100 кв-А включно відносять до габариту I, від 160 до 30 до габариту II, від 1000 до 300 кв-А - до габариту III і т.п.

2. Принцип дії трансформатора

Електромагнітна схема однофазного двообмоткового трансформатора складається з двох обмоток (рис. 2.1), розміщених на замкнутому магнітопроводі, що виконаний з феромагнітного матеріалу. Застосування феромагнітного магнітопроводу дозволяє підсилити електромагнітний зв'язок між обмотками, тобто зменшити магнітний опір контуру, по якому проходить магнітний потік машини. Первинну обмотку I підключають до джерела змінного струму – електричної мережі з напругою u_1 . До вторинної обмотки 2 приєднують опір навантаження Z_H .

Обмотку більш високої напруги називають *обмоткою високої напруги* (ВН), а низької напруги – *обмоткою низької напруги* (НН). Початки і кінці обмотки ВН позначають буквами A і X ; обмотки НН – буквами a і x .

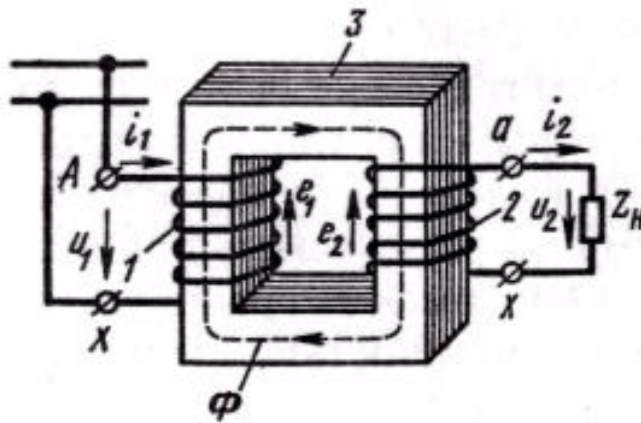


Рис. 2.1. Електромагнітна система однофазного трансформатора: 1,2 – первинна і вторинна обмотки; 3 – магнітопровід

При підключенні до мережі в первинній обмотці виникає змінний струм i_1 , що створює змінний магнітний потік Φ , що замикається по магнітопроводу. Потік Φ індукуює в обох обмотках змінні ЕРС – e_1 і e_2 , пропорційні, відповідно до закону Максвелла, числам витків w_1 і w_2 відповідної обмотки і швидкості зміни потоку $d\Phi/dt$. Таким чином, миттєві значення ЕРС, індуковані в кожній обмотці,

$$e_1 = -w_1 d\Phi/dt; e_2 = -w_2 d\Phi/dt.$$

Отже, відношення миттєвих і діючих ЕРС в обмотках визначається вираженням

$$E_1/E_2 = e_1/e_2 = w_1/w_2. \quad (2.1)$$

Якщо зневажити спадами напруги в обмотках трансформатора, що звичайно не перевищують 3–5% від номінальних значень напруг U_1 і U_2 , і вважати $E_1 \approx U_1$ й $E_2 \approx U_2$, то одержимо

$$U_1/U_2 \approx w_1/w_2. \quad (2.2)$$

Отже, підбираючи відповідним чином числа витків обмоток, при заданій напрузі U_1 , можна одержати бажану напругу U_2 . Якщо необхідно підвищити вторинну напругу, то число витків w_2 беруть більшим числа w_1 ; такий трансформатор називають пoviшаючим. Якщо потрібно зменшити напругу U_2 , то число витків w_2 беруть меншим w_1 ; такий трансформатор називають понижаючим.

Відношення ЕРС $E_{вн}$ обмотки вищої напруги до ЕРС $E_{нн}$ обмотки нижчої напруги (або відношення їхніх чисел витків) називають коефіцієнтом трансформації

$$k = E_{вн}/E_{нн} = w_{вн}/w_{нн}. \quad (2.3)$$

Коефіцієнт k завжди більший одиниці.

У системах передачі і розподілу енергії в ряді випадків застосовують триобмоточні трансформатори, а в пристроях радіоелектроніки й автоматики –

багатообмоточні трансформатори. У таких трансформаторах на магнітопроводі розміщують три або більше ізольованих одна від іншої обмоток, що дає можливість при живленні однієї з обмоток одержувати дві або більше різних напруг для електропостачання двох або більшого числа груп споживачів. У триобмоточних силових трансформаторах розрізняють обмотки вищих, нижчих і середньої (СН) напруг.

У трансформаторі перетворюються тільки напруги і струми. Потужність же залишається приблизно постійною (вона трохи зменшується через внутрішні втрати енергії в трансформаторі). Отже,

$$I_1/I_2 \approx U_2/U_1 \approx w_2/w_1. \quad (2.4)$$

При збільшенні вторинної напруги трансформатора в k раз у порівнянні з первинною, струм i_2 у вторинній обмотці відповідно зменшується в k раз.

Трансформатор може працювати тільки в колах перемінного струму. Якщо первинну обмотку трансформатора підключити до джерела постійного струму, то в його магнітопроводі утвориться магнітний потік, постійний у часі за величиною і напрямком. Тому в первинній і вторинній обмотках у сталому режимі не індукується ЕРС, а отже, не передається електрична енергія з первинного кола у вторинне. Такий режим небезпечний для трансформатора, тому що через відсутність ЕРС E_1 у первинній обмотці струм $I_1=U_1/R_1$ досить великий.

Важливою властивістю трансформатора, використовуваним у пристроях автоматики і радіоелектроніки, є здатність його перетворювати навантажувальний опір. Якщо до джерела змінного струму підключити опір R через трансформатор з коефіцієнтом трансформації k , то для кола джерела

$$R' = P_1/I_1^2 \approx P_2/I_1^2 \approx I_2^2 R/I_1^2 \approx k^2 R,$$

де P_1 – потужність, споживана трансформатором від джерела змінного струму, Вт; $P_2=I_2^2 R \approx P_1$ – потужність, споживана опором R від трансформатора.

Таким чином, *трансформатор змінює значення опору R у k^2 разів.* Цю властивість широко використовують при розробці різних електричних схем для узгодження опорів навантаження з внутрішнім опором джерел електричної енергії.

Лекція №2

Тема: «Робочий процес трансформаторів.

Комплексні рівняння і векторна діаграма приведенного трансформатора»

Робочий процес трансформаторів.

Для з'ясування сутності фізичних процесів, що відбуваються в трансформаторі, розглянемо ідеалізований трансформатор, у якого магнітний потік Φ повністю замикається по сталевому магнітопроводу і зчеплений з обома обмотками, а втрати в сталі відсутні. До первинної обмотки трансформатора (рис. 3.1, а) підводиться синусоїдальна напруга $u_1 = U_m \sin \omega t$, завдяки чому по цій обмотці проходить змінний струм, що створює змінний магнітний потік. Змінний потік наводить в обмотках трансформатора ЕРС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$; $e_2 = -w_2 d\Phi/dt$.

У режимі холостого ходу коло вторинної обмотки розімкнуте і струм $i_2 = 0$. При цьому для контуру первинної обмотки трансформатора

$$u_1 = i_1 r_1 + w_1 d\Phi/dt, \quad (3.1)$$

де u_1 – миттєве значення прикладеної до первинної обмотки напруги.

Рівняння (3.1) справедливе, якщо прийняти, що не тільки $i_2 = 0$, але і відсутні втрати в сталі магнітопроводу (від вихрових струмів і гістерезису); інакше ці втрати повинні були б враховуватися у виді втрат від струму, що проходить по замкнутій накоротко вторинній обмотці з великим активним опором. Вводячи у формулу (3.1) значення ЕРС $e_1 = -w_1 d\Phi/dt$, індукованої у первинній обмотці змінним магнітним потоком, і нехтуючи спадом напруги в активному опорі первинної обмотки $i_1 R_1$ через його малість, одержуємо

$$u_1 + e_1 = 0, \quad (3.2)$$

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

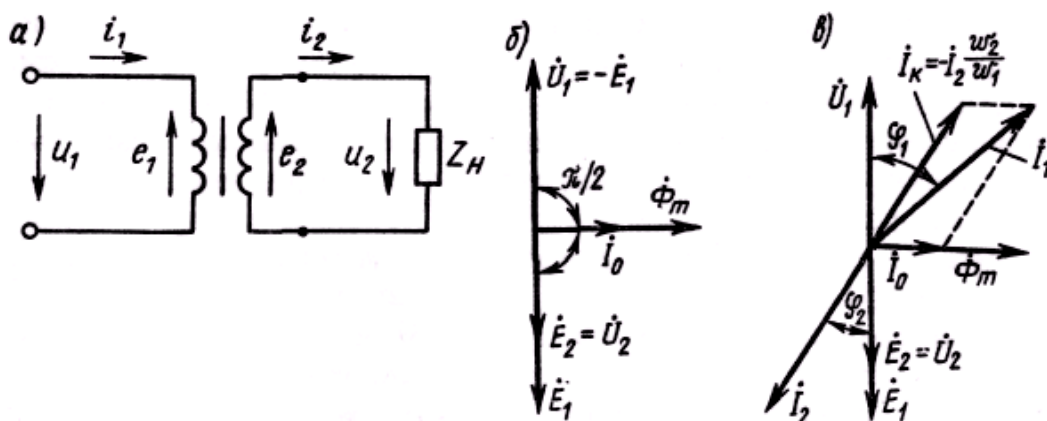


Рис. 3.1. Схема включення (а) і векторні діаграми (б, в) ідеалізованого трансформатора

Якщо напруга живлення u_1 змінюється по синусоїдальному законі $u_1 = U_{1m} \sin \omega t$, то магнітний потік також змінюється синусоїдально, відстаючи по фазі від прикладеної напруги на кут 90° ,

$$\Phi = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t dt = -\Phi_m \cos \omega t + C = \Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Можна показати, що постійна інтегрування в сталому режимі $C=0$. Зв'язок між ЕРС і магнітним потоком визначається з рівняння

$$e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} \left[\Phi_m \sin \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) \right] = -w_1 \omega \Phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right) = \\ = 2\pi f w_1 \Phi_m \cos \left(\omega t - \frac{\pi}{2} \right),$$

і виражається для амплітудного значення ЕРС формулою $E_{1m} = 2\pi f w_1 \Phi_m$ або для діючого значення формулою

$$E_1 = 4,44 f w_1 \Phi_m. \quad (3.3)$$

Враховуючи синусоїдальний характер зміни напруги u_1 і ЕДС e_1 , рівняння (3.2) можна представити в комплексній формі:

$$\dot{U} + \dot{E}_1 = 0. \quad (3.4)$$

Рівняння (3.4) справедливе для ідеалізованого трансформатора, у якому пренебрежимо малий активний опір обмоток і відсутні втрати в сталі магнітопроводу. Однак, незважаючи на прийняті припущення, воно правильно визначає сутність якісних процесів, що відбуваються в трансформаторі, і тому є одним з фундаментальних у теорії електричних машин. Кількісні помилки, викликані ідеалізацією трансформатора, можна завжди досить легко підрахувати.

Припустивши, що насичення в сталі трансформатора відсутній і весь магнітний потік замикається по сталевому магнітопроводі, можна вважати струм первинної обмотки ідеалізованого трансформатора прямо пропорційним магнітному потокові. У зв'язку з цим на векторній діаграмі ідеалізованого трансформатора в режимі холостого ходу (рис. 3.1,б) струм холостого ходу \dot{I}_0 зображений вектором, що збігається за напрямком з вектором магнітного потоку Φ_m . На цій же діаграмі вектори ЕРС E_1 і напруги U_1 показані в протифазі відповідно до рівняння (3.4), а вектор магнітного потоку Φ_m випереджає вектор ЕРС на 90° . Оскільки магнітний потік не має діючого значення, на діаграмі показане його амплітудне значення. Там же показаний вектор ЕРС E_2 , що збігається по фазі з вектором E_1 , тому що ЕРС E_2 індукується тим же самим магнітним потоком, що й E_1 , і може бути визначена по формулі

$$E_2 = 4,44 f w_2 \Phi_m. \quad (3.5)$$

При роботі під навантаженням для первинної обмотки ідеалізованого трансформатора можна написати рівняння

$$u_1 = w_1 \frac{d\Phi_1}{dt} + w_1 \frac{d\Phi_2}{dt} = w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2),$$

де Φ_1 і Φ_2 – потоки, створювані струмами первинних і вторинної, обмоток.

Позначаючи, як і при неодруженому ході, $e_1 = -w_1 \frac{d}{dt} (\Phi_1 + \Phi_2)$, одержуємо

$$u_1 + e_1 = 0,$$

тобто таке ж співвідношення, що і при холостому ході. Очевидно, якщо первинна напруга при навантаженні ідеалізованого трансформатора залишається незмінною, то величина ЕРС e_1 така ж, як і при холостому ході. Отже, що результуючий потік при навантаженні дорівнює поточкові при холостому ході:

$$\Phi_1 + \Phi_2 = \Phi_0,$$

або в комплексній формі

$$\dot{\Phi}_{m1} + \dot{\Phi}_{m2} = \dot{\Phi}_{m0}. \quad (3.6)$$

Незмінність магнітного потоку при переході від режиму холостого ходу до режиму навантаження є найважливішою властивістю трансформатора. З цієї властивості випливає закон рівноваги магніторушійних сил (МРС) у трансформаторі:

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0, \quad (3.7)$$

де F_1 і F_2 – МРС, створювані первинною і вторинною обмотками трансформатора при навантаженні; F_0 – МРС, створювана первинною обмоткою при холостому ході.

При змінному струмі оперують з амплітудами МРС; при цьому з (3.7) випливає, що

$$\sqrt{2} \dot{I}_1 w_1 + \sqrt{2} \dot{I}_2 w_2 = \sqrt{2} \dot{I}_0 w_1$$

або

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + [-\dot{I}_2 (w_2/w_1)]. \quad (3.8)$$

Для наочності рівняння (3.8) можна представити інакше:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + \dot{I}_{кв} \quad (3.9)$$

де $\dot{I}_k = -\dot{I}_2 (w_2/w_1)$ – навантажувальна складова струму первинної обмотки (компенсаційний струм).

Таким чином, МРС, створювана струмом I_k , дорівнює по величині і протилежна по фазі МРС вторинної обмотки, тобто компенсує МРС вторинної обмотки. Це обумовлює незмінність магнітного потоку трансформатора. Векторна діаграма ідеалізованого трансформатора, що працює під навантаженням, показана на рис. 3.1, в. Потужність навантажувальної складової первинного струму дорівнює потужності, що віддається трансформатором навантаженню, оскільки

$$I_k E_1 \cos \varphi_2 = I_2 (w_2/w_1) E_2 (w_1/w_2) \cos \varphi_2 = I_2 E_2 \cos \varphi_2.$$

Отже, навантажувальна складова струму I_1 не тільки врівноважує МРС вторинної обмотки, але і забезпечує надходження в трансформатор з мережі потужності, що віддається приймачеві електричної енергії, підключеному до вторинної обмотки.

Основні закономірності роботи ідеалізованого трансформатора справедливі і для реальних трансформаторів.

Комплексні рівняння і векторна діаграма приведенного трансформатора.

У реальному трансформаторі крім основного магнітного потоку Φ , що замикається по сталі і зчепленого з всіма обмотками трансформатора, є також потоки розсіювання $\Phi_{\sigma 1}$ і $\Phi_{\sigma 2}$ (рис. 5.1), що зчеплені тільки з однієї з обмоток. Потоки розсіювання не беруть участь у передачі енергії, але створюють у кожній з обмоток відповідні ЕРС самоіндукції $E_{\sigma 1} = 4,44 f w_1 \Phi_{\sigma 1 m}$; $E_{\sigma 2} = 4,44 f w_2 \Phi_{\sigma 2 m}$.

З врахуванням ЕРС самоіндукції і спадів напруги в активних опорах обмоток можна скласти комплексні рівняння для первинної і вторинної обмоток трансформатора. Враховуючи (3.8)

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_0 + [-\dot{I}_2 (w_2/w_1)]. \quad (3.8)$$

одержимо наступну систему рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{\sigma 1} &= \dot{I}_1 R_1; \\ \dot{E}_2 + \dot{E}_{\sigma 2} &= \dot{I}_2 R_2 + \dot{I}_2 Z_H; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 + (-\dot{I}_2 w_2/w_1), \end{aligned} \right\} \quad (5.1)$$

де Z_H – опір навантаження, підключений до трансформатора.

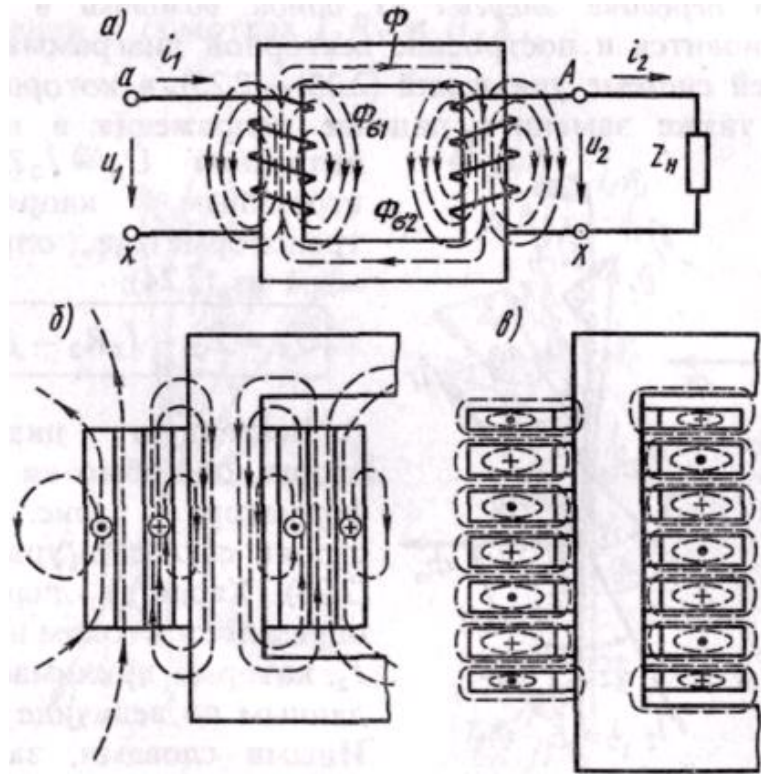


Рис. 5.1. Схема магнітних потоків у трансформаторі (а) і розподіл потоків розсіювання при концентричній (б) і що чергується (в) обмотках

Оскільки потоки розсіювання повністю або частково замикаються по повітрю, вони пропорційні МРС відповідних обмоток або відповідних струмів:

$$E_{\sigma 1} = I_1 X_1; E_{\sigma 2} = I_2 X_2. \quad (5.2)$$

Величини X_1 і X_2 називають індуктивними опорами обмоток трансформатора, обумовленими потоками розсіювання.

Оскільки вектори ЕРС $\dot{E}_{\sigma 1}$ і $\dot{E}_{\sigma 2}$ відстають від відповідних потоків і струмів на 90° , то

$$\dot{E}_{\sigma 1} = -j\dot{I}_1 X_1; \dot{E}_{\sigma 2} = -j\dot{I}_2 X_2. \quad (5.3)$$

При цьому комплексні рівняння трансформатора приймуть вид

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{I}_1 Z_1; \quad (5.4)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 Z_H = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_H; \quad (5.5)$$

$$\dot{I}_1 + (-\dot{I}_2 w_2/w_1) = \dot{I}_0. \quad (5.6)$$

Заміна ЕРС $\dot{E}_{\sigma 1}$ і $\dot{E}_{\sigma 2}$ спадами напруг $-j\dot{I}_1 X_1$ і $-j\dot{I}_2 X_2$ наочно показує роль потоків розсіювання: вони створюють індуктивні спади напруг в обмотках, не беручи участь у передачі енергії з однієї обмотки в іншу. Простіше стає і побудова векторної діаграми, що відповідає системі рівнянь (5.4)–(5.6), у якій

доцільно також замінити спад напруги в навантаженні величиною тобто вторинною напругою трансформатора, що визначається з (5.5):

$$\dot{U}_2 = \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2. \quad (5.7)$$

Векторну діаграму вторинної обмотки трансформатора (рис. 5.2, а) будують відповідно до рівняння (5.7). Характер діаграми визначається струмом навантаження I_2 , що приймається заданим по величині і фазі. Іншими словами, задаючи векторами вторинних струмів I_2 і напруги U_2 , можна побудувати вектор ЕРС

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_2 + \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2, \quad (5.8)$$

якщо відомі параметри трансформатора. Вектор $\dot{I}_2 R_2$ паралельний векторові струму \dot{I}_2 , а вектор $j\dot{I}_2 X_2$ випереджає вектор струму \dot{I}_2 на кут 90° .

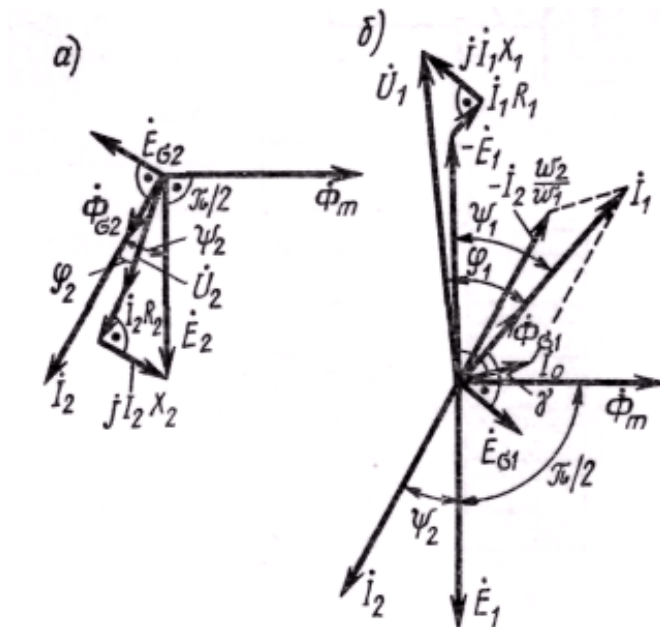


Рис.5.2. Векторні діаграми обмоток трансформатора при активно-індуктивному навантаженні

На діаграмі зображений і вектор магнітного потоку $\dot{\Phi}_m$, який випереджає вектор ЕРС E_2 на 90° .

Векторну діаграму первинної обмотки трансформатора (рис. 5.2,б) будують відповідно до рівняння

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1. \quad (5.9)$$

Побудову діаграми починають з вектора потоку $\dot{\Phi}_m$, який створюється струмом холостого ходу \dot{I}_0 , цей струм випереджає вектор потоку $\dot{\Phi}_m$ на кут $\gamma=5\div 10^\circ$. Вектор ЕРС \dot{E}_1 , як і \dot{E}_2 , відстає від потоку $\dot{\Phi}_m$ на кут 90° . Струм у

первинній обмотці трансформатора $\vec{I}_1 = \vec{I}_0 + (-I_2 w_2 / w_1)$, тому на рис. 5.2,б потрібно показати і вектор струму I_2 , зсунутий на кут ψ_2 відносно вектора \vec{E}_1 , (вектори \vec{E}_1, \vec{E}_2 збігаються по напрямку). Знаючи I_2 , можна зобразити вектор $-I_2 w_2 / w_1$ і одержати вектор \vec{I}_1 як суму векторів \vec{I}_0 і $-I_2 w_2 / w_1$.

Знайшовши вектор струму \vec{I}_1 , можна визначити значення векторів $\vec{I}_1 R_1$ і $j\vec{I}_1 X_1$ і побудувати шуканий вектор напруги \vec{U}_1 як суму трьох складових: векторів $-\vec{E}_1$ і падінь напруг в обмотках $\vec{I}_1 R_1$ і $j\vec{I}_1 X_1$.

Доцільніше будувати загальну діаграму трансформатора для його первинної і вторинної обмоток (рис. 5.3, а, б), хоча ці обмотки і не зв'язані між собою електрично.

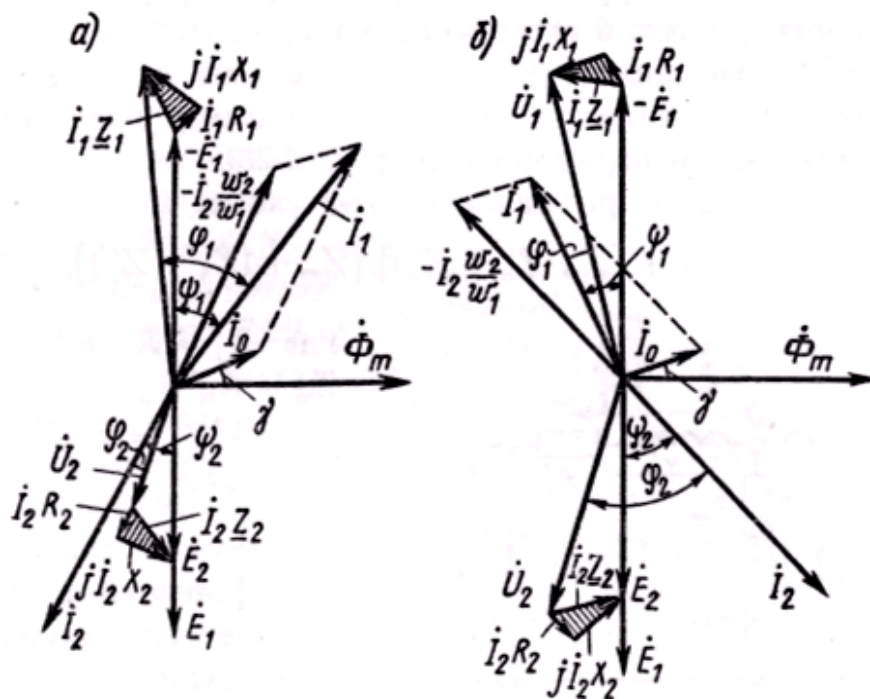


Рис. 5.3. Повні векторні діаграми трансформатора при активно-індуктивному (а) і активно-ємнісному (б) навантаженнях

Лекція №3

Тема: «Рівняння та схема заміщення трансформатора. Зовнішні характеристики, втрати та ККД трансформатора»

Рівняння та схема заміщення трансформатора.

6.1. Складання схеми заміщення

Систему рівнянь (5.4)–(5.6)

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 = \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1 = \dot{I}_1 Z_1; \quad (5.4)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 R_2 + j\dot{I}_2 X_2 + \dot{I}_2 Z_{\text{н}} = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{I}_2 Z_{\text{н}}; \quad (5.5)$$

$$\dot{I}_1 + (-\dot{I}_2 w_2/w_1) = \dot{I}_0. \quad (5.6)$$

що описує електромагнітні процеси в трансформаторі, можна звести до одного рівняння, якщо врахувати, що $E_1 = kE_2$, і покласти

$$\dot{E}_1 = \dot{I}_0 Z_m = \dot{I}_0 (R_m + jX_m). \quad (6.1)$$

При цьому параметри R_m і X_m варто вибрати так, щоб у режимі холостого ходу, коли ЕРС E_1 практично дорівнює номінальній напрузі U_1 , струм

$$\dot{I}_0 = \dot{E}_1 / (R_m + jX_m) = \dot{E}_1 / Z_m \quad (6.2)$$

по модулі дорівнював би діючому значенню струму холостого ходу, а потужністю $I_0 \dot{E}_1 \cos \varphi_0 = I_0 R_m^2$ – потужності, що забирається трансформатором з мережі при холостому ході.

Вирішимо систему рівнянь (5.4)–(5.6) відносно первинного струму

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + [Z_m(k^2 Z_{\text{н}} + k^2 Z_2)]/[Z_m + (k^2 Z_{\text{н}} + k^2 Z_2)]} = \frac{\dot{U}_1}{Z_{\text{зкв}}}. \quad (6.3)$$

Відповідно до рівняння (6.3) трансформатор можна замінити електричною схемою, по якій можна визначити струми I_1 і I_2 , потужність P_1 , що споживається з мережі, потужність втрат ΔP і т.д. Таку електричну схему називають *схемою заміщення трансформатора* (рис. 6.1).

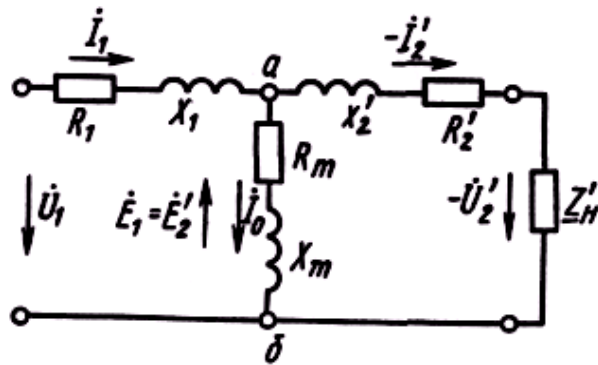


Рис. 6.1. Схема заміщення трансформатора

Еквівалентний опір цієї схеми

$$Z_{\text{зкв}} = Z_1 + [Z_m (Z'_H + Z'_2)] / [Z_m + (Z'_H + Z'_2)], \quad (6.4)$$

$$\text{где } Z_1 = R_1 + jX_1;$$

$$Z_m = R_m + jX_m;$$

$$Z'_2 = k^2 Z_2 = k^2 (R_2 + jX_2);$$

$$Z'_H = k^2 Z_H.$$

Схема заміщення трансформатора являє собою сполучення двох схем заміщення – первинної і вторинної обмоток, що з'єднані між собою в точках *a* і *б*.

У колі первинної обмотки включені опори R_1 і X_1 , а в колі вторинної обмотки – опори R'_2 в X'_2 . Ділянку схеми заміщення між точками *a* і *б*, по якому проходить струм I_0 , називають *намагнічувальним контуром*. На вхід схеми заміщення подають напругу \dot{U}_1 , до виходу її підключають змінний опір навантаження Z'_H , до якого прикладена напруга $-\dot{U}'_2$.

Опори Z'_2 (і його складові $R'_2 = R_2 k^2$ і $X'_2 = X_2 k^2$), а також Z'_H називають відповідно *опорами вторинної обмотки і навантаження, приведеними до первинної обмотки*. Аналогічно приведеними називають значення ЕРС і струму: $E'_2 = kE_2 = E_1$; $I'_2 = I_2/k$.

Повна потужність *приведеного контуру вторинної обмотки* в схемі заміщення дорівнює потужності вторинної обмотки реального трансформатора: $I'_2 E'_2 = (I_2/k) E_2 k = I_2 E_2$, а потужність електричних втрат у приведеному вторинному контурі цієї схеми дорівнює потужності втрат у вторинній обмотці реального трансформатора: $I'^2_2 R'_2 = (I_2/k)^2 R_2 k^2 = I^2_2 R_2$.

Відносні падіння напруг в активному й індуктивному опорах приведеного вторинного контуру також залишаються незмінними, як і в реальному трансформаторі :

$$I'_2 R'_2 / E'_2 = (I_2/k) k^2 R_2 / (k E_2) = I_2 R_2 / E_2;$$

$$I'_2 X'_2 / E'_2 = (I_2/k) k^2 X_2 / (k E_2) = I_2 X_2 / E_2.$$

Фізично перехід від реального трансформатора до імітуючої його електричної схеми заміщення можна наочно представити чотирма етапами (рис. 6.2).

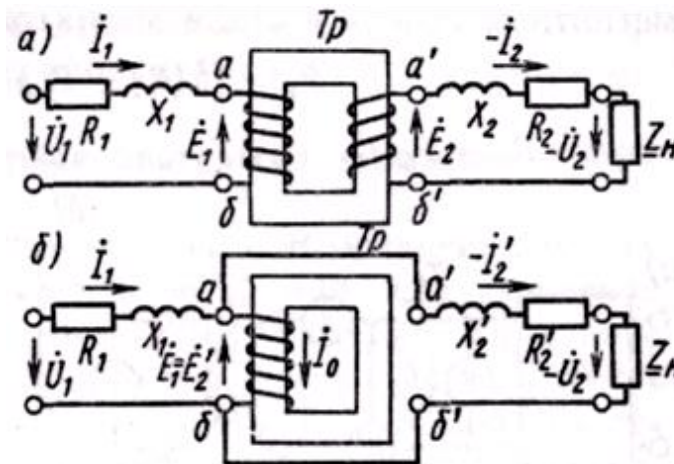


Рис. 6.2. Еквівалентні схеми для приведення вторинної обмотки до первинної

1-й етап. Реальний трансформатор заміняють ідеалізованим трансформатором T_p , у коло первинної обмотки якого включають опори R_1 і X_1 , а в коло вторинної обмотки – R_2 і X_2 (рис. 6.2, а).

2-й етап. Параметри вторинної обмотки приводять до параметрів первинної, у результаті чого ЕРС обмоток виявляються рівними: $E_1 = E'_2$.

3-й етап. З'єднують еквіпотенціальні a і a' ; b і b' (рис. 6.2, б)

4-й етап. Включають додатковий намагнічувальний контурпо якому проходить складова I_0 первинного струму.

На практиці приводять як вторинну обмотку до первинної, так і первинну до вторинної, у залежності від того, які процеси цікавлять інженера. Відзначимо, що параметри схеми заміщення можна вважати постійними тільки при невеликих змінах первинної напруги, тобто в межах $+10\%$. Це в першу чергу відноситься до намагнічувального контуру з опором $Z_m = R_m + jX_m$, параметри якого визначають струм I_0 . Зі збільшенням напруги відбувається насичення сталі магнітопроводу, унаслідок чого зменшується величина X_m (намагнічувальний струм різко зростає).

Зовнішні характеристики, втрати та ККД трансформатора.

Зовнішні характеристики

Залежність $U_2 = f(I_2)$ або $U_2 = f(\beta)$ при $U_1 = U_{1\text{ном}} = \text{const}$, $f = f_{\text{ном}} = \text{const}$ і $\cos\varphi_2 = \text{const}$ називають *зовнішньою характеристикою трансформатора*. Для її побудови можна використовувати формулу

$$U'_2 = U_{1\text{ном}} (1 - \Delta u/100) = U_{1\text{ном}} [1 - \beta (u_{\text{к.а}} \cos \varphi_2 + u_{\text{к.р}} \sin \varphi_2)/100 - \beta^2 (u_{\text{к.р}} \cos \varphi_2 - u_{\text{к.а}} \sin \varphi_2)^2/20000]. \quad (8.7)$$

У межах зміни коефіцієнта навантаження β від 0 до 1 зовнішні характеристики практично прямолінійні (рис. 8.2, а).

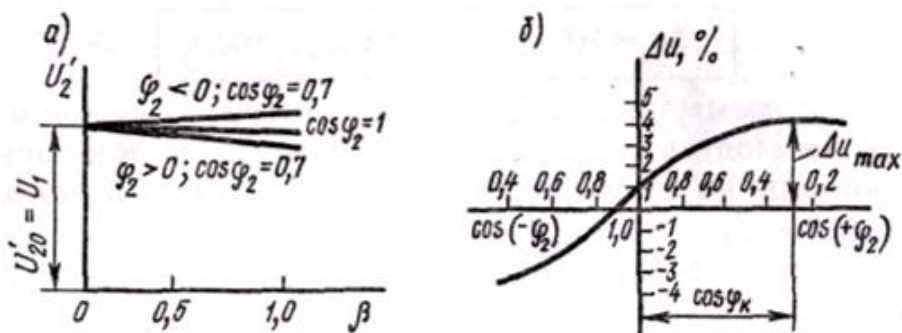


Рис. 8.2. Зовнішні характеристики трансформаторів і графік зміни Δu

Напруга короткого замикання u_k , її складові u_{ka} і u_{kp} залежать деякою мірою від номінальної потужності трансформатора. У трансформаторах середньої і великої потужності реактивна складова напруги короткого замикання значно більша, ніж активна. Тому в таких трансформаторах реактивне навантаження викликає більшу зміну напруги U'_2 , ніж активна, тобто чим менший $\cos \varphi_2$, тим нижче проходить зовнішня характеристика і значніше змінюється напруга U'_2 .

При активно-індуктивному навантаженні завжди напруга $U'_2 < U_1$; при активно-ємнісному навантаженні і при деяких кутах φ_2 вона може стати великою [в формулі (8.7) при $\varphi_2 < 0$ члени, що містять $\sin \varphi_2$, стають негативними]. При заданому значенні β відносна зміна напруги Δu залежить від величини кута φ_2 .

При активному навантаженні величина Δu невелика; при активно-індуктивному навантаженні вона зростає і досягає максимального значення, коли $\varphi_2 = \varphi_k$; при активно-ємнісному навантаженні ця величина може стати негативною (рис. 8.2, б).

Характер зміни вторинної напруги в трансформаторах середньої і великої потужності (при $X_k > R_k$) при різних значеннях кута φ_2 показаний на рис. 8.3. При $\varphi_2 > 0$ (рис. 8.3, а) збільшення навантаження приводить до досить швидкого зростання алгебраїчної різниці $\Delta U = U_1 - U'_2$. При $\varphi_2 = 0$ (рис. 8.3, б) величина ΔU зростає зі збільшенням навантаження в значно меншому ступені. При $\varphi_2 < 0$ (рис. 8.3, в), тобто коли струм I'_2 випереджає напругу U'_2 (активно-ємнісне навантаження), величина ΔU може змінити свій знак.

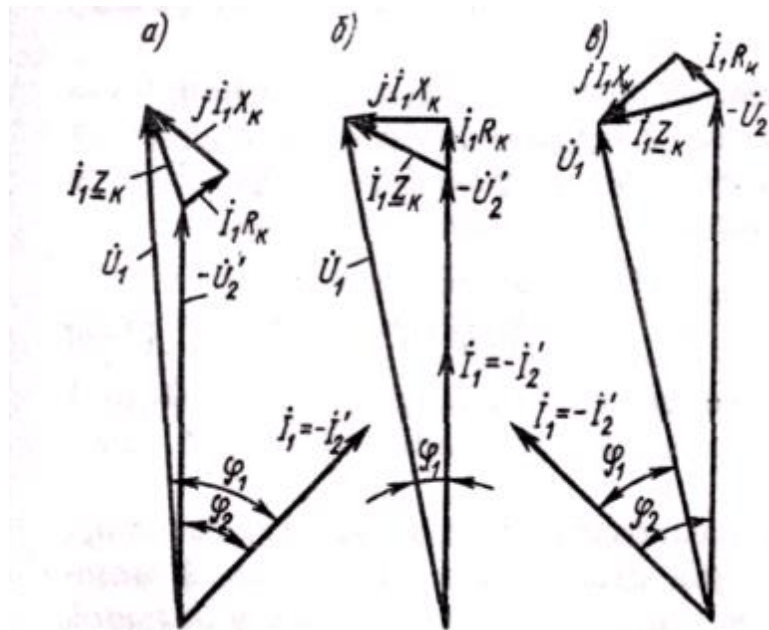


Рис. 8.3. Спрощені векторні діаграми трансформатора при різних значеннях кута φ_2

Зміна вторинної напруги трансформатора при змінному навантаженні можна визначити по діаграмах, приведеним на рис. 8.4. Якщо $U_1 = \text{const}$ і $\varphi_2 = \text{const}$, а змінюється тільки струм I_2 (модуль вектора I_2'), то використовується діаграма (рис. 8.4, а). У цій діаграмі кут $BCE = (\varphi_k - \varphi_2) = \text{const}$. Як зовнішній кут трикутника BCA він дорівнює сумі кутів ABC і CAB , що спираються відповідно на дуги BC і CA . Отже, і кут AFB також дорівнює різниці $\varphi_k - \varphi_2$, тому що він спирається на дугу BCA .

При зміні струму навантаження I_2' змінюються сторони трикутника падіння напруг BCE і положення векторів $I_1 Z_k$ і $-U_2'$, але кут $\varphi_k - \varphi_2$ залишається незмінним. Як наслідок, точка C переміщується по дузі BCE окружності з діаметром $\overline{BF} = U_1 / [\sin(\varphi_k - \varphi_2)]$. Зміна напруги трансформатора $\Delta U = U_1 - U_2'$ визначається відрізком CE , що відтинається на продовженні вектора $-U_2'$ дугою BE , проведеної з точки A радіусом AB .

Якщо $U_1 = \text{const}$ і $I_2' = \text{const}$, а змінюється тільки кут φ_2 , то використовується діаграма (рис. 8.4, б). Для її побудови з точки O проводимо півколо 1 радіусом $OB = U_1$; а з точки O' – півколо 2 також радіусом $O'C = U_1$. Оскільки трикутник $OD'O'$ дорівнює трикутнику падіння напруг BCE , то півколо 1 являє собою геометричне місце кінців вектора U_1 а півколо 2 – геометричне місце кінців вектора $-U_2'$. Відрізки CE , розташовані між цими півколами, являють собою зміни напруги $\Delta U = U_1 - U_2'$. Точки C' і E' відповідають режиму, при якому $\varphi_2 = 0$, частини окружностей 1 і 2, розташовані лівіше цих точок, – кутам $\pi/2 > \varphi_2 > 0$ (активно-індуктивне навантаження), а частини, розташовані правіше цих точок, – кутам $-\pi/2 < \varphi_2 < 0$ (активно-емнісне навантаження). У точці C'' , що відповідає деякому активно-емнісному навантаженню, $U_1 = U_2'$ і $\Delta U = 0$. В області правіше цієї точки $U_2' > U_1$.

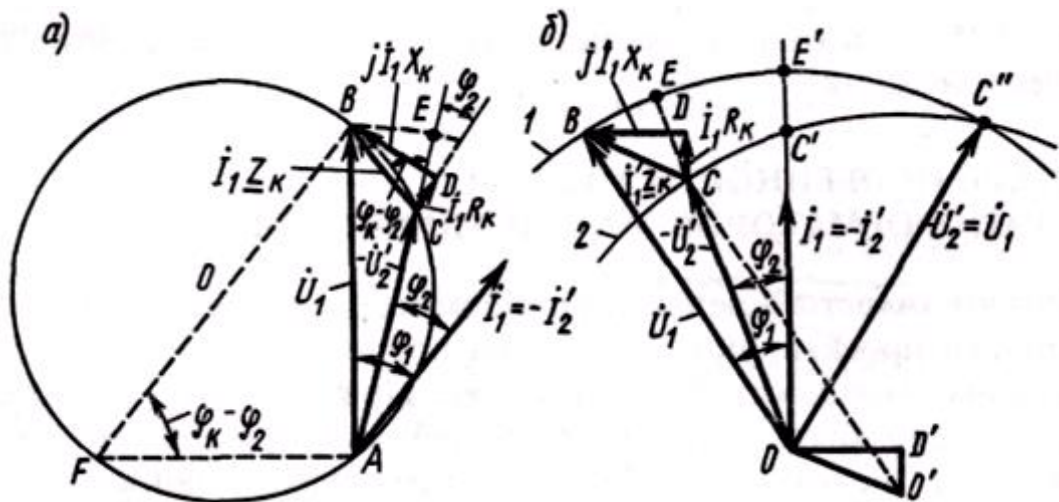


Рис. 8.4. Кругові діаграми трансформатора при змінному навантаженні і $U_1 = \text{const}$: а) – при $\varphi_2 = \text{const}$ і зміні струму I_2' ; б) – при $I_2' = \text{const}$ і зміні φ_2

9.1. Енергетична діаграма

При роботі в трансформаторі виникають втрати енергії. *Коефіцієнтом корисної дії трансформатора* (ККД) називають відношення потужності, що віддається, P_2 до потужності P_1 , що споживається первинною обмоткою:

$$\eta = P_2/P_1 = (U_2 I_2 \cos \varphi_2)/(U_1 I_1 \cos \varphi_1)$$

або

$$\eta = (P_1 - \Delta P)/P_1 = 1 - \Delta P/(P_2 + \Delta P), \tag{9.1}$$

де ΔP – сумарні втрати в трансформаторі.

Високі значення ККД трансформаторів не дозволяють визначати його з достатнім ступенем точності шляхом безпосереднього вимірювання потужностей P_1 і P_2 , тому його обчислюють *непрямим методом* за значенням втрат потужності.

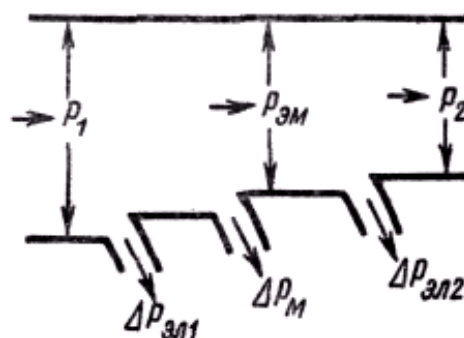


Рис. 9.1. Енергетична діаграма трансформатора

Процес перетворення енергії в трансформаторі характеризує енергетична діаграма (рис. 9.1). При передачі енергії з первинної обмотки у вторинну виникають електричні втрати потужності в активних опорах первинної і

вторинної обмоток $\Delta P_{\text{эл1}}$ і $\Delta P_{\text{эл2}}$, а також магнітні втрати в сталі магнітопроводу $\Delta P_{\text{м}}$ (від вихрових струмів і гістерезису). Тому

$$P_2 = P_1 - \Delta P_{\text{эл1}} - \Delta P_{\text{эл2}} - \Delta P_{\text{м}} \quad (9.2)$$

і формулу (9.1) можна представити у виді

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}} = 1 - \frac{\Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}}{P_2 + \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} + \Delta P_{\text{м}}} \quad (9.3)$$

Величину $P_{\text{эм}} = P_1 - \Delta P_{\text{эл1}} - \Delta P_{\text{м}}$, що надходить у вторинну обмотку, називають *внутрішньою електромагнітною потужністю трансформатора*. Вона визначає габаритні розміри і масу трансформатора.

Визначення втрат потужності

Відповідно до вимог ДСТ втрати потужності в трансформаторі визначають за даними дослідів холостого ходу і короткого замикання. Одержуваний при цьому результат має високу точність, тому що при зазначених дослідях трансформатор не віддає потужність навантаженню. Отже, уся потужність, що надходить у первинну обмотку, витрачається на компенсацію наявних у ньому втрат.

При досліді холостого ходу струм I_0 невеликий і електричними втратами потужності в первинній обмотці можна зневажити. В той же час магнітний потік практично дорівнює потокові при навантаженні, тому що його величина визначається прикладеною до трансформатора напругою. Магнітні втрати в сталі пропорційні квадратів значення магнітного потоку. Отже, з достатньою точністю можна вважати, що *магнітні втрати в сталі магнітопроводу рівні потужності, споживаної трансформатором при холостому ході і номінальній первинній напрузі*, тобто

$$\Delta P_{\text{м}} \approx P_0 \quad (9.4)$$

Для визначення сумарних електричних утрат відповідно до спрощеної схеми заміщення (див. рис. 8.1, а) припускають, що $I'_2 = I_1$. При цьому

$$\Delta P_{\text{эл}} = \Delta P_{\text{эл1}} + \Delta P_{\text{эл2}} = I_1^2 R_1 + I_2'^2 R_2 \approx I_2'^2 (R_1 + R_2) \approx I_2'^2 R_{\text{к}} \quad (9.5)$$

або

$$\Delta P_{\text{эл}} \approx \beta^2 I_2'^2_{\text{ном}} R_{\text{к}} \approx \beta^2 \Delta P_{\text{эл, ном}} \quad (9.6)$$

де $\Delta P_{\text{эл, ном}}$ – сумарні електричні втрати при номінальному навантаженні.

За розрахункову температуру обмоток – умовну температуру, до якої повинні бути віднесені втрати потужності $\Delta P_{\text{эл}}$ і напруга $u_{\text{к}}$, приймають:

– для масляних і сухих трансформаторів з ізоляцією класів нагрівостійкості А, Е, В температуру 15°C;

– для трансформаторів з ізоляцією класів нагрівостійкості F, H – температуру 115°C.

Величину $\Delta P_{\text{эл. ном}} \approx I_2'^2 R_k \approx I_1'^2 R_k$ можна з достатнім ступенем точності прийняти рівною потужності P_k , що споживається трансформатором при досліді короткого замикання, що проводиться при номінальному струмі навантаження. При цьому магнітні втрати в сталі ΔP_M досить малі в порівнянні з втратами $\Delta P_{\text{эл}}$ через сильне зменшення напруги U_1 , а як наслідок, і магнітного потоку трансформатора і ними можна зневажити. Таким чином,

$$\Delta P_{\text{эл}} = \beta^2 P_k. \quad (9.7)$$

Повні втрати

$$\Delta P = P_0 + \beta^2 P_k. \quad (9.8)$$

Підставляючи отримані значення P у (9.3) і враховуючи, що $P_2 = U_2 I_2 \cos \varphi_2 \approx \beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2$, знаходимо

$$\eta = 1 - (\beta^2 P_k + P_0) / (\beta S_{\text{ном}} \cos \varphi_2 + \beta^2 P_k + P_0). \quad (9.8)$$

Ця формула рекомендується ДСТ для визначення ККД трансформатора. Значення P_0 і P_k для силових трансформаторів приведені у відповідних стандартах і каталогах.

Залежність ККД від навантаження

По (9.8) можна побудувати залежність ККД від навантаження рис. 9.2, а). При $\beta=0$ корисна потужність і ККД дорівнюють нулеві. Зі збільшенням потужності, що віддається, ККД збільшується, тому що в енергетичному балансі зменшується питома значення магнітних втрат у сталі, що мають постійне значення. При деякому значенні $\beta_{\text{опт}}$ крива ККД досягає максимуму, після чого починає зменшуватися зі збільшенням навантаження. Причиною цього є сильне збільшення електричних втрат в обмотках, що зростають пропорційно квадратові струму, тобто пропорційно β^2 , у той час як корисна потужність P_2 зростає тільки пропорційно β .

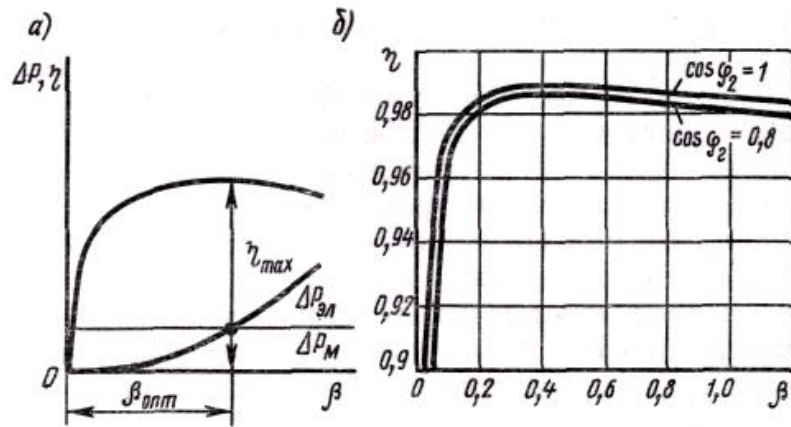


Рис. 9.2. Залежність ККД трансформаторів η від навантаження β

Максимальне значення ККД у трансформаторах великої потужності досягає досить високих меж (0,98–0,99). Оптимальний коефіцієнт навантаження β_{opt} , при якому ККД має максимальне значення, можна визначити, узявши першу похідну $d\eta/d\beta$ по формулі (9.8) і прирівнявши її нулеві. При цьому

$$\beta_{opt}^2 P_k = P_0 \text{ или } \Delta P_{эл} = \Delta P_{м} \quad (9.9)$$

Отже, ККД має максимум при такому навантаженні, при якому електричні втрати в обмотках дорівнюють магнітним втратам у сталі. Ця умова (рівність постійних і змінних утрат) приблизно справедлива і для інших типів електричних машин. Для серійних силових трансформаторів

$$\beta_{opt} = \sqrt{P_0/P_k} \approx \sqrt{0,2 \div 0,25} \approx 0,45 \div 0,5. \quad (9.10)$$

Зазначені значення β_{opt} отримані при проектуванні трансформаторів на мінімум приведених витрат (на їхнє придбання й експлуатацію). Найбільш ймовірне навантаження трансформатора відповідає $\beta=0,5-0,7$.

У трансформаторах максимум ККД виражений порівняно слабо, тобто він зберігає високе значення в досить широкому діапазоні зміни навантаження ($0,4 < \beta < 1,5$). При зменшенні $\cos \phi_2$ ККД знижується (рис. 9.2, б), тому що зростають струми I_2 і I_1 , при яких трансформатор має задану потужність P_2 .

У трансформаторах малої потужності в зв'язку з відносним збільшенням утрат ККД істотно менший, ніж у трансформаторах великої потужності. Його значення складає 0,6–0,8 для трансформаторів, потужність яких менша 50 Вт; при потужності 100–500 Вт КПД дорівнює 0,90–0,92.

Лекція №4

Тема: «Регулювання напруги трансформатора. Схеми з'єднання обмоток трансформаторів.

«Паралельна робота трансформаторів, багатообмоткові трансформатори»

Умови включення на паралельну роботу

У більшості випадків при значній потужності електричної установки доцільно мати не один, а кілька трансформаторів меншої потужності, включених паралельно на загальне навантаження. Таке дроблення загальної трансформаторної потужності дозволяє краще вирішувати проблему енергопостачання споживачів, відключати частину трансформаторів при зменшенні навантаження, простіше проводити профілактичний ремонт трансформаторів і ін.

Для включення трансформаторів $Tr1$ і $Tr2$ на рівнобіжну роботу (рис. 11.1, а) необхідно, щоб при холостому ході в їхніх обмотках не виникали зрівнювальні струми і щоб навантаження розподілялося між обома трансформаторами у відповідності до їхньої номінальної потужності. Для цього потрібно дотримувати ряд умов.

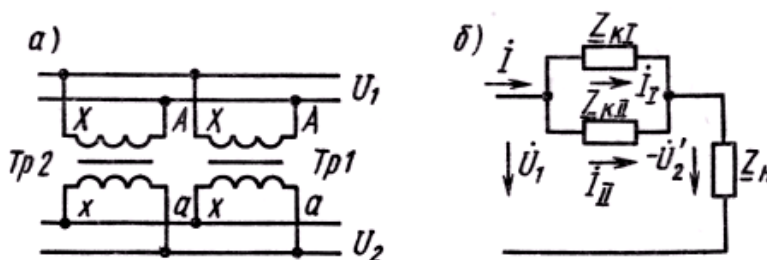


Рис. 11.1. Схема включення трансформаторів при паралельній роботі (а) і схема заміщення їх (б)

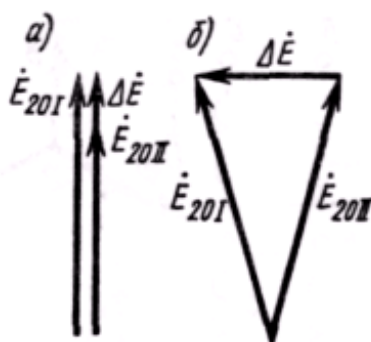


Рис. 11.2. Векторні діаграми напруг при паралельній роботі трансформаторів: а – однієї групи з різними k ; б – різних груп з однаковими k

При нерівності ЕРС E_{20I} і E_{20II} паралельно працюючих трансформаторів (їхніх вторинних напруг при холостому ході – рис. 11.2) виникає зрівноважувальний струм. Цей струм викликає циркуляцію потужності від одного трансформатора до іншого, а отже, нерівномірне навантаження трансформаторів, що супроводжується збільшенням втрат і нагрівання. Зрівноважувальний струм

$$\dot{I}_{\text{ур}} = (\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}) / (\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}). \quad (11.1)$$

З формули (11.1) випливає, що першою необхідною умовою для включення трансформаторів на паралельну роботу є *рівність їх вторинних ЕРС, тобто вторинних напруг холостого ходу* (передбачається, що первинні напруги в них однакові, тобто що трансформатори підключені до однієї і тієї ж первинної мережі). При цьому *трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації*. На практиці допускається паралельна робота силових трансформаторів, що мають розходження в коефіцієнтах трансформації не більш 0,5%, а для трансформаторів з $k > 3$ – не більш 1%. При такому розходженні в коефіцієнтах трансформації різниця вторинних ЕРС ΔE (рис. 11.2, а) невелика і зрівноважувальний струм незначний.

Другою необхідною умовою є збіг по фазі ЕРС \dot{E}_{20I} і \dot{E}_{20II} , для того щоб їхня векторна різниця $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}$ дорівнювала нулю. Для цього *паралельно працюючі трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднань*. При невиконанні цієї умови між однойменними затисками вторинних обмоток виникає різниця ЕРС $\Delta \dot{E}$ (рис. 11.2, б), що викликає появу зрівноважувального струму.

Так, наприклад, якщо трансформатори належать навіть до найближчих груп (наприклад, одинадцятої і нульової), зсув по фазі між їх вторинними ЕРС складає 30° , і в контурі паралельно з'єднаних вторинних обмоток виникає велика різниця ЕРС

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II} = 2E_{20} \sin 15^\circ \approx 0,52 E_{20}.$$

При цьому зрівноважувальний струм у кілька разів більший номінального.

Розподіл навантажень

З умови, отриманої для спрощеної схеми заміщення трансформаторів (див. рис. 11.1, б):

$$\dot{I}_I \underline{Z}_{кI} = \dot{I}_{II} \underline{Z}_{кII} = \dot{I}_{III} \underline{Z}_{кIII} = \dots = \dot{I}_n \underline{Z}_{кn}, \quad (11.2)$$

можна знайти розподіл навантажень між паралельно включеними трансформаторами.

Нехтуючи розходженням у фазі струмів, що залежить від співвідношення активних і реактивних опорів короткого замикання (розходження в основному невелике), і заміняючи комплексні величини їх модулями, одержуємо

$$I_I : I_{II} : I_{III} = (1/Z_{кI}) : (1/Z_{кII}) : (1/Z_{кIII}), \quad (11.3)$$

тобто струми розподіляються між трансформаторами обернено пропорційно опорам короткого замикання. Рівняння (11.3) можна привести до виду

$$I_I : I_{II} : I_{III} = \frac{I_{\text{НОМ I}}}{I_{\text{НОМ I}} Z_{\text{к I}}} : \frac{I_{\text{НОМ II}}}{I_{\text{НОМ II}} Z_{\text{к II}}} : \frac{I_{\text{НОМ III}}}{I_{\text{НОМ III}} Z_{\text{к III}}} \quad (11.4)$$

Множимо ліву частину (11.4) на $U_2 \cos \varphi_2$, а праву – на $U_{\text{НОМ}}^2/100$:

$$P_I : P_{II} : P_{III} = \frac{S_{\text{НОМ I}}}{u_{\text{к I}}} : \frac{S_{\text{НОМ II}}}{u_{\text{к II}}} : \frac{S_{\text{НОМ III}}}{u_{\text{к III}}} \quad (11.5)$$

Отже, для того щоб навантаження розподілялося між паралельно включеними трансформаторами прямо пропорційно їхнім номінальним потужностям, вони повинні мати однакові напруги короткого замикання. Практично задовільний розподіл навантаження виходить у тих випадках, коли напруги короткого замикання паралельно працюючих трансформаторів відхиляються від їх середньоарифметичного значення не більше ніж на $\pm 10\%$.

Якщо при паралельній роботі напруги $u_{\text{к}}$ не рівні, то перевантажується трансформатор з меншим значенням $u_{\text{к}}$, тобто з меншим опором $Z_{\text{к}}$. У цьому випадку прийдеться зменшити загальне навантаження всієї групи паралельно працюючих трансформаторів, тобто встановлена потужність трансформаторів недовикористовується.

При нерівності активних $u_{\text{к а}}$ і реактивних $u_{\text{к р}}$ складових напруг короткого замикання струми паралельно працюючих трансформаторів зсунуті по фазі на деякий кут. При цьому сумарний струм, що віддається навантаженню, дорівнює векторній сумі струмів усіх трансформаторів, тобто менший їхньої алгебраїчної суми. Отже, і в цьому випадку номінальна потужність трансформаторів використовується не повністю.

У трансформаторів різних потужностей складові $u_{\text{к а}}$ і $u_{\text{к р}}$ різні: у трансформаторів більшої потужності $u_{\text{к р}}$ більша, а $u_{\text{к а}}$ менша, ніж у трансформаторів меншої потужності. Тому не рекомендується включення на паралельну роботу трансформаторів з відношенням номінальних потужностей більше трьох.

Багатообмоточні трансформатори

В енергетичних пристроях досить широко застосовують триобмоточні трансформатори, а в пристроях радіотехніки й автоматики – багатообмоточні трансформатори малої потужності. Найбільш розповсюджена схема багатообмоточного трансформатора – одна первинна і кілька вторинних обмоток.

На рис. 13.1 схематично показаний пристрій триобмоточного трансформатора, у якому первинна обмотка 1 розташована між двома вторинними обмотками 2 і 3. Такі трансформатори застосовують на електричних станціях і підстанціях для живлення мереж з різними номінальними напруга. Очевидно, що в даному випадку двом вторинним напругам U_2 і U_3 , одержуваним, наприклад, від обмоток СН і НН, відповідають два коефіцієнти трансформації:

$$k_{1 2} = w_{\text{в.н}}/w_{\text{с.н}}; \quad k_{1 3} = w_{\text{в.н}}/w_{\text{н.н}} \quad (13.1)$$

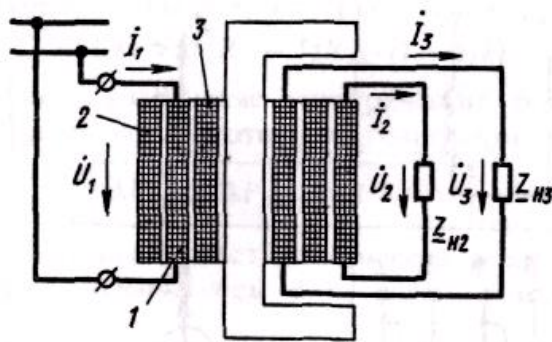


Рис.13.1. Розташування обмоток у силовому триобмоточному трансформаторі: 1 - первинна обмотка; 2, 3 – вторинні обмотки

Сталі процеси в обмотках трансформатора описуються рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2; \\ \dot{U}_3 &= \dot{E}_3 - \dot{I}_3 R_3 - j\dot{I}_3 X_3; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 w_2 / w_1 - \dot{I}_3 w_3 / w_1. \end{aligned} \right\} \quad (13.2)$$

Якщо привести параметри обмоток 2 і 3 до первинної 1 (так само, як це робиться для двохобмоточного трансформатора), то системі рівнянь (13.2) буде відповідати схема заміщення, зображена на рис. 2.54, а. Від схеми заміщення двухобмоточного трансформатора вона відрізняється тим, що вторинне коло має два промені. Очевидно, що при зміні навантаження в одній із вторинних обмоток змінюються напруги на обох вторинних обмотках, тобто є взаємний вплив вторинних обмоток. Це пояснюється тим, що змінюється спад напруги на опорі Z_1 схеми заміщення, по якій проходить сумарний струм I_1 . Векторна діаграма для триобмоточного трансформатора зображена на рис. 2.54, б.

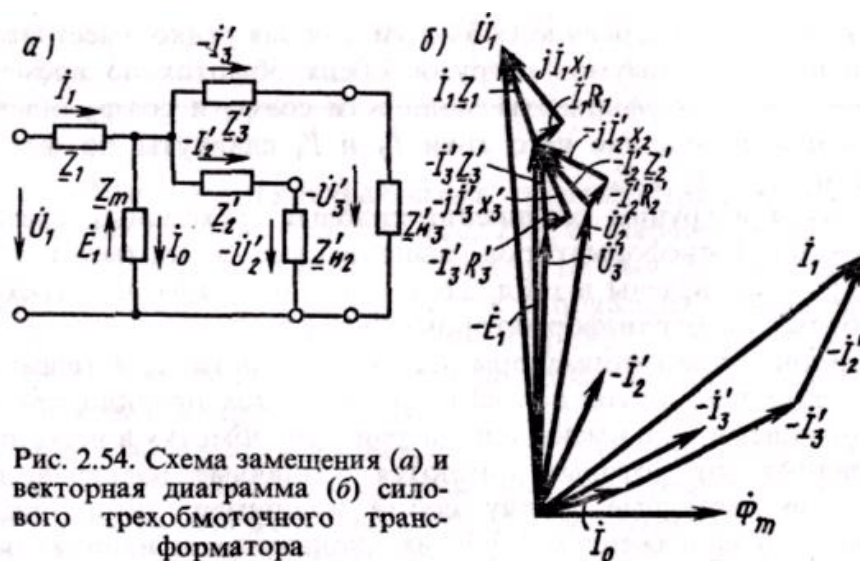


Рис. 2.54. Схема заміщення (а) и векторная діаграма (б) силового триобмоточного трансформатора

Параметри схеми заміщення можна визначити розрахунковим або експериментальним шляхом. Параметри контуру намагнічування знаходяться за

допомогою дослідів холостого ходу так само, як і для двообмоточного трансформатора. Варто провести три досліді короткого замикання: а) при замкнутій накоротко обмотці 2 і розімкнутій обмотці 3; б) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкнутій обмотці 2; в) при замкнутих накоротко обмотках 2 і 3.

Напруги короткого замикання визначаються при струмах, що відповідають номінальній потужності найбільш потужної (первинної) обмотки. Відповідно до зазначених дослідів маємо

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2; \quad \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3; \\ \underline{Z}_x &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2 \underline{Z}'_3 / (\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3). \end{aligned} \right\} \quad (13.3)$$

Вирішуємо систему рівнянь (13.3):

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{12} - \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_{12} - (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) a / (a - 1); \\ \underline{Z}'_2 &= (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) a / (a - 1); \quad \underline{Z}'_3 = (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) / (a - 1), \end{aligned} \right\} \\ \text{где } a^2 &= (\underline{Z}_x - \underline{Z}_{12}) / (\underline{Z}_x - \underline{Z}_{13}). \quad (13/4)$$

Слід зазначити, що отримані параметри схеми заміщення справедливі тільки при зазначеному на мал. 2.53 розташуванні обмоток: первинна обмотка розташована між двома крайніми вторинними. При зміні розташування обмоток змінюються параметри схеми заміщення, тому що змінюються потоки розсіювання цих обмоток. Наприклад, якщо в якості первинної використовується одна з крайніх обмоток, а вторинної – інша крайня обмотка, ті їхні індуктивні опори різко зростають, тому що зростають відповідні потоки розсіювання.

Згідно ДСТ силові *триобмоточні трансформатори виконують на одну номінальну потужність для всіх трьох обмоток.*

Схеми і групи з'єднання силових трифазних триобмоточних трансформаторів, виконані відповідно до ДСТ, приведені в табл. 13.1, а одно- і трифазних триобмоточних автотрансформаторів – у табл. 13.2.

Таблиця 13.1.

Схема соединения обмоток			Диаграмма векторов ЭДС			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						$Y_N / Y_N / D-0-11$
						$Y_N / D / D-11-11$

Таблиця 13.2

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				$Y_N \text{ авто} / D-0-11$
				$ \text{авто} / -0-0$

Силві трансформатори малої потужності (для телевізорів, радіоприймачів і т.п.) виконують, як правило, багатообмоточними: вони мають одну первинну обмотку і декілька вторинних, від яких живляться різні електричні кола, не зв'язані між собою.

Схема заміщення багатообмоточного трансформатора відрізняється від двообмоточного тим, що вона має кілька променів у вторинному колі відповідно до числа вторинних обмоток.

Регулювання напруги трансформатора. Схеми з'єднання обмоток трансформаторів.

Принципи регулювання

При експлуатації трансформаторів досить часто виникає необхідність регулювання вторинної напруги. При цьому розрізняють два основних випадки:

1) стабілізація вторинної напруги при незначній (на 5-10%) зміні первинної напруги, що відбувається в основному через спад напруги в лінії;

2) регулювання вторинної напруги (через особливості технологічного процесу) у широких межах при незмінній (або мало змінній) первинній напрузі.

В обох випадках вторинна напруга регулюється шляхом зміни коефіцієнта трансформації, тобто співвідношення між числами витків первинної і вторинної обмоток.

У першому випадку при невеликих змінах первинної напруги можна змінювати число витків або первинної, або вторинної обмотки. Наприклад, при зниженні первинної напруги відповідно зменшують число витків первинної обмотки так, щоб ЕРС витка залишилася незмінною. Оскільки число витків вторинної обмотки не змінюється, незмінною залишиться і ЕРС вторинної обмотки. При зростанні первинної напруги відповідно збільшують число витків первинної обмотки.

В другому випадку, коли потрібно регулювати вторинну напругу при незмінній первинній, змінюють число витків вторинної обмотки. Змінювати число витків первинної обмотки в цьому випадку не можна, тому що це приведе до зміни магнітного потоку трансформатора і, як наслідок, до його перегріву або поганого використання. Крім того, очевидно, що одержати малу вихідну напругу $U_2 = U_1 w_2 / w_1$ при незмінному числі витків вторинної обмотки практично неможливо, тому що при цьому необхідно мати велике число регулювальних витків.

Переключення відгалужень обмоток w_1 і w_2 може здійснюватися при відключенні трансформатора від первинної і вторинної мереж (переключення без збудження) або під навантаженням (регулювання під навантаженням). Існують також трансформатори з плавним регулюванням напруги, у яких плавно змінюють число витків w_2 або магнітний потік Φ_2 , охоплюваний цією обмоткою.

Переключення відгалужень без збудження

Регулювання напруги цим способом застосовують у масляному і сухому силовому трансформаторах загальпромислового призначення, а також у трансформаторах, призначених для вентиляних перетворювачів. Напругу регулюють на $\pm 5\%$ від $U_{ном}$ ступіннями по 2,5%, тобто трансформатор має п'ять ступіней регулювання напруги. У трансформаторах порівняно невеликої потужності використовують три ступіні регулювання напруги (+5; 0; -5%). У силових трансформаторах великої потужності в основному напругу регулюють на стороні ВН. Це дозволяє спростити конструкцію перемикача відгалужень, тому що струми в обмотці ВН менші, ніж в обмотці НН. Крім того, число витків обмотки ВН більше, ніж обмотки НН, унаслідок чого зміна числа витків на 1,25–2,5% можна здійснювати з більшою точністю. У трансформаторах, призначених

для вентильних перетворювачів, часта напругу регулюють на стороні НН; при цьому перемикаючу апаратуру виконують на великі струми, що сильно ускладнює її конструкцію.

При регулюванні напруги відключають частину витків тільки однієї (первинної або вторинної) обмотки, що порушує рівномірність розподілу МРС по висоті обмотки. Це приводить до перекручування магнітного поля розсіювання і виникненню поперечної складового потоку розсіювання, що, взаємодіючи зі струмом обмоток, створює електромагнітні сили, що діють на обмотку в осьовому напрямку. При аварійних режимах (коротке замикання) ці сили можуть досягати великих значень і викликати руйнування обмотки. Тому прагнуть рівномірно розподілити витки обмотки, що відключаються, по висоті або розташувати їх по можливості в середині висоти обмотки симетрично відносно обох ярм. У трифазних трансформаторах порівняно невеликої потужності, де електромагнітні сили при коротких замиканнях невеликі, для спрощення конструкції перемикача відгалужень доцільно виконувати відгалуження поблизу заземленої нульової точки обмотки, тому що при цьому зменшується напруга, на яку повинна бути розрахована ізоляція перемикача. Якщо відгалуження розташовувати в середній частині обмотки (у потужних трансформаторах), то перемикаючу апаратуру необхідно виконувати з посиленою ізоляцією і з високим ступенем точності, тому що непогодженість роботи її елементів при високій напрузі може привести до серйозних аварій.

У трансформаторах з багатошаровою циліндричною обмоткою витки, що відключаються, звичайно розміщують наприкінці обмотки в зовнішньому її шарі і розташовують симетрично по висоті відносно обох ярм. При переході з одного відгалуження X_1-X_5 на інше (рис. 14.1, а) відключається рівне число витків. В обмотках інших конструкцій відгалуження A_2-A_7 , розташовують у середній частині обмотки (рис. 14.1, б). При номінальній напрузі обмотки ВН до 35 кВ часто застосовують оборотну схему (рис. 14.1, в), що дозволяє розташувати відгалуження X_1-X_5 біля нульової точки й у той же час у середині обмотки (по висоті). При оборотній схемі одна половина обмотки має праву, а інша – ліву намотку.

У масляних трансформаторах переключення відгалужень здійснюють контактним перемикачем, убудованим у трансформатор, рукоятка якого виведена з бака. У сухих трансформаторах відгалуження виводять на контактну панель і переключення роблять шляхом перестановки контактної пластини на різні вивідні шпильки.

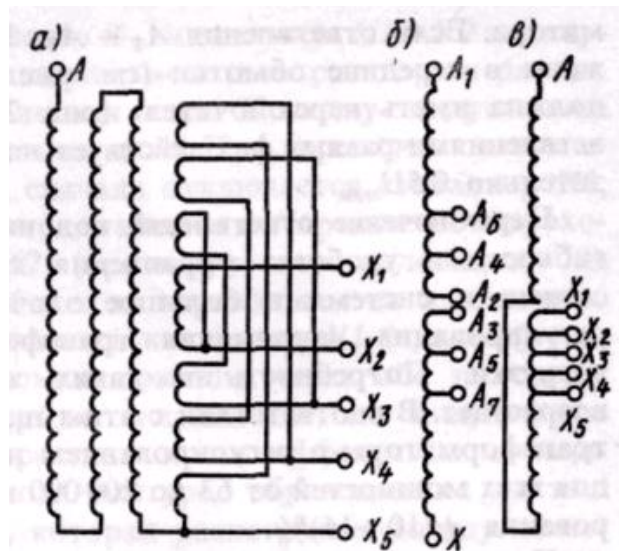


Рис. 14.1. Розташування регулювальних відгалужень у силових трансформаторах: а – у багатошарових циліндричних обмотках; б – у середній частині обмоток (пряма схема); в – у середній частині обмотки (оборотна схема)

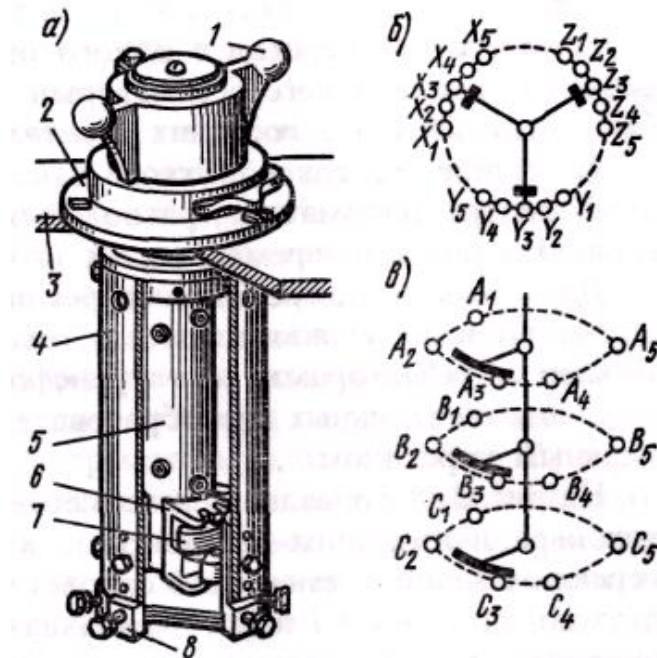


Рис. 14.2. Трифазний перемикач відгалужень (а) і схеми розташування його контактних елементів (б, в): 1 – привод, 2 – фланець ковпака; 3 – кришка бака трансформатора; 4 – паперово-бакелітовий циліндр; 5 – паперово-бакелітова ізоляція вала; 6 – колінчатий вал; 7 – рухливі контакти; 8 – нерухомі контакти

Контактний перемикач (рис. 14.2, а) має систему нерухомих контактів, з'єднаних з відгалуженнями обмотки, і систему рухливих контактів, що замикаються з нерухомими і забезпечують необхідну схему з'єднання між собою обмоток окремих фаз. При виконанні відгалужень X_1 – X_5 , Y_1 – Y_5 і Z_1 – Z_5 біля нульової точки можна застосувати загальний перемикач для всіх трьох фаз (рис. 14.2, б), тому що робоча напруга між окремими частинами перемикача не перевищує 10% від лінійної напруги трансформатора. Якщо відгалуження A_1 – A_5 ; B_1 – B_5 ; C_1 – C_5 розташовані в середині обмотки (див. рис. 14.1, б), то кожна фаза

повинна мати перемикач (рис. 14.2, в), тому що між відгалуженнями різних фаз діє напруга, рівна приблизно $0,5U_{\text{ном}}$.

Переключення відгалужень під навантаженням

Для підвищення гнучкості і зручності керування великими електричними мережами і системами велике значення має можливість регулювання напруги трансформаторів без перерви навантаження. Потреба в таких трансформаторах швидко зростає. Відповідно до цього промисловість випускає трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням для всіх потужностей від 3 до 200000 кВА з межами регулювання $\pm(10\div 16)\%$.

При використанні цього способу регулювання необхідно:

- 1) забезпечити перехід з одного відгалуження на інше без розриву струму, для чого в деякий момент часу повинні бути включені два сусідніх відгалуження;
- 2) обмежити струм короткого замикання у частині обмотки трансформатора, розташованої між цими відгалуженнями при одночасному їхньому включенні.

Для цього застосовують перемикаючі пристрої з дистанційним керуванням і з струмообмежуючими реакторами і резисторами, а в трансформаторах, призначених для вентильних перетворювачів, – пристрої з вентильним переходом.

На рис. 14.3 приведена схема перемикаючого пристрою з струмообмежуючим реактором у трьох положеннях його перемикаючих елементів. Пристрій складається з реактора P , двох контакторів $K1$ і $K2$, призначених для розриву струму, що проходить по двох паралельних вітках реактора, і двох перемикачів $П1$ і $П2$, що здійснюють переключення цих віток при відсутності струму.

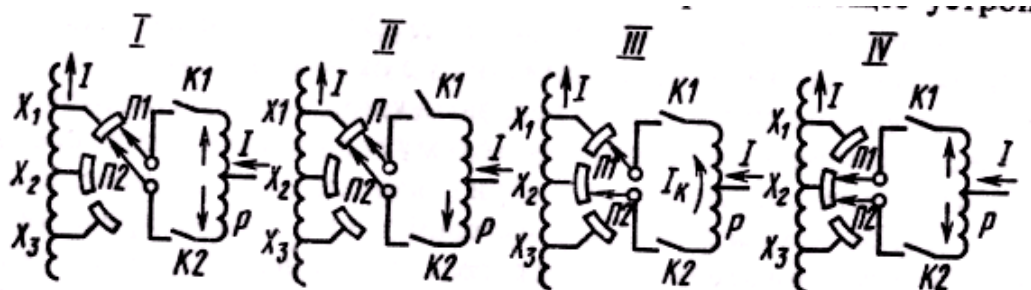


Рис. 14.3. Схеми перемикаючого пристрою з струмообмежуючим реактором

Перемикаючий пристрій діє в такий спосіб.

У першому робочому положенні I, коли перемикаючий пристрій підключено до відгалуження X_1 , контактори $K1$ і $K2$ замкнуті і струм проходить по паралельних вітках реактора в різних напрямках, не намагнічуючи його. Тому індуктивний опір реактора досить малий. При переході з відгалуження X_1 на відгалуження X_2 спочатку відключається контактор $K1$, але коло струму не переривається, тому що він продовжує проходити через контактор $K2$ (проміжне положення II). Потім перемикач $П2$ без струму переводиться на відгалуження X_2 , після чого знову включається контактор $K1$ (проміжне положення III). У цьому положенні через обидві половини реактора проходить струм одного напрямку, його індуктивний опір різко зростає і він ефективно обмежує струм I_k у замкнутому контурі, утвореному частиною обмотки трансформатора, що

розташована між відгалуженнями X_1 і X_2 . Після цього розмикається контактор $K2$, перемикач $П1$ переводиться без струму на відгалуження X_2 і знову замикається контактор $K2$, тобто на цьому закінчується перехід у *друге робоче положення IV*, при якому перемикаючий пристрій підключений до відгалуження X_2 .

Реактор і перемикачі поміщають усередині масляного бака трансформатора, а контактори – у спеціальному баці, розташованому на бічній стінці основного бака. Олія, що знаходиться в ньому, що забруднюється при розриві контакторами струму, не з'єднується з олією основного бака.

Схеми з'єднання обмоток трансформаторів.

10.1. Схеми з'єднання обмоток

Первинна і вторинна обмотки трифазних трансформаторів можуть бути з'єднані по схемах «зірка», «зірка з виведеною нульовою точкою», «трикутники» або «зигзаг з виведеною нульовою точкою». В основному обмотку вищої напруги з'єднують за схемою «зірка», що дозволяє при заданій лінійній напрузі мати менше число витків у фазі.

Згідно ДСТ

- схему з'єднання «зірка» позначають знаком Y , російською буквою $У$ або латинської Y ; схему «трикутник» – знаком Δ , російською буквою $Д$ або грецької Δ ;
- схему «зигзаг» – латинською буквою Z .

Якщо нульова точка обмотки виведена з трансформатора, то в літерному позначенні ставлять індекс n .

Початки і кінці обмотки

- ВН позначають A, B, C и X, Y, Z ;
- НН – a, b, c і x, y, z ;
- вивід нульової точки – O (для ВН) і o (для НН).

Схеми з'єднання обмоток силових трансформаторів, застосовуваних у бувшому Радянському Союзі, приведені в табл. 10.1.

Таблиця 10.1.

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				y/Y_H-0
				$y/D-11$
				$Y_H/D-11$
				y/Z_H-11
				D/Y_H-11

Трифазні трансформатори характеризуються двома коефіцієнтами трансформації:

а) *фазним* – рівним відношенню числа витків $w_{ВН}$ фази обмотки ВН до числа витків $w_{НН}$ фази обмотки НН або ж відношенню фазних напруг цих обмоток у режимі холостого ходу:

$$k_{\phi} = w_{ВН}/w_{НН} = U_{\text{оф.ВН}}/U_{\text{оф.НН}} ; \quad (10.1)$$

б) *лінійним* – рівним відношенню лінійної напруги обмотки ВН до лінійної напруги обмотки НН у режимі холостого ходу:

$$k_{\text{л}} = U_{\text{ол.ВН}}/U_{\text{ол.НН}}. \quad (10.2)$$

Для схем Y/Y і Δ/Δ коефіцієнти трансформації рівні: $k_{\text{л}}=k_{\phi}$; для схеми Y/Δ лінійний коефіцієнт $k_{\text{л}} = \sqrt{3}k_{\phi}$, а для схеми Δ/Y $k_{\text{л}} = k_{\phi}/\sqrt{3}$.

При з'єднанні обмотки трансформатора за схемою Z_H (рис. 10.1, а) кожна фаза складається з двох однакових котушок, що розміщені на різних стрижнях і з'єднані між собою зустрічно так, щоб вектори індукованих у них ЕРС віднімалися (рис. 10.1, б).

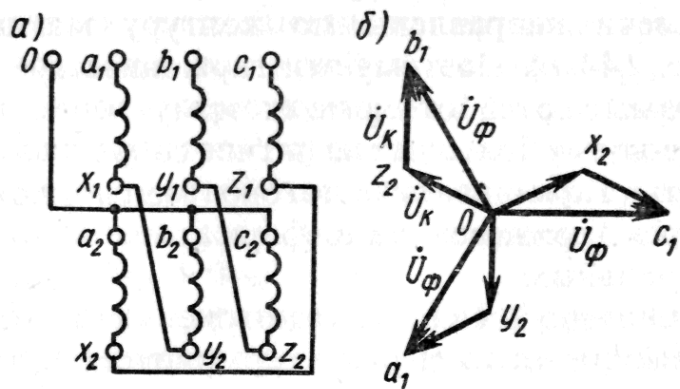


Рис. 10.1. Схема „зигзаг” і її векторна діаграма

Схема Z_H неекономічна, тому що при тій самій фазній напрузі U_ϕ вона вимагає більших витрат обмотувального проводу, ніж при схемах Y і Δ . Це пояснюється тим, що в розглянутій схемі фазна напруга (U_ϕ у $\sqrt{3}$ разів більша напруги U_K на кожній котушці, а при розміщенні двох котушок на одному стрижні і їхньому послідовному з'єднанні $U_\phi=2U_K$. Тому в основному схему Z_H не застосовують; її використовують тільки в трансформаторах для вентильних перетворювачів.

10.2. Групи з'єднань обмоток

Трансформатори поділяють на групи в залежності від зсуву по фазі між лінійними напругами, вимірними на однойменних затисках. В однофазному трансформаторі напруги первинної і вторинної обмоток можуть збігатися по фазі або бути зсунуті на 120° . Це залежить від напрямку намотування обмоток і позначення виводів, тобто від маркування. Якщо обмотки трансформатора намотані в одну сторону і мають симетричне маркування виводів (рис. 10.2.,а), то індуковані в них ЕРС мають однаковий напрямок. Отже, збігаються по фазі і напруги холостого ходу. При зміні маркування виводів однієї з фаз або напрямку намотування однієї фази (рис. 10.2, б) виходить зсув по фазі між векторами первинної і вторинної напруги, рівний 120° .

Групи з'єднань позначають цілими числами від 0 до 11. Номер групи визначають величиною кута, на який вектор лінійної напруги обмотки НН відстає від вектора лінійної напруги обмотки ВН. Для визначення номера групи цей кут варто розділити на 30° .

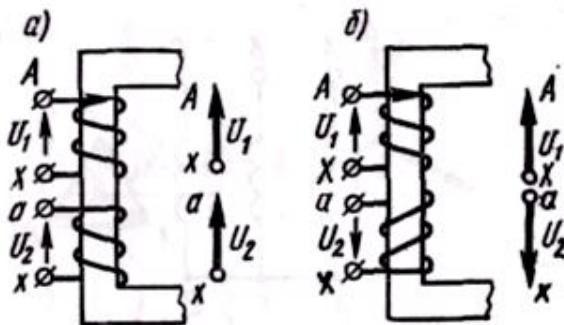
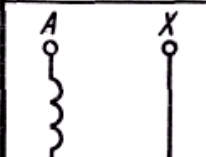
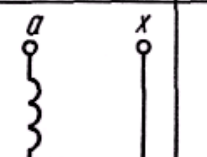




Рис. 10.2. Групи з'єднань обмоток однофазного трансформатора

Для однофазних трансформаторів можливі тільки дві групи з'єднань: нульова (рис. 10.2, а) і шоста (рис. 10.2, б). Однак вітчизняна промисловість випускає однофазні трансформатори тільки нульової групи, у яких напруги первинної і вторинної обмоток збігаються по фазі (див. табл. 10.2).

Таблиця 10.2.

Схема соединения обмоток		Диаграмма векторов ЭДС		Условное обозначение
ВН	НН	ВН	НН	
				1/1-0

У трифазних трансформаторах фазні ЕРС двох обмоток, розташованих на тому самому стрижні, можуть, так само як і в однофазних трансформаторах, або збігатися, або бути протилежними по фазі. Однак у залежності від схеми з'єднання обмоток (Y або Δ) і порядку з'єднання їхніх початків і кінців виходять різні кути зсуву фаз між лінійними напругами. Для прикладу на рис. 10.3 показані схеми з'єднання обмоток Y/Y і відповідні векторні діаграми для нульової (а) і шостої (б) груп; на рис. 10.4 показані схеми з'єднання обмоток Y/Δ і відповідні векторні діаграми для одинадцятої (а) і п'ятої (б) груп.

Змінюючи маркування виводів обмоток, можна одержати й інші групи з'єднань:

- при схемі Y/Y – парні: другу, четверту і т.д.;
- при схемі Y/Δ – непарні: першу, третю й ін.

Згідно ДСТ вітчизняна промисловість випускає трифазні силові трансформатори тільки двох груп: нульової і одинадцятої. Це полегшує практичне включення трансформаторів на паралельну роботу.

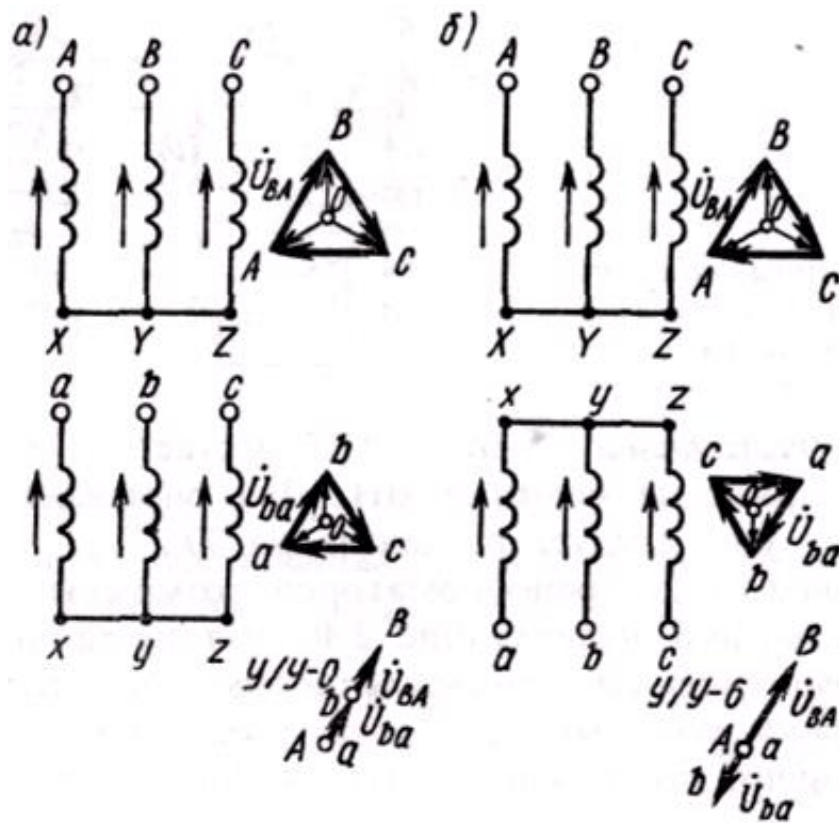


Рис. 10.3. Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі У/У

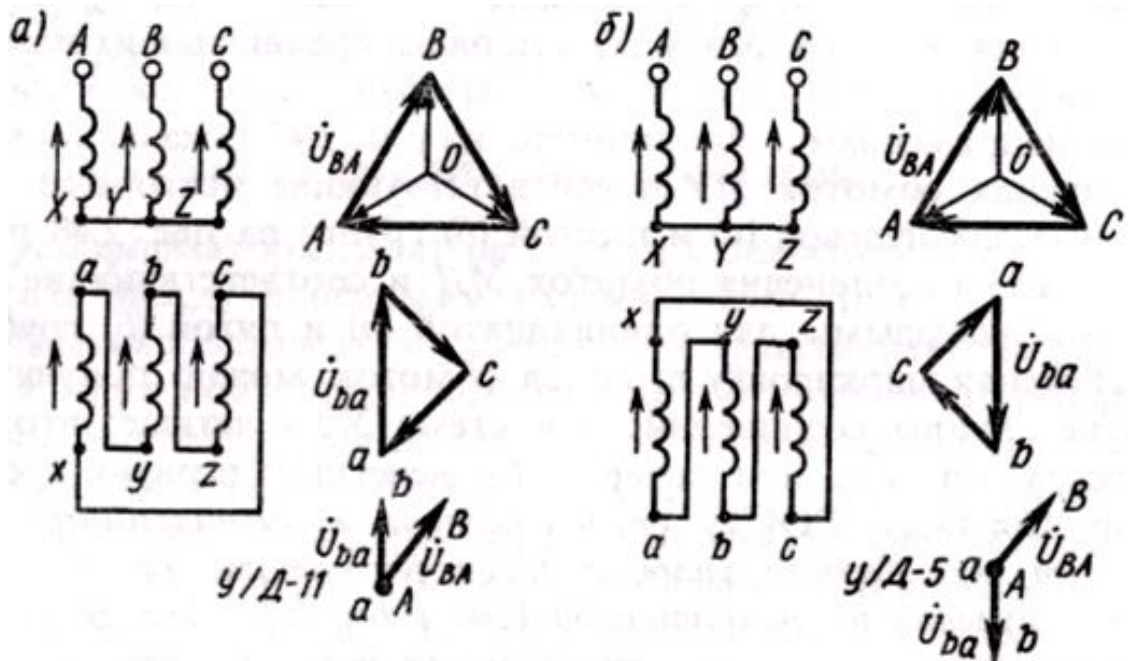


Рис. 10.4. Групи з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі У/Δ

При з'єднанні обмотки НН за схемою Z_H , а обмотки ВН за схемою У (рис. 10.5) фазні напруги обмотки НН зсунуті відносно відповідних фазних напруг обмотки ВН (наприклад, U_{a10} відносно U_{AO}) на кут 330° , тобто при такому з'єднанні маємо одинадцятку групу. Це пояснюється тим, що між векторами лінійних напруг (не показаних на рис. 10.5) є такий же кут.

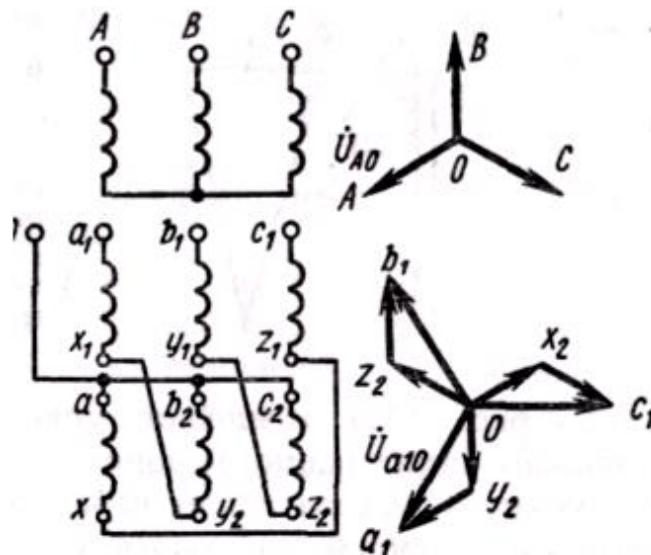


Рис. 10.5. Група з'єднань обмоток трифазного трансформатора при схемі Y/Z_н

Паралельна робота трансформаторів, багатообмоткові трансформатори.

Паралельна робота трансформаторів

Умови включення на паралельну роботу

У більшості випадків при значній потужності електричної установки доцільно мати не один, а кілька трансформаторів меншої потужності, включених паралельно на загальне навантаження. Таке дроблення загальної трансформаторної потужності дозволяє краще вирішувати проблему енергопостачання споживачів, відключати частину трансформаторів при зменшенні навантаження, простіше проводити профілактичний ремонт трансформаторів і ін.

Для включення трансформаторів *Tr1* і *Tr2* на рівнобіжну роботу (рис. 11.1, а) необхідно, щоб при холостому ході в їхніх обмотках не виникали зрівнювальні струми і щоб навантаження розподілялося між обома трансформаторами у відповідності до їхньої номінальної потужності. Для цього потрібно дотримувати ряд умов.

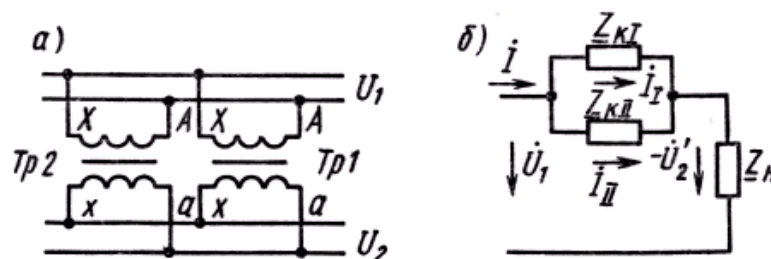


Рис. 11.1. Схема включення трансформаторів при паралельній роботі (а) і схема заміщення їх (б)

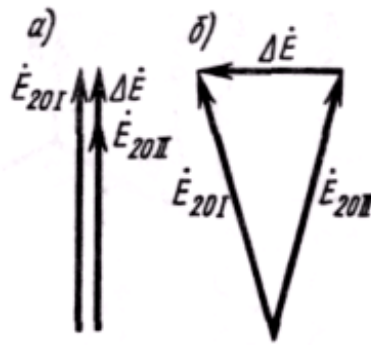


Рис. 11.2. Векторні діаграми напруг при паралельній роботі трансформаторів: *a* – однієї групи з різними *k*; *б* – різних груп з однаковими *k*

При нерівності ЕРС E_{20I} і E_{20II} паралельно працюючих трансформаторів (їхніх вторинних напруг при холостому ході – рис. 11.2) виникає зрівноважувальний струм. Цей струм викликає циркуляцію потужності від одного трансформатора до іншого, а отже, нерівномірне навантаження трансформаторів, що супроводжується збільшенням втрат і нагрівання. Зрівноважувальний струм

$$i_{ур} = (\dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}) / (\underline{Z}_{кI} + \underline{Z}_{кII}). \quad (11.1)$$

З формули (11.1) випливає, що першою необхідною умовою для включення трансформаторів на паралельну роботу є *рівність їх вторинних ЕРС, тобто вторинних напруг холостого ходу* (передбачається, що первинні напруги в них однакові, тобто що трансформатори підключені до однієї і тієї ж первинної мережі). При цьому *трансформатори повинні мати однакові коефіцієнти трансформації*. На практиці допускається паралельна робота силових трансформаторів, що мають розходження в коефіцієнтах трансформації не більш 0,5%, а для трансформаторів з $k > 3$ – не більш 1%. При такому розходженні в коефіцієнтах трансформації різниця вторинних ЕРС ΔE (рис. 11.2, а) невелика і зрівноважувальний струм незначний.

Другою необхідною умовою є збіг по фазі ЕРС \dot{E}_{20I} і \dot{E}_{20II} , для того щоб їхня векторна різниця $\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II}$ дорівнювала нулю. Для цього *паралельно працюючі трансформатори повинні належати до однієї групи з'єднань*. При невиконанні цієї умови між однойменними затискачами вторинних обмоток виникає різниця ЕРС $\Delta \dot{E}$ (рис. 11.2, б), що викликає появу зрівноважувального струму.

Так, наприклад, якщо трансформатори належать навіть до найближчих груп (наприклад, одинадцятої і нульової), зсув по фазі між їх вторинними ЕРС складає 30° , і в контурі паралельно з'єднаних вторинних обмоток виникає велика різниця ЕР

$$\Delta \dot{E} = \dot{E}_{20I} - \dot{E}_{20II} = 2E_{20} \sin 15^\circ \approx 0,52 E_{20}.$$

При цьому зрівноважувальний струм у кілька разів більший номінального.

Розподіл навантажень

З умови, отриманої для спрощеної схеми заміщення трансформаторів (див. рис. 11.1, б):

$$\underline{I}_I Z_{кI} = \underline{I}_{II} Z_{кII} = \underline{I}_{III} Z_{кIII} = \dots = \underline{I}_n Z_{кn} \quad (11.2)$$

можна знайти розподіл навантажень між паралельно включеними трансформаторами.

Нехтуючи розходженням у фазі струмів, що залежить від співвідношення активних і реактивних опорів короткого замикання (розходження в основному невелике), і заміняючи комплексні величини їх модулями, одержуємо

$$I_I : I_{II} : I_{III} = (1/Z_{кI}) : (1/Z_{кII}) : (1/Z_{кIII}), \quad (11.3)$$

тобто струми розподіляються між трансформаторами обернено пропорційно опорам короткого замикання. Рівняння (11.3) можна привести до виду

$$I_I : I_{II} : I_{III} = \frac{I_{НОМ I}}{I_{НОМ I} Z_{кI}} : \frac{I_{НОМ II}}{I_{НОМ II} Z_{кII}} : \frac{I_{НОМ III}}{I_{НОМ III} Z_{кIII}}. \quad (11.4)$$

Множимо ліву частину (11.4) на $U_2 \cos \varphi_2$, а праву – на $U_{НОМ}^2/100$:

$$P_I : P_{II} : P_{III} = \frac{S_{НОМ I}}{u_{кI}} : \frac{S_{НОМ II}}{u_{кII}} : \frac{S_{НОМ III}}{u_{кIII}}. \quad (11.5)$$

Отже, для того щоб навантаження розподілялося між паралельно включеними трансформаторами прямо пропорційно їхнім номінальним потужностям, вони повинні мати однакові напруги короткого замикання. Практично задовільний розподіл навантаження виходить у тих випадках, коли напруги короткого замикання паралельно працюючих трансформаторів відхиляються від їх середньоарифметичного значення не більше ніж на $\pm 10\%$.

Якщо при паралельній роботі напруги u_k не рівні, то перевантажується трансформатор з меншим значенням u_k , тобто з меншим опором Z_k . У цьому випадку прийдеться зменшити загальне навантаження всієї групи паралельно працюючих трансформаторів, тобто встановлена потужність трансформаторів недовикористовується.

При нерівності активних $u_{ка}$ і реактивних $u_{кр}$ складових напруг короткого замикання струми паралельно працюючих трансформаторів зсунуті по фазі на деякий кут. При цьому сумарний струм, що віддається навантаженню, дорівнює векторній сумі струмів усіх трансформаторів, тобто менший їхньої алгебраїчної суми. Отже, і в цьому випадку номінальна потужність трансформаторів використовується не повністю.

У трансформаторів різних потужностей складові $u_{ка}$ і $u_{кр}$ різні: у трансформаторів більшої потужності $u_{кр}$ більша, а $u_{ка}$ менша, ніж у трансформаторів меншої потужності. Тому не рекомендується включення на

паралельну роботу трансформаторів з відношенням номінальних потужностей більше трьох.

Багатообмоточні трансформатори

В енергетичних пристроях досить широко застосовують триобмоточні трансформатори, а в пристроях радіотехніки й автоматики – багатообмоточні трансформатори малої потужності. Найбільш розповсюджена схема багатообмоточного трансформатора – одна первинна і кілька вторинних обмоток.

На рис. 13.1 схематично показаний пристрій триобмоточного трансформатора, у якому первинна обмотка 1 розташована між двома вторинними обмотками 2 і 3. Такі трансформатори застосовують на електричних станціях і підстанціях для живлення мереж з різними номінальними напруга. Очевидно, що в даному випадку двом вторинним напругам U_2 і U_3 , одержуваним, наприклад, від обмоток СН і НН, відповідають два коефіцієнти трансформації:

$$k_{12} = w_{в.н}/w_{с.н}; \quad k_{13} = w_{в.н}/w_{н.н}. \quad (13.1)$$

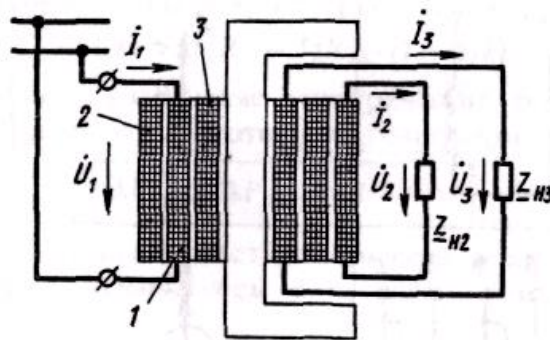


Рис.13.1. Розташування обмоток у силовому триобмоточному трансформаторі: 1 - первинна обмотка; 2, 3 – вторинні обмотки

Сталі процеси в обмотках трансформатора описуються рівняннями:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 R_1 + j\dot{I}_1 X_1; \\ \dot{U}_2 &= \dot{E}_2 - \dot{I}_2 R_2 - j\dot{I}_2 X_2; \\ \dot{U}_3 &= \dot{E}_3 - \dot{I}_3 R_3 - j\dot{I}_3 X_3; \\ \dot{I}_1 &= \dot{I}_0 - \dot{I}_2 w_2/w_1 - \dot{I}_3 w_3/w_1. \end{aligned} \right\} \quad (13.2)$$

Якщо привести параметри обмоток 2 і 3 до первинної 1 (так само, як це робиться для двохобмоточного трансформатора), то системі рівнянь (13.2) буде відповідати схема заміщення, зображена на рис. 2.54, а. Від схеми заміщення двохобмоточного трансформатора вона відрізняється тим, що вторинне коло має два промені. Очевидно, що при зміні навантаження в одній із вторинних обмоток змінюються напруги на обох вторинних обмотках, тобто є взаємний вплив вторинних обмоток. Це пояснюється тим, що змінюється спад напруги на

опорі \underline{Z}_1 схеми заміщення, по якій проходить сумарний струм I_1 . Векторна діаграма для триобмоточного трансформатора зображена на рис. 2.54, б.

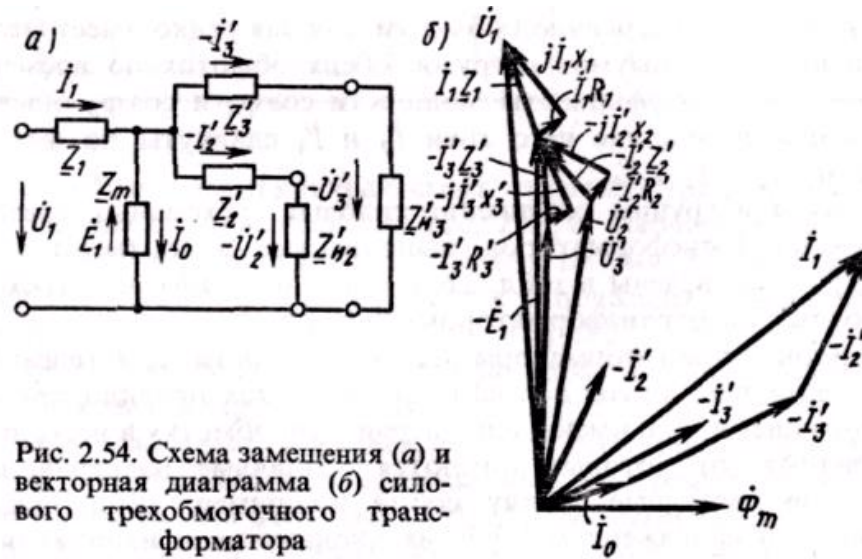


Рис. 2.54. Схема заміщення (а) и векторная діаграма (б) силового триобмоточного трансформатора

Параметри схеми заміщення можна визначити розрахунковим або експериментальним шляхом. Параметри контуру намагнічування знаходяться за допомогою дослідів холостого ходу так само, як і для двообмоточного трансформатора. Варто провести три дослід короткого замикання: а) при замкнутій накоротко обмотці 2 і розімкнутій обмотці 3; б) при замкнутій накоротко обмотці 3 і розімкнутій обмотці 2; в) при замкнутих накоротко обмотках 2 і 3.

Напруги короткого замикання визначаються при струмах, що відповідають номінальній потужності найбільш потужної (первинної) обмотки. Відповідно до зазначених дослідів маємо

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_{12} &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2; \quad \underline{Z}_{13} = \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_3; \\ \underline{Z}_x &= \underline{Z}_1 + \underline{Z}'_2 \underline{Z}'_3 / (\underline{Z}'_2 + \underline{Z}'_3). \end{aligned} \right\} \quad (13.3)$$

Вирішуємо систему рівнянь (13.3):

$$\left. \begin{aligned} \underline{Z}_1 &= \underline{Z}_{12} - \underline{Z}'_2 = \underline{Z}_{12} - (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) a / (a - 1); \\ \underline{Z}'_2 &= (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) a / (a - 1); \quad \underline{Z}'_3 = (\underline{Z}_{12} - \underline{Z}_{13}) / (a - 1), \end{aligned} \right\} \quad (13/4)$$

где $a^2 = (\underline{Z}_x - \underline{Z}_{12}) / (\underline{Z}_x - \underline{Z}_{13})$.

Слід зазначити, що отримані параметри схеми заміщення справедливі тільки при зазначеному на мал. 2.53 розташуванні обмоток: первинна обмотка розташована між двома крайніми вторинними. При зміні розташування обмоток змінюються параметри схеми заміщення, тому що змінюються потоки розсіювання цих обмоток. Наприклад, якщо в якості первинної використовується одна з крайніх обмоток, а вторинної – інша крайня обмотка, ті їхні індуктивні опори різко зростають, тому що зростають відповідні потоки розсіювання.

Згідно ДСТ силові триобмоточні трансформатори виконують на одну номінальну потужність для всіх трьох обмоток.

Схеми і групи з'єднання силових трифазних триобмоточних трансформаторів, виконані відповідно до ДСТ, приведені в табл. 13.1, а одно- і трифазних триобмоточних автотрансформаторів – у табл. 13.2.

Таблиця 13.1.

Схема з'єднання обмоток			Діаграма векторів ЕДС			Условное обозначение
ВН	СН	НН	ВН	СН	НН	
						У _Н / У _Н / Д-0-11
						У _Н / Д / Д-11-11

Таблиця 13.2.

Схема з'єднання обмоток		Діаграма векторів ЕДС		Условное обозначение
ВН и СН	НН	ВН и СН	НН	
				У _Н авто / Д-0-11
				авто/ -0-0

Силові трансформатори малої потужності (для телевізорів, радіоприймачів і т.п.) виконують, як правило, багатообмоточними: вони мають одну первинну обмотку і декілька вторинних, від яких живляться різні електричні кола, не зв'язані між собою.

Схема заміщення багатообмоточного трансформатора відрізняється від двообмоточного тим, що вона має кілька променів у вторинному колі відповідно до числа вторинних обмоток.

Зміст

1. Лекція №1

Принцип дії безколекторних машин змінного струму та принципи виконання обмоток їх статора.....2

Основні типи обмоток статора машин змінного струму.....6

2. Лекція №2

Асинхронні машини змінного струму.....11

Робочий режим асинхронного двигуна.....14

3. Лекція №3

Механічна характеристика та стійкість роботи АД.....21

Регулювання частоти обертання АД.....22

4. Лекція №4

Гальмівні режими асинхронного двигуна.....28

Однофазний асинхронний двигун.....30

Лекція №1

Тема: «Принцип дії безколекторних машин змінного струму та принципи виконання обмоток їх статора.

Основні типи обмоток статора машин змінного струму»

Принцип дії безколекторних машин змінного струму та принципи виконання обмоток їх статора.

Основні види машин змінного струму (МЗС)

На практиці застосовуються переважно трифазні ($m = 3$) машини змінного струму. Машини з іншим числом фаз ($m = 2; 6$) використовуються для спеціальних цілей.

Однак принцип роботи всіх багатofазних машин базується на принципі обертового магнітного поля, і тому їхня теорія є загальною.

Однофазні МЗС мають обмежене застосування.

Трифазні МЗС. Вони підрозділяються на три основних види: синхронні, асинхронні і колекторні.

Усі види МЗС розраховуються на роботу при синусоїдальному змінному струмі.

У синхронних машинах нормальних типів ротор обертається з такою ж швидкістю й у тому ж напрямку, як і обертове магнітне поле. Таким чином, обертання ротора здійснюється у такт, або синхронно, з обертовим полем.

СМ використовуються насамперед у якості генераторів. Однак усе більше розширюється також застосування СМ в якості двигунів.

Ротор АМ обертається несинхронно, або асинхронно стосовно обертового магнітного поля.

На практиці асинхронні машини використовуються головним чином в якості двигунів.

Колекторні МЗС також обертаються несинхронно з магнітним полем, і в цьому змісті вони є асинхронними машинами. Однак через наявність у них колектора і зв'язаних з цим особливостей вони виділяються в окремий вид МЗС. Найбільше застосування колекторні машини знаходять як двигуни. Однак їхнє використання обмежене, і тому найголовнішими видами МЗС є асинхронні і синхронні машини.

21.2. Конструкція МЗС

Електрична машина має статор і ротор, розділені повітряним. Активними частинами її є магнітопровід і обмотки. Всі інші частини – конструктивні, що забезпечують необхідну твердість, міцність, можливість обертання, охолодження і т.п.

Магнітопровід машини, по якому замикається змінний магнітний потік, виконують шихтованим – з листів електротехнічної сталі. Якщо потік

постійний, то магнітопровід можна виконувати масивним; у цьому випадку він може здійснювати і конструктивні функції, тобто служити елементом, що забезпечує міцність даної частини машини (статора або ротора).

Оскільки в частинах електричних машин магнітний потік замикається по складних контурах, відмінних від прямолінійних, у них, як правило, застосовується ізотропна холоднокатана сталь. Тільки для виготовлення полюсів синхронних машин і великих машин постійного струму іноді застосовується анізотропна холоднокатана сталь, тому що в полюсах напрямком магнітних ліній збігається з напрямком прокатки, у якому магнітна проникність дуже велика.

Сердечники статорів і роторів АМ і якорів синхронних машин постійного струму штампують з ізотропною рулонною холоднокатаною сталлю, що дозволяє при розкрої одержувати економію порядку 10–15% у порівнянні з листовою, унаслідок чого листову сталь застосовується дуже рідко.

У машинах малої потужності застосовується сталь марки 2013, з низьким змістом кремнію, досить в'язка, котра і дозволяє одержувати дрібні пази складної конфігурації. У машинах середньої і великої потужності застосовують сталь марки 2212, 2311 і 2411, з підвищеним вмістом кремнію. Ці сталі більш крихкі, що утрудняє їхнє штампування, але мають низькі втрати на перемагнічування і не вимагають відпалення сердечників після штампування.

У мікромашинах широко застосовують також магнітопроводи, зібрані з листів залізонікелевих сплавів типу пермалой.

Статор асинхронних і більшості синхронних машин складається із шихтованого магнітопроводу, який запресовують у литу станину. Оскільки через масивну станину змінний магнітний потік не замикається, станину можна виконувати з немагнітного матеріалу (алюмінію) або феромагнітного з малою магнітною проникністю (чавуна), порівняно дешевих і добре пристосованих до ливарної технології. На внутрішній поверхні шихтованого статора, у пазах, розташовують обмотки статора.

Ротор асинхронної машини складається із сердечника, набраного з листів електротехнічної сталі. Сердечник запресовують на вал або втулку ротора (при великих розмірах машини) і стискають спеціальними натискними шайбами. У пазах, розміщених на зовнішній поверхні ротора (подібних за формою з пазами статора), розташовують обмотки ротора. У СМ ротор виконують масивним, тому що на ньому розташовані полюси з обмотками збудження, магнітний потік яких нерухомий щодо ротора.

При виготовленні листів ротора і статора в них штампують пази (рис. 21.1) для укладання провідників обмотки ротора і статора, а також вентиляційні канали для проходу охолодженого повітря.

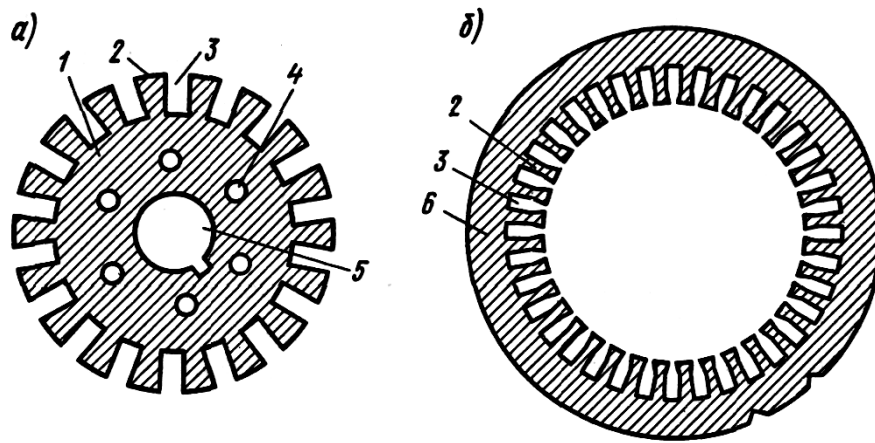


Рис. 21.1. Листи ротора (а) і статора (б): 1 – лист ротора; 2 – зубець; 3 – паз; 4 – вентиляційний канал; 5 – отвір під вал; б – лист статора

Конфігурація зубців і пазів (рис. 3.4 і 3.5) залежить від типу машини і її потужності.



Рис. 3.4. Пазы ротора открытй (а), полуоткрытй (б) и полужакрытй (в, г):

1 – клин; 2 – проводники; 3 – изоляция слоя; 4 – межслойная изоляция; 5 – пазовая изоляция

У машинах великої потужності обмотки статора і ротора виконують із провідників прямокутного перерізу; у цьому випадку застосовують відкриті пази прямокутної форми, що дозволяють щонайкраще розмістити провідники і забезпечити надійну їхню ізоляцію.

У машинах малої і середньої потужності обмотки ротора і статора виконують із проводу круглого перерізу; у таких машинах застосовують напівзакриті пази овальної або трапецеподібної форми. У ряді випадків при провідниках прямокутного перерізу застосовують напіввідкриті пази, що зменшують магнітний опір шару «зубці – пази – повітряний зазор» у порівнянні з відкритими пазами.

У мікромашинах ротори часто мають пази круглої форми; при цьому істотно спрощується й здешевлюється виготовлення штампів.

При укладанні провідників у пази дно і стінки покривають ізоляційним матеріалом (електрокартоном, лакотканиною, міканітом і ін.). Провідники, а також їх верхній і нижній шари теж ізолюють один від одного.

Чим вища напруга, при якому працює машина, тим більшу електричну міцність повинна мати ізоляція провідників від сердечника ротора або статора. Провідники зміцнюють у пазах ротора і статора за допомогою клинів, а на роторі, крім того, за допомогою дротових бандажів або склобандажів, що намотують на лобові частини його обмотки (частини обмотки, що виходять із сердечника ротора). У деяких випадках бандажі розташовують і в декількох місцях уздовж сердечника ротора.

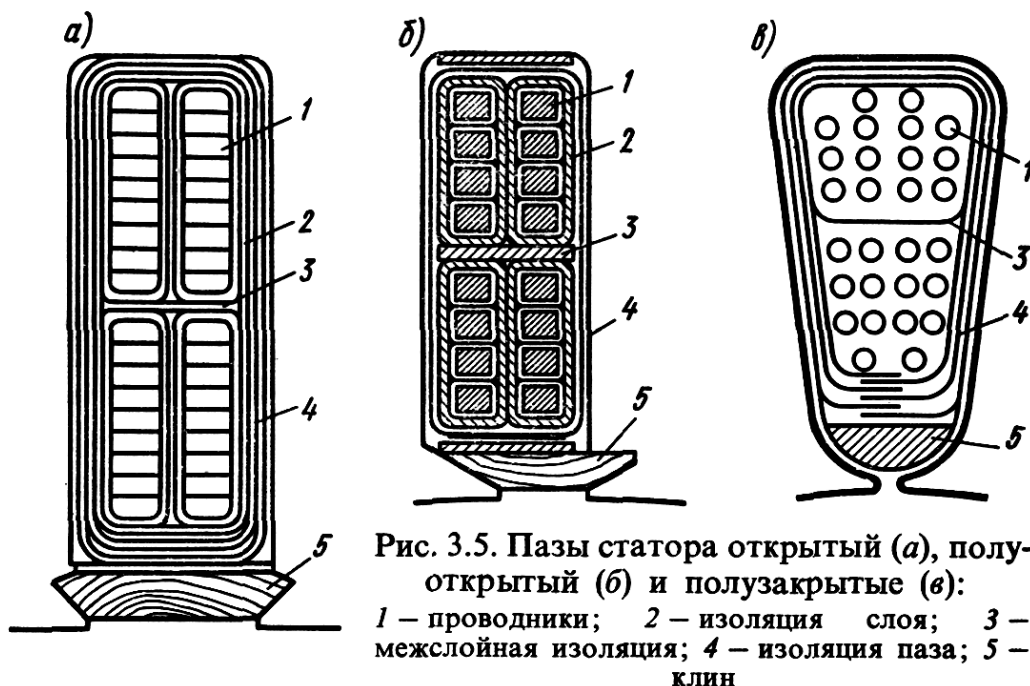


Рис. 3.5. Пази статора відкритий (а), напіввідкритий (б) і напівзакритий (в):
1 – провідники; 2 – ізоляція слоя; 3 – міжслойная ізоляція; 4 – ізоляція паза; 5 – клин

Для підведення струму до обмотки ротора або підключення до неї реостата на роторі повинні бути розташовані контактні кільця: три кільця при трифазному струмі і два кільця при постійному струмі. Виключення складають асинхронні машини з короткозамкненим ротором, яким контактні кільця не потрібні. Струмознімання з контактних кілець здійснюють за допомогою щіток. Щітки встановлюють у спеціальних щіткотримачах і притискають до контактної поверхні за допомогою пружин.

Електричні машини потужністю приблизно до 2000 кВт мають кулькові або роликові підшипники, що розташовують у підшипникових щитах. При великих потужностях застосовують ковзні підшипники.

Електричні машини змінного струму – асинхронні і синхронні, незважаючи на розходження в будові і конструкції, мають багато загального в принципі роботи і теорії. У цих машинах при проходженні по обмотках статора або ротора змінного струму, який синусоїдально змінюється в часі, створюється обертове магнітне поле. Це поле, у свою чергу, перетинає обмотки статора і ротора (або одну з них) і наводить у них змінну ЕРС.

Основні типи обмоток статора машин змінного струму.

Класифікація обмоток

Обмотки складаються із секцій. Секція може бути одновитковою (складатися з одного витка) і багатовитковою (мати кілька витків) (рис. 22.1).

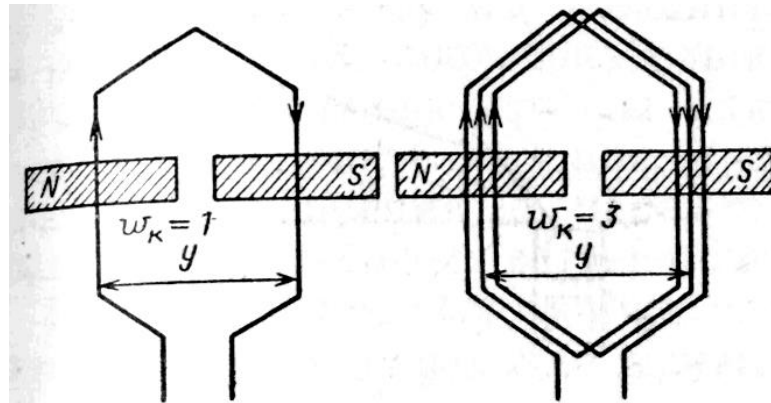


Рис. 22.1. Одновиткова і тривиткова секції обмотки статора

Частини секції, що вкладаються в пази, називаються пазовими або активними, а розташовувані поза пазом – лобовими. Ширина секції визначається кроком обмотки y .

Для того щоб ЕРС провідників двох активних сторін секції сумувались, ці активні сторони повинні розташовуватися під полюсами різної полярності. Тому крок y повинний бути приблизно дорівнювати полюсному діленні.

Крок y і полюсне ділення τ_n задаються в зубцевих діленнях. Зубцеве (пазове) ділення – це довжина дуги по внутрішній окружності статора між серединами сусідніх зубців або пазів. Крок y дорівнює числу цих ділень, розташованих між початком і кінцем секції. Якщо $y=5$, то це означає, що початок секції лежить, наприклад, у пазу 1, а її кінець – у пазу 6 (1+5). Крок y завжди дорівнює цілому числу.

Полюсне ділення τ_n дорівнює числу зубцевих (пазових) ділень, розташованих між серединами сусідніх полюсів. Полюсний розподіл τ_n може мати як ціле, так і дробове значення.

Якщо крок дорівнює полюсному діленні:

$$y = \tau_n = z/(2p),$$

де Z – загальне число зубців на статорі, то обмотка називається обмоткою з діаметральним кроком, а якщо

$$y < \tau_n,$$

то – з укороченим кроком.

Найбільше поширення мають обмотки з укороченим кроком, так як у такій обмотці за рахунок вибору відповідного кроку можна одержати форму

кривих індукованої ЕРС і поля, близькі до синусоїдальної. Здебільшого $y \approx 0,8\tau_n$.

По розташуванню секційних сторін у пазу обмотки поділяються на одношарові і двошарові. Якщо в пазу розміщується тільки одна секційна сторона (рис. 22.2), то обмотка буде одношаровою, а якщо дві (рис. 22.3) – двошаровою.

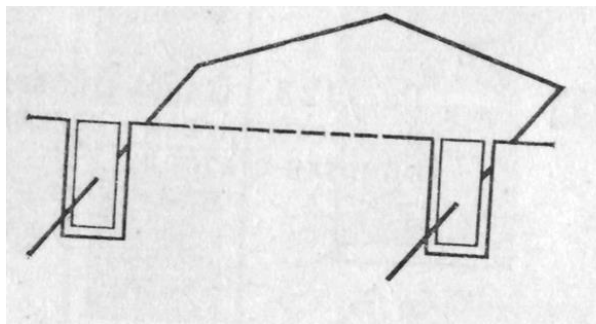


Рис. 22.2. Розташування в пазах секції одношарової обмотки

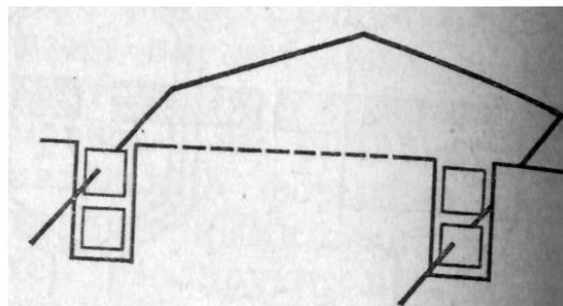


Рис. 22.3. Розташування в пазах секції двошарової обмотки

Найбільше застосування знаходять двошарові обмотки. Перевага двошарових обмоток полягає в тому, що в них можна виконати укорочений крок і за рахунок цього поліпшити форму кривих ЕРС і МРС. Крім того, при укороченому кроці зменшується витрата обмотувального проводу.

Одношарові обмотки мають діаметральний крок, що є їхнім основним недоліком. Ці обмотки застосовують у машинах потужністю до 16 кВт.

Обмотки МЗС складаються з декількох самостійних частин, кожна з яких являє розімкнуту систему послідовно з'єднаних провідників. Кожна частина називається обмоткою фази.

Розрізняють однофазні, двохфазні і трифазні обмотки. Найбільше поширення одержали трифазні обмотки. Обмотка кожної фази виконується розподіленою, тобто вона на кожному полюсному діленні розміщується в декількох поруч лежачих пазах. Число пазів на полюс і фазу обмотки

$$q = z/(2pt),$$

де p і t – число пар полюсів і число фаз.

Часті усього q вибирається рівним цілому числу ($q = 2 \div 6$). У великих багатополосних машинах q буває дробовим.

Сусідні q котушок (секцій) однієї фази з'єднуються між собою послідовно, утворюючи котушкову групу. Котушкові групи кожної фази можуть з'єднуватися послідовно або шляхом сполучення послідовного з'єднання з паралельним утворювати кілька паралельних віток обмотки.

Розподіл обмотки по пазах сприяє одержанню близьких до синусоїди кривих ЕРС і МРС обмотки.

По конфігурації котушок і послідовності з'єднання їх одна з другою обмотки підрозділяються на петлеві і хвильові. На рис. 22.4 показані котушки петлевої і хвильової обмоток.

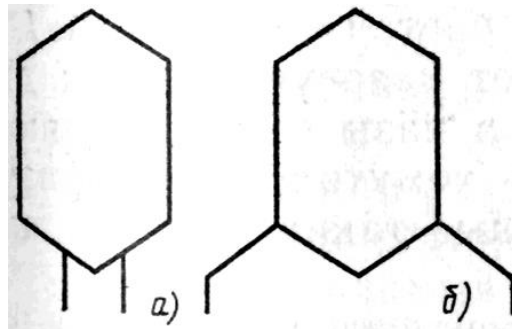


Рис. 22.4. Секції петлевої (а) і хвильової (б) обмоток

Найбільше поширення в МЗС одержали петлеві обмотки. Хвильові обмотки застосовуються в досить потужних машинах (гідрогенераторах) при числі витків у котушці $w_k = 1$, де вони дають істотні вигоди в порівнянні із петлевими за рахунок зменшення довжини з'єднань між котушковими групами. Хвильові обмотки знаходять також застосування для роторів АД.

При одновиткових котушках хвильова двошарова обмотка має в кожному пазу тільки два провідники або стрижня великого перерізу. Котушки таких обмоток часто виконують із двох однакових частин – стрижнів 1, 2 (рис. 22.5). Кожен стрижень має пазову частину і дві половини лобових. Після укладання в пази вони з'єднуються між собою в лобових частинах хомутиком 3, утворюючи виток обмотки. Обмотки, виконані таким чином, називаються стрижневими.

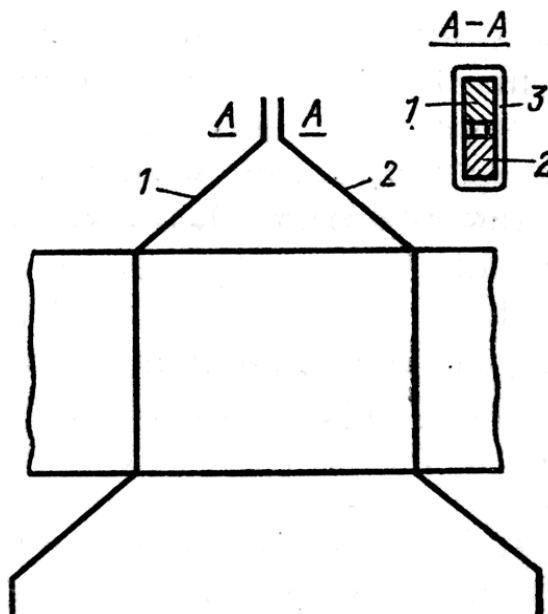


Рис. 22.5. Стрижнева обмотка

Якщо стрижні виконати з масивного провідника, то унаслідок прояву поверхневого ефекту струм по його перерізу буде розподілятися нерівномірно, що приведе до збільшення електричних втрат в обмотці. З метою зниження втрат для обмотки статора, де протікають струми з частотою 50 Гц або вище, стрижні виконуються із декількох ізольованих прямокутних провідників невеликого перерізу, які на протязі пазової частини

переплітаються між собою так, щоб кожний з них позмінно займав усі можливі положення по висоті стрижня. Таке переплетення (рис. 22.6) називається транспозицією. При транспозиції індуктивні й активні опори всіх провідників будуть однаковими і струм навантаження між ними розподілиться рівномірно, унаслідок чого втрати в обмотці зменшаться.

Для обмотки ротора, де протікають струми невеликої частоти, стрижні часто виконуються з одного провідника. Іноді зі стрижнів виконуються і петлеві обмотки.

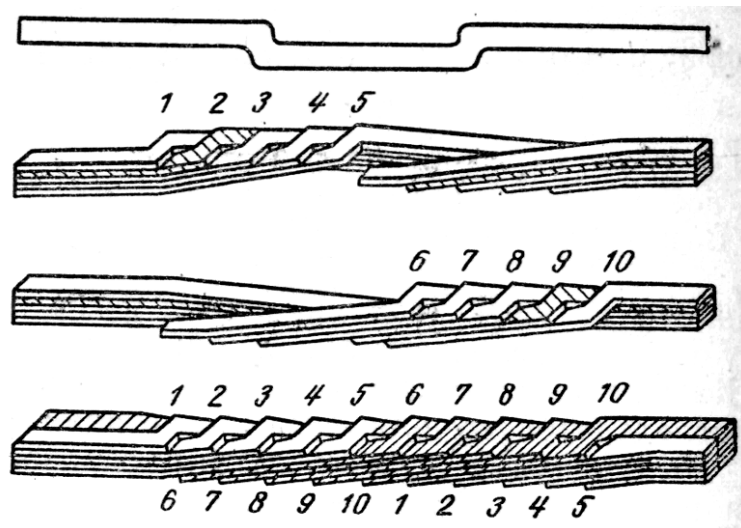


Рис. 22.6. Транспозиційна секція

22.2. Принцип утворення трифазної обмотки

Трифазна обмотка статора складається з трьох ідентичних частин – фаз. Індуковані у фазах ЕРС повинні бути рівні, але зсунені в часі на електричний кут, рівний 120° . Для цього обмотки розташовують у пазах статора зі зміщенням у просторі на такий же кут. На поперечному розрізі двохполюсної машини (рис. 22.7) показано обмотки трьох фаз ($q = 2$), початки яких (A_n, B_n, C_n) мають зміщення на 120° .

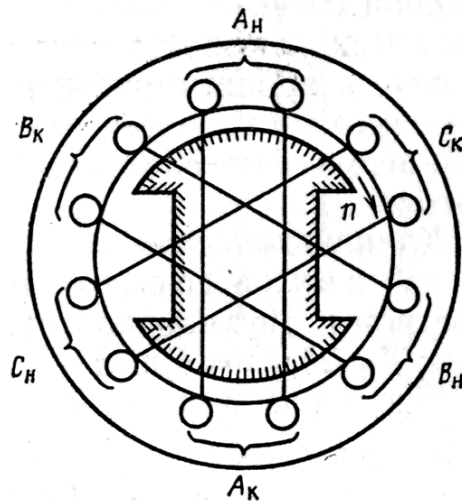


Рис. 22.7. До пояснення принципу утворення трифазної обмотки

Для моменту часу, зображеного на рис. 22.7, максимальна ЕРС індукується в котушках фази *A*. Максимальна ЕРС такого ж напрямку у фазі *B* наступить через проміжок часу, що відповідає повороту ротора на 120° . При повороті ротора ще на 120° максимальна ЕРС буде у фазі *C*. Отже, при такому розміщенні обмоток на статорі вийде необхідний кут зміщення між ЕРС фаз.

З рис. 22.7 випливає, що при трифазній обмотці дво полюсної машини і рівномірному розподілі пазів по окружності статора остання розбивається на шість рівних зон з q пазів у наступній послідовності: $A_H, C_K, B_H, A_K, C_H, B_K$. У машинах з $2p > 2$ зазначена розбивка буде повторюватися на кожній парі полюсних ділень.

СРС: трифазні двошарові обмотки з цілим і дробовим числом пазів на полюс і фазу

Лекція №2

**Тема: «Асинхронні машини змінного струму.
Робочий режим асинхронного двигуна»**

Асинхронні машини змінного струму.

До *асинхронних* відносяться машини змінного струму, частота обертання ротора n яких при постійній частоті змінного струму джерела f_1 змінюється із зміною навантаження і відрізняється від синхронної, тобто від частоти обертання магнітного поля статора n_1 ($n \neq n_1$). Асинхронні машини (АМ) є *оборотними*. Однак асинхронний генератор практично не застосовується, тоді як асинхронний двигун (АД) є основним типом двигунів, як самий простий в конструкції і самий надійний.

Будова АД

Трифазний АД складається із нерухомого статора і ротора, який обертається. Статор і ротор скріплюються в одне ціле з допомогою підшипникових щитів. Двигуни з самовентиляцією в закритому виконанні мають ще з торця кришку-кожух, яка прикриває вентилятор.

Призначення статора – створювати обертове магнітне поле машини з допомогою трифазної обмотки, яка живиться трифазною системою струмів. Призначення ротора – перетворювати електричну енергію в механічну обертового руху з допомогою індукованої ЕРС і струмів в його обмотці. Три однакові котушки симетрично розміщені по колу в сердечнику статора так, щоб їх площини (або осі) знаходились під кутом 120° . Котушки можуть з'єднуватися *зіркою* або *трикутником*. Кожна фаза трифазної обмотки статора створює своє пульсуюче поле.

Робота електричних машин будується на перетворенні електромагнітної енергії, яка передається магнітним полем в повітряному зазорі між статором і ротором.

Якщо обмотку статора АД увімкнути в трифазну мережу, то обертове магнітне поле статора буде перетинати своїми силовими лініями обмотку ротора і індукувати в ній ЕРС. Так як обмотка ротора замкнена накоротко, або на резистори, то ці ЕРС створюють в ній індукційні струми. Взаємодія обертового магнітного поля двигуна з струмами ротора по закону Ампера створює електромеханічну силу, яка діє на провідники обмотки ротора, і обертовий електромагнітний момент двигуна M , який і приводить в обертання ротор.

Таким чином, принцип роботи АД будується на взаємодії обертового магнітного поля з струмами, які індукуються цим же полем в провідниках обмотки ротора.

Напрямок сили взаємодії магнітного поля з струмом ротора такий, що магнітне поле ніби втягує за собою ротор. При цьому частоти обертання поля і ротора двигуна не можуть бути однакові: *частота обертання ротора n завжди менша синхронної частоти обертання потоку n_0 .*

Принцип роботи

Трифазний АД складається із нерухомого статора і ротора, який обертається. Статор і ротор скріплюються в одне ціле з допомогою підшипникових щитів. Двигуни з самовентиляцією в закритому виконанні мають ще з торця кришку-кожух, яка прикриває вентилятор.

Призначення статора – створювати обертове магнітне поле машини з допомогою трифазної обмотки, яка живиться трифазною системою струмів. Призначення ротора – перетворювати електричну енергію в механічну обертового руху з допомогою індукованої ЕРС і струмів в його обмотці.

Три однакові котушки симетрично розміщені по колу в сердечнику статора так, щоб їх площини (або осі) знаходились під кутом 120° . Котушки можуть з'єднуватися *зіркою* або *трикутником*. Кожна фаза трифазної обмотки статора створює своє пульсуюче поле.

Робота електричних машин будується на перетворенні електромагнітної енергії, яка передається магнітним полем в повітряному зазорі між статором і ротором.

Якщо обмотку статора АД увімкнути в трифазну мережу, то обертове магнітне поле статора буде перетинати своїми силовими лініями обмотку ротора і індукувати в ній ЕРС. Так як обмотка ротора замкнена накоротко, або на резистори, то ці ЕРС створюють в ній індукційні струми. Взаємодія обертового магнітного поля двигуна з струмами ротора по закону Ампера створює електромеханічну силу, яка діє на провідники обмотки ротора, і обертовий електромагнітний момент двигуна M , який і приводить в обертання ротор.

Таким чином, *принцип роботи АД будується на взаємодії обертового магнітного поля з струмами, які індукуються цим же полем в провідниках обмотки ротора.*

Напрямок сили взаємодії магнітного поля з струмом ротора такий, що магнітне поле ніби втягує за собою ротор. При цьому частоти обертання поля і ротора двигуна не можуть бути однакові: *частота обертання ротора n завжди менша синхронної частоти обертання потоку n_1 .*

Швидкість обертання магнітного поля з p парами полюсів в секунду:

$$n_1 = \frac{f_1}{p}, \quad (25.1)$$

де f_1 – частота струму статора; або в обертах за хвилину

$$n_1 = \frac{60f_1}{p}. \quad (25.2)$$

Лінійна швидкість обертання поля вздовж кола статора:

$$\mathcal{G}_1 = \pi D_c n_1 = 2p\tau \frac{f_1}{p} = 2\tau f_1, \quad (25.3)$$

де D_c – діаметр внутрішньої розточки статора.

Таблиця 25.1. Швидкість обертання магнітного поля обмоток з різними числами пар полюсів p при $f_1 = 50$ Гц

p	1	2	3	4	5	6	8	10	30	50
n_1 , об/хв	3000	1500	750	600	500	375	300	100	60	

Якщо обмотка ротора є трифазною, то в ній індукується трифазний струм. Цей струм створює обертовий потік ротора Φ_2 , напрямком і швидкістю обертання якого при $n = 0$ (нерухомий ротор)

$$n_2 = \frac{f_2}{p} = \frac{f_1}{p} = n_1 \quad (25.4)$$

такі ж, як і у потоку статора. Тому потоки Φ_1 і Φ_2 обертаються синхронно і утворюють загальний обертовий потік двигуна Φ . При КЗ роторі в його стержнях індукується багатозафазна система струмів i_2 із зсувом в сусідніх стержнях по фазі на кут

$$\gamma = \frac{2\pi p}{z_2}, \quad (25.5)$$

де z_2 – число стержнів ротора.

Обертовий момент утворюється лише активною складовою струму ротора

$$I_{2a} = I_2 \cos\psi_2, \quad (25.6)$$

де ψ_2 – кут зсуву фаз між e_2 і i_2 .

При пуску двигуна ($n = 0$) завжди $0 < \psi_2 < 90^\circ$. в результаті момент, який розвивається, $M > 0$, і якщо $M > M_{cm}$, то ротор двигуна почне обертатися в напрямку обертання поля з швидкістю $n < n_1$, тобто буде обертатися з деяким відставанням, або ковзанням, відносно поля статора.

Ковзання:

$$s = \frac{n_1 - n}{n_1}. \quad (25.7)$$

Швидкість, виражена через ковзання:

$$n = (1 - s)n_1. \quad (25.8)$$

При пуску двигуна ($n = 0$) $s = 1$, а при обертанні ротора синхронно з полем статора (з синхронною швидкістю) $n = n_1$ $s = 0$. При $n = n_1$ магнітне поле статора відносно ротора нерухоме і струми в роторі індукуватися не будуть, тому $M = 0$ і такої швидкості обертання двигун досягнути не може. Тому в режимі двигуна завжди $0 < n < n_1$ і $1 > s > 0$.

Частота струму в обмотці ротора

$$f_2 = p(n_1 - n) = spn_1 = sf_1, \quad (25.9)$$

тобто вторинна частота пропорційна ковзанню.

При частоті струму $f_2 < f_1$ швидкість обертання поля ротора відносно самого ротора n_{2p} також менша n_1 і на основі виразу (25.9)

$$n_{2p} = f_2 / p = sn_1. \quad (25.10)$$

Швидкість обертання поля ротора відносно статора на основі (25.8) і (25.9)

$$n_{2c} = n + n_{2p} = (1 - s)n_1 + sn_1 = n_1, \quad (25.11)$$

тобто швидкість обертання поля ротора відносно статора при будь-якій швидкості обертання ротора n рівна швидкості обертання поля статора n_1 . тому поля статора і ротора при обертовому роторі також обертаються завжди синхронно і утворюють загальне обертове поле.

Якщо ротор машини зовнішнього обертового моменту привести в обертання в напрямку обертання поля статора зі швидкістю більшу за синхронну ($n > n_1$), то ротор буде обгонити поле і машина буде працювати в режимі генератора ($s < 0$).

Якщо ротор обертати в напрямку, зворотному напрямку обертання поля статора ($n < 0$), то машина буде знаходитися в режимі противмикання або режимі електромагнітного гальмування ($s > 1$).

СРС: паспортні дані АД.

Робочий режим асинхронного двигуна.

Двигунний режим ($0 < s < 1$)

Розглянемо, маючи у виді схему заміщення рис. 30.1 процес перетворення активної енергії і потужності при двигунному режимі роботи АМ. У цьому режимі передача енергії в схемі рис. 30.1 відбувається зліва на право.

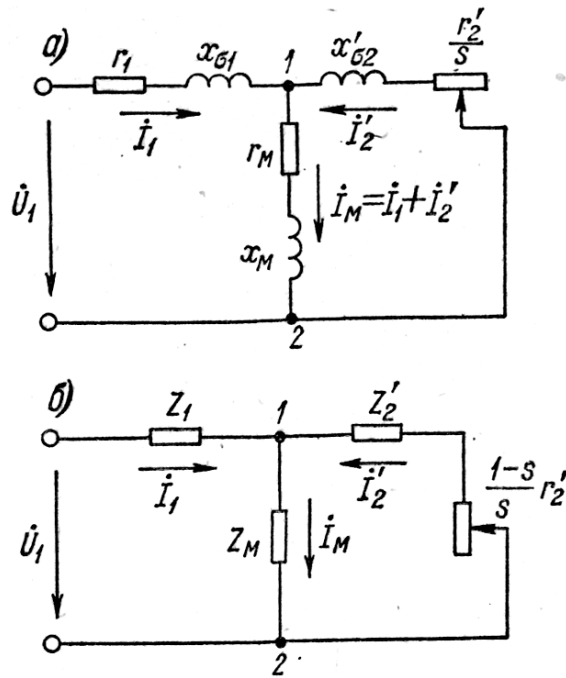


Рис. 30.1. Т-подібні схеми заміщення АМ з урахуванням магнітних утрат

Асинхронний двигун споживає з мережі активну потужність

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1. \quad (30.1)$$

Частина цієї потужності губиться у виді електричних втрат $p_{ел1}$ в активному опорі первинної обмотки:

$$p_{эл1} = m_1 I_1^2 r_1, \quad (30.2)$$

інша частина – у виді магнітних втрат $p_{мг1}$ у сердечнику статора (первинного кола):

$$p_{мг1} = m_1 I_M^2 r_M = \frac{m_1 E_1^2}{r_{мг}} = \frac{m_1 U_{12}^2}{r_{мг}} \quad (30.3)$$

Частина потужності, що залишилася

$$P_{ем} = P_1 - p_{эл1} - p_{мг1} \quad (30.4)$$

являє собою електромагнітну потужність, передану за допомогою магнітного поля зі статора на ротор. На схемі заміщення цієї потужності відповідає потужність в активному опорі вторинного кола r'_2 / s . Тому

$$P_{ем} = m_1 I_2'^2 \frac{r'_2}{s} = m_2 I_2'^2 \frac{r_2}{s}. \quad (30.5)$$

Частина цієї потужності губиться у вигляді електричних утрат $p_{ел2}$ в активному опорі вторинної обмотки r_2' :

$$p_{ел2} = m_1 I_2'^2 r_2' = m_2 I_2^2 r_2. \quad (30.6)$$

Інша частина потужності $P_{ем}$ перетворюється в механічну потужність $P_{мх}$, що розвивається на роторі:

$$P_{мх} = P_{ем} - p_{ел2} \quad (30.7)$$

або на підставі виразів (30.5) і (30.6)

$$P_{мх} = m_1 I_2'^2 r_2' \frac{1-s}{s} = m_2 I_2^2 r_2 \frac{1-s}{s}. \quad (30.8)$$

Частина механічної потужності $P_{мх}$ губиться усередині самої машини у виді механічних втрат $p_{мх}$ (на вентиляцію, на тертя) магнітних втрат у сердечнику ротора $p_{мг2}$ і додаткових втрат p_d . Останні викликані в основному вищими гармоніками магнітних полів.

Додаткові утрати важко піддаються розрахункові й експериментальному визначенню. Тому їх приймають рівними 0,5% від потужності, яка підводиться, при номінальному навантаженні, а при інших навантаженнях ці втрати перераховують пропорційно квадратові первинного струму.

Корисна механічна потужність на валові, або вторинна потужність

$$P_2 = P_{мх} - p_{мх} - p_d. \quad (30.9)$$

Відповідно до викладеного на рис. 30.2, а зображено енергетичну діаграму асинхронного двигуна.

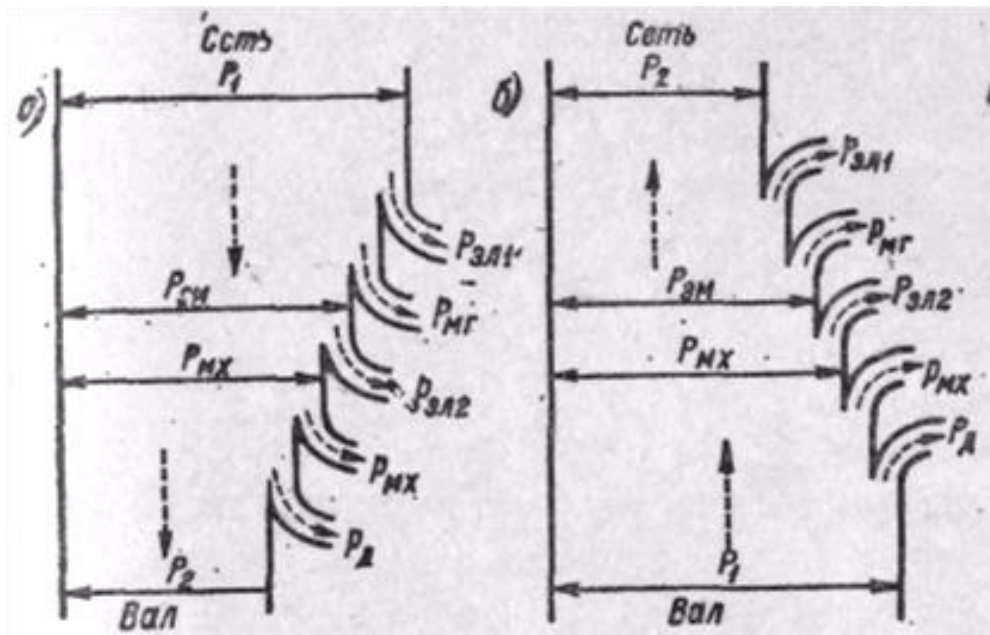


Рис. 30.2. Енергетичні діаграми асинхронної машини при роботі в режимі двигуна (а), генератора (б)

Сума втрат двигуна

$$p_{\Sigma} = p_{\text{эл1}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{эл2}} + p_{\text{мх}} + p_{\text{д}} \quad (30.10)$$

і

$$P_2 = P_1 - p_{\Sigma}. \quad (30.11)$$

ККД двигуна

$$\eta = P_2/P_1 = 1 - p_{\Sigma}/P_1. \quad (30.12)$$

З (30.5), (30.6) і (30.7) впливають наступні важливі співвідношення:

$$p_{\text{эл2}} = sP_{\text{эм}}; \quad (30.13)$$

$$P_{\text{мх}} = (1 - s) P_{\text{эм}}. \quad (30.14)$$

З цих співвідношень видно, що електромагнітна потужність $P_{\text{эм}}$ підрозділяється на складові $p_{\text{эл2}}$ і $P_{\text{мх}}$ пропорційні s і $(1-s)$ і при заданій величині $P_{\text{эм}}$ втрати $p_{\text{эл2}}$ пропорційні ковзанню s . Тому для зменшення $p_{\text{эл2}}$ і одержання високого ККД необхідно, щоб s було мале. У нормальних АД при номінальному навантаженні $s_{\text{н}} = 0,02 \div 0,05$.

Електрична потужність

$$P_s = sP_{\text{эм}}$$

яка розвивається у вторинному колі асинхронного двигуна, називається потужністю ковзання.

На основі схеми заміщення рис. 30.1 можна розглянути так баланс реактивних потужностей асинхронного двигуна. З первинного кола споживається реактивна потужність

$$Q_1 = m_1 U_1 I_1 \sin \varphi_1. \quad (30.15)$$

На створення полів розсіювання первинного кола витрачається реактивна потужність

$$q_1 = m_1 I_1^2 x_{\sigma 1}. \quad (30.16)$$

Реактивна потужність

$$Q_M = m_1 E_1 I_{Mf} = m_1 I_M^2 x_M \quad (30.17)$$

витрачається на створення основного магнітного поля машини, а потужність

$$q_2 = m_1 I_2'^2 x_{\sigma 2}' = m_2 I_2^2 x_{\sigma 2} \quad (30.18)$$

– на створення вторинних полів розсіювання. При цьому

$$Q_1 = Q_M + q_1 + q_2. \quad (30.19)$$

Діаграма реактивних потужностей двигуна зображена на рис. 30.3.

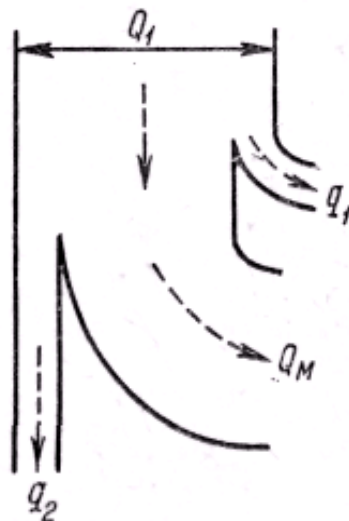


Рис. 30.3. Діаграма перетворення реактивної потужності в АМ

Векторна діаграма асинхронного АД (рис. 30.4) будується на основі схеми заміщення рис. 30.1.

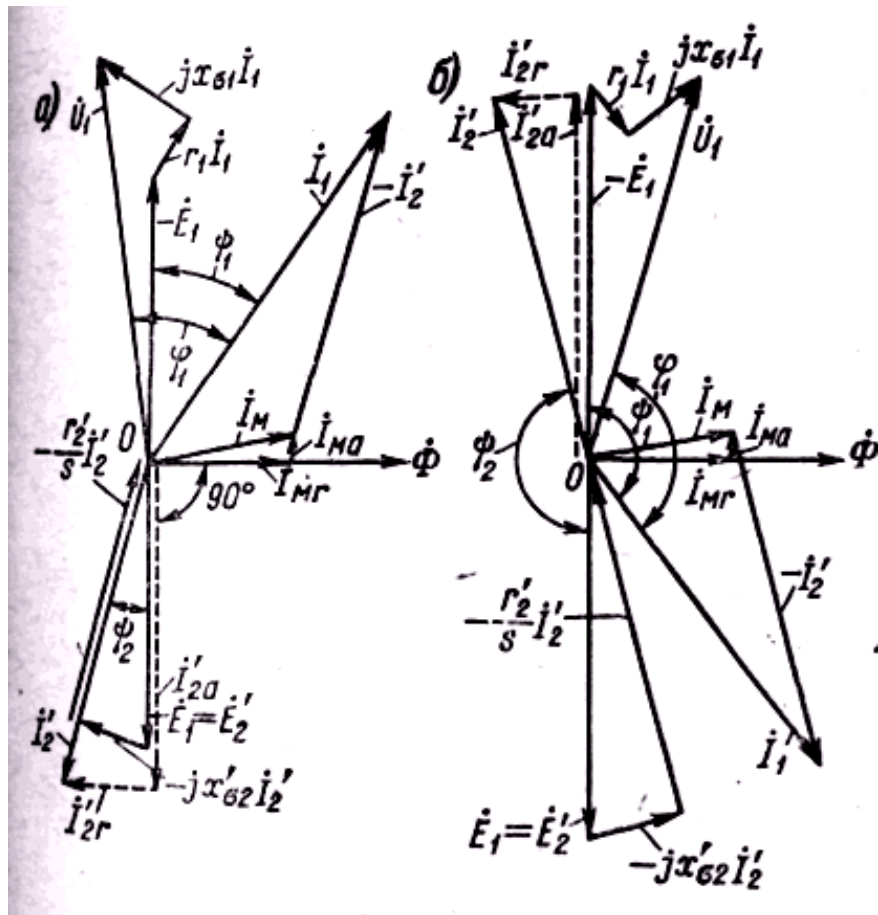


Рис. 30.4. Векторні діаграми асинхронної машини при роботі в режимах двигуна (а), генератора (б)

30.2. Генераторний режим АМ ($-\infty < s < 0$)

Розглянемо на підставі

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{Z_{2s}} = \frac{s\dot{E}_2}{r_2 + jsx_{\sigma 2}}. \quad (30.20)$$

активні і реактивні відносно ЕРС \dot{E}_2 складові струм \dot{I}_2 . Для цього покладемо у (30.20) $\dot{E}_2 = E_2$ і помножимо чисельник і знаменник на спряжений комплекс знаменника. Тоді одержимо

$$\dot{I}_2 = \frac{sE_2 r_2}{r_2^2 + s^2 x_{\sigma 2}^2} - j \frac{s^2 E_2 x_{\sigma 2}}{r_2^2 + s^2 x_{\sigma 2}^2} = I_{2a} - jI_{2r}. \quad (30.21)$$

В двигунному режимі $s > 0$ і обидві складові I_{2a} , I_{2r} струму \dot{I}_2 додатні. Множник $-j$ перед I_{2r} означає поворот вектора \dot{I}_{2r} відносно \dot{I}_{2a} на комплексній площині убік обертання часової стрілки на 90° . Це означає, що \dot{I}_{2r} відстає від \dot{I}_{2a} на 90° , тобто \dot{I}_{2r} є індуктивним струмом.

У генераторному режимі $s < 0$ і, відповідно до (30.21) як і раніше $I_{2r} > 0$, а величина I_{2a} змінює знак, тобто стає негативним і змінює свою фазу на 180° . Фізично це пояснюється тим, що поле обертається відносно ротора у порівнянні з двигунним режимом у зворотну сторону, унаслідок чого змінюються знаки ЕРС E_{2s} і активної складової струму I_2 . В результаті змінюється також знак обертаючого моменту, тобто останній діє проти напрямку обертання і стає гальмуючим.

На підставі викладеного на рис. 30.4, б побудована векторна діаграма асинхронного генератора. Вектор первинного струму

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_m + (-\dot{I}'_2) \quad (30.22)$$

унаслідок повороту \dot{I}'_2 майже на 180° також повертається убік обертання годинної стрілки. При цьому $\varphi_1 > 90^\circ$ і

$$I_{1a} = I_1 \cos \varphi_1 < 0; \quad P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos \varphi_1 < 0,$$

тобто активні складові первинного струму і первинної потужності змінюють знак. Це означає, що машина вже не споживає, як у режимі двигуна, а віддає в мережу активну потужність і активний струм, тобто працює в режимі генератора і перетворює споживану з вала механічну енергію в електричну.

СРС: режим короткого замикання та гальмівні режими

Лекція №3

Тема: «Механічна характеристика та стійкість роботи АД.
Регулювання частоти обертання АД»

Механічна характеристика та стійкість роботи АД.

Механічна характеристика АД

Механічною характеристикою АД називається залежність частоти обертання від обертового моменту двигуна $n(M)$. Вона, згідно іншого визначення, є залежність обертового моменту від ковзання $M(s)$ (рис. 32.1).

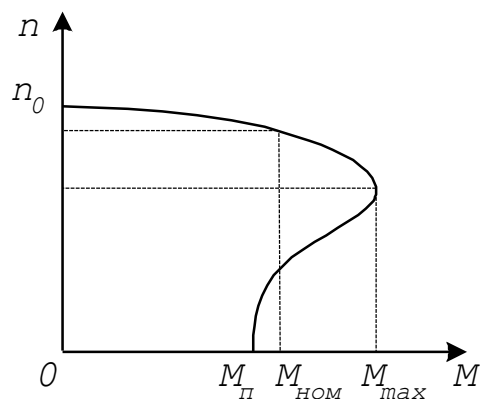


Рис.32.1. Механічна характеристика АД

Побудова залежності $M(s)$ АД по каталожним даним здебільшого реалізується з допомогою *спрощеної формули Клосса*.

Стійкість роботи двигуна характеризується його *перевантажувальною здатністю*:

$$\lambda = M_{\max} / M_{\text{ном}} \quad (32.1)$$

Критичне ковзання:

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right) \quad (32.2)$$

Умови стійкості АД

В загальному випадку, як показано на рис. 32.2, характеристики двигуна $M = f(n)$ і виробничого механізму $M_{\text{СТ}} = f(n)$ можуть мати декілька точок перетину.

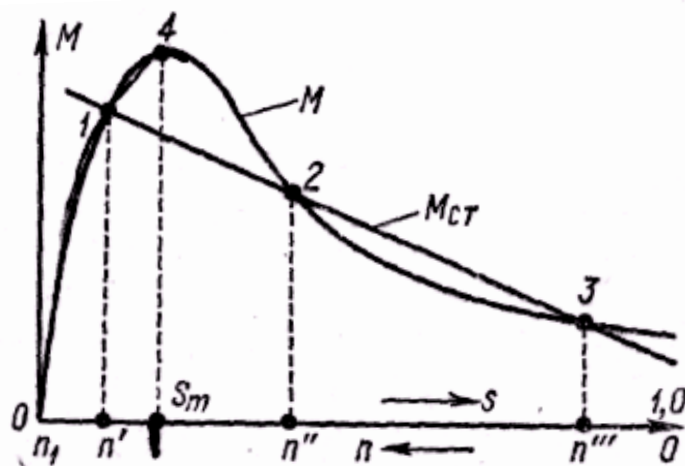


Рис. 32.2. Стійкі (точки 1, 3) і нестійкі (точка 2) режими роботи АД

В точках 1 і 3

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{ст}}{dn}, \quad (32.3)$$

і тому цих точках робота стійка, а в точці 2

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_{ст}}{dn} \quad (32.4)$$

і тому робота нестійка.

При пуску з нерухомого стану двигун досягає стійкої швидкості обертання в точці n''' і подальше збільшення n неможливе, тому що вліво від цієї точки $M_{ст} > M$. Якби двигун працював у режимі, що відповідає точці 2, то при найменших порушеннях режиму і зміні n співвідношення між M і $M_{ст}$ стали б такими, що двигун перейшов би на роботу в режим, що відповідає одній з стійких точок 1 або 3.

Режим роботи в точці 3 на практиці неприйнятний, бо характеризується малою швидкістю обертання, поганим ККД і великими струмами в обмотках, унаслідок чого двигун швидко перегрівається і виходить з ладу. Тому нормальною стійкою областю роботи двигуна вважається ділянка механічної характеристики вліво від точки 4, коли $0 < s < s_{кр}$.

СРС: робочі характеристики АД.

Регулювання частоти обертання АД.

Швидкість обертання ротора асинхронного двигуна

$$n = n_1(1 - s). \quad (36.1)$$

Способи регулювання швидкості обертання АД, відповідно до (36.1), можна підрозділити на 2 класи:

1) регулювання швидкості обертання первинного магнітного поля

$$n_1 = \frac{f_1}{p} \quad (36.2)$$

що досягається або регулюванням первинної частоти f_1 , або зміною числа пар полюсів p двигуна;

2) регулювання ковзання двигуна s при $n_1 = \text{const}$.

У першому випадку ККД двигуна залишається високим, а в другому випадку ККД знижується тим більше, чим більше s , тому що при цьому потужність ковзання

$$P_s = sP_{em} \quad (36.3)$$

витрачається даремно у вторинному колі двигуна (потужність ковзання використовується корисно тільки в каскадних установках).

Регулювання швидкості зміною первинної частоти (частотне регулювання)

Вимагає застосування джерел живлення з регульованою частотою.

Якщо зневажити відносно невеликим спадом напруги первинного кола асинхронного двигуна, то

$$U_1 = E_1 = 4,44f_1\omega_1 k_{об1}\Phi. \quad (36.4)$$

Суттєва зміна потоку Φ при регулюванні n небажана, тому що збільшення Φ проти нормального викликає збільшення насичення магнітного кола і сильне збільшення струму намагнічування, а зменшення Φ викликає недовикористання машини, зменшення перевантажувальної здатності й збільшення струму I_2 при тому ж значенні M . Тому в більшості випадків доцільно підтримувати $\Phi = \text{const}$. При цьому зі співвідношення (36.4) випливає, що одночасно з регулюванням частоти пропорційно їй необхідно змінювати також напругу, тобто підтримувати

$$U_1/f_1 = \text{const}. \quad (36.5)$$

Відхилення від цього правила доцільно тільки у випадку, коли $M_{ст}$ швидко зменшується зі зменшенням n (наприклад, приводи вентиляторів, коли $M_{cm} \sim n^2$).

При широкому діапазоні регулювання краще підтримувати

$$\Phi \sim E_1/f_1 = \text{const}.$$

Регулювання швидкості зміною числа нар полюсів p

Використовується звичайно для двигунів з короткозамкненим ротором, тому що при цьому потрібно змінювати p тільки для обмотки статора.

Змінювати p можна двома способами:

1) застосуванням на статорі декількох обмоток, що розміщені в спільних пазах і мають різні числа пар полюсів p ;

2) застосуванням обмотки спеціального типу, що дозволяє одержати різні значень p шляхом зміни (переключення) схеми з'єднання обмотки.

Застосування декількох обмоток не вигідно, тому що при цьому через обмежене місце в пазах переріз провідників кожної з обмоток потрібно зменшувати, що приводить до зниження потужності двигуна. Використання обмоток з перемиканням числа пар полюсів викликає ускладнення комутаційної апаратури, особливо, якщо з допомогою однієї обмотки бажають отримати більше двох швидкостей обертання. Трохи погіршуються також енергетичні показники двигунів.

Двигуни зі зміною числа пар полюсів називаються багатошвидкісними. Здебільшого вони випускаються на 2, 3 або 4 швидкості обертання.

Регулювання швидкості зменшенням первинної напруги

При зменшенні U_1 момент двигуна змінюється пропорційно U_1^2 і відповідно змінюються механічні характеристики (рис. 36.1), у результаті чого змінюються також значення робочих ковзань $s_1, s_2, s_3 \dots$ при даному виді залежності $M_{ст} = f(s)$.

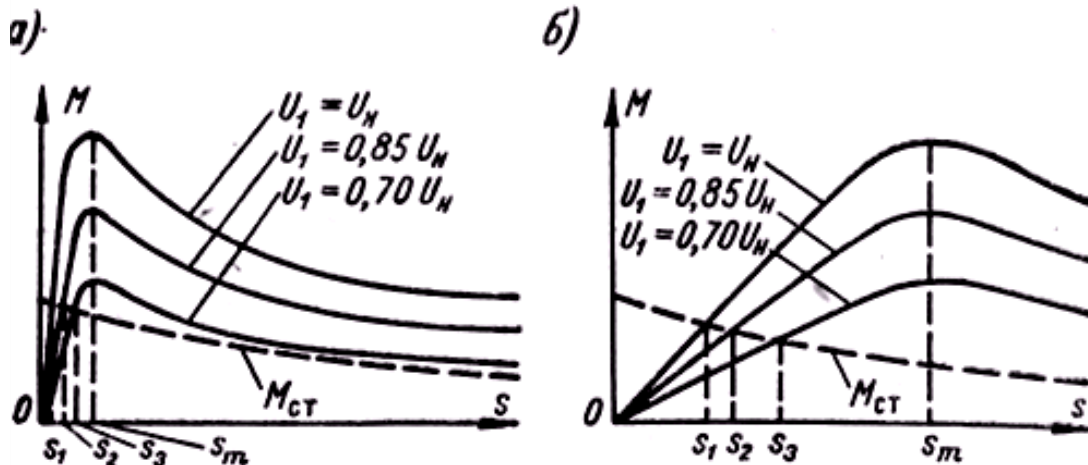


Рис 36.1. Механічні характеристики асинхронних двигунів при різних значеннях первинної напруги

Очевидно, що регулювання s у цьому випадку можливо в межах $0 < s < s_{кр}$. Для одержання досить великого діапазону регулювання швидкості необхідно, щоб активний опір кола ротора і відповідно $s_{кр}$ були достатньо великі.

У зв'язку зі зниженим ККД і розглянутий метод застосовується тільки для двигунів малої потужності. При цьому для регулювання U_L можна використовувати регульовані автотрансформатори або опори, включені послідовно в первинне коло. Для цієї мети застосовують (рис. 36.2) реактори

насичення, регульовані шляхом підмагнічування постійним струмом. При зміні значення постійного струму підмагнічування індуктивний опір реактора змінюється, що приводить до зміни напруги на затисках двигуна. Шляхом автоматичного регулювання струму підмагнічування можна розширити зону регулювання швидкості в область $s > s_{кр}$ і одержати при цьому жорсткі механічні характеристики.

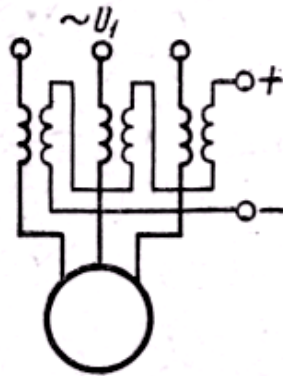


Рис. 36.2. Схема регулювання АД з допомогою реактора з підмагнічуванням постійним струмом

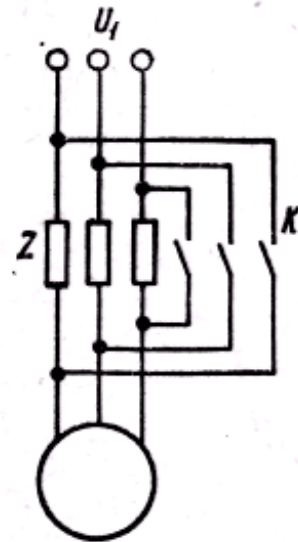


Рис. 36.3. Схема імпульсного регулювання швидкості обертання АД

Імпульсне регулювання швидкості

Здійснюється шляхом періодичного включення двигуна в мережу і відключення його від мережі або шляхом періодичного шунтування за допомогою контактора або напівпровідникових вентилів опорів, включених послідовно в коло статора (рис. 36.3). При цьому двигун безперервно знаходиться в перехідному режимі прискорення або сповільнення швидкості обертання ротора й у залежності від частоти і тривалості імпульсів працює з деякою, приблизно постійною швидкістю обертання.

Подібне регулювання швидкості застосовується тільки для двигунів досить малої потужності ($P_n < < 30 \div 50$ Вт).

Регулювання швидкості обертання АД з фазним ротором

Для двигунів з фазним ротором можна в принципі використовувати всі ті ж способи регулювання швидкості обертання, як і для двигунів з короткозамкненим ротором. Однак на практиці з числа цих способів для двигунів з фазним ротором застосовується тільки спосіб регулювання швидкості обертання за допомогою реакторів насичення. Нижче розглянемо способи регулювання швидкості обертання, що специфічні для двигуна з

фазним ротором і в яких використовується можливість включення регулюючих пристроїв у вторинне коло.

Регулювання швидкості обертання за допомогою реостата в колі ротора. Реостат при цьому повинний бути розрахований на тривалу роботу. При збільшенні активного опору у вторинному колі вид механічної характеристики двигуна змінюється: характеристика стає більш м'якою і ковзання двигуна при тому ж моменті навантаження $M_{ст}$ збільшується.

Розглянутий спосіб регулювання швидкості зв'язаний зі значними втратами енергії в опорі і тому малоекономічний. Він застосовується головним чином при короткочасній або повторно-короткочасній роботі, а також у приводах з вентиляторним моментом. В останньому випадку потужність на валові зі зменшенням швидкості швидко знижується, і тому потужність ковзання і втрати в колі ротора обмежені. До недоліків реостатного регулювання швидкості відносяться також м'якість механічних характеристик і залежність діапазону регулювання від навантаження. Зокрема, регулювання швидкості на холостому ході практично неможливе.

Регулювання швидкості обертання за допомогою введення додаткової ЕРС у вторинне коло двигуна.

Регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна шляхом збільшення його ковзання завжди зв'язано з виділенням у вторинному колі двигуна значної електричної потужності ковзання

$$P_s = sP_{ем},$$

велика частина якої при реостатному регулюванні губиться в реостаті. Тому, природно, виникає думка про корисне використання цієї потужності і про підвищення в такий спосіб ККД установки.

Корисне використання потужності ковзання можливе, якщо замість реостата приєднати до контактних кілець з фазного двигуна приймач електричної енергії у вигляді допоміжної електричної машини, яка підходить для цієї мети.

Ця машина буде працювати в режимі двигуна й здійснювати вплив на регульований асинхронний двигун, розвиваючи напругу на його вторинних затисках, тому що при обертанні допоміжної машини в її якорі індукується ЕРС.

За допомогою додаткової ЕРС шляхом зміни її значення і напрямку, можна здійснити плавне двохзонне регулювання швидкості двигуна: нижче і вище синхронної.

Каскад асинхронного двигуна з машиною постійного струму

Реалізація розглянутого способу регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна за допомогою додаткової ЕРС здійснюється в каскадних з'єднаннях двигуна з допоміжними електричними машинами. Розглянемо тут каскадні з'єднання асинхронного двигуна з машиною постійного струму.

На рис. 36.4, а показана схема каскаду фазного асинхронного двигуна АД, яка приводить у рух деяку робочу машину РМ, з машиною постійного струму МПТ. Коло якоря МПТ приключене до контактних кілець АД через напівпровідниковий випрямляч В, з'єднаний по трифазній мостовій схемі.

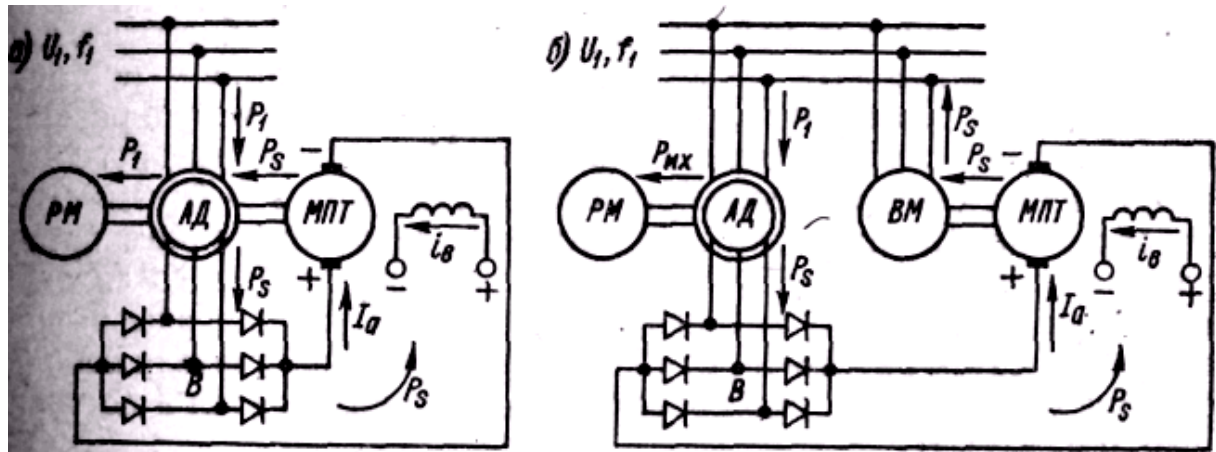


Рис. 36.4. Схеми електромеханічного (а) і електричного (б) каскадів асинхронного двигуна АД з машиною постійного струму МПТ

ЕРС якоря МПТ у даному випадку і є тією розглянутою вище додатковою ЕРС, яка (у даному випадку за допомогою випрямляча В) вводиться у вторинне коло двигуна АД. Регулювання цієї ЕРС і швидкості обертання АД здійснюється шляхом регулювання струму збудження МПТ.

Машина постійного струму МПТ розташована на валові асинхронного двигуна АД. Вона перетворює потужність ковзання P_s , споживану з вторинного кола АД у механічну потужність, що через вал двигуна АД разом з механічною потужністю $P_{мх}$ двигуна передається робочій машині РМ. Такий каскад називається електромеханічним.

На рис. 36.4, б зображена схема каскаду, що відрізняється від схеми рис. 36.4, а тим, що МПТ з'єднано механічно з допоміжною асинхронною або синхронною машиною ВМ. У цьому каскаді потужність ковзання P_s при $s > 0$ передається за допомогою ВМ, яка працює в режимі генератора, назад у мережу змінного струму. При $s < 0$ ВМ працює в режимі двигуна. Такий каскад називається електричним. У цьому каскаді машині РМ передається тільки механічна потужність двигуна АД.

Каскади дозволяють здійснити економічне і плавне регулювання швидкості обертання асинхронного двигуна, однак допоміжні машини і перетворювачі здорожують установку. Тому каскади доцільно застосовувати тільки для приводів потужних виробничих механізмів, що вимагають регулювання швидкості в досить широких межах.

Розглянуті каскадні з'єднання з використанням напівпровідникових вентилів називають вентильними каскадами.

СРС: робота трифазного АД в аномальних режимах: при напрузі і частоті, які відрізняються від номінальних

Лекція №4

Тема: «Гальмівні режими асинхронного двигуна.
Однофазний асинхронний двигун»

Гальмівні режими асинхронного двигуна.

Для асинхронних двигунів можливі такі способи гальмування: *рекуперативне, динамічне і противмикшіням.*

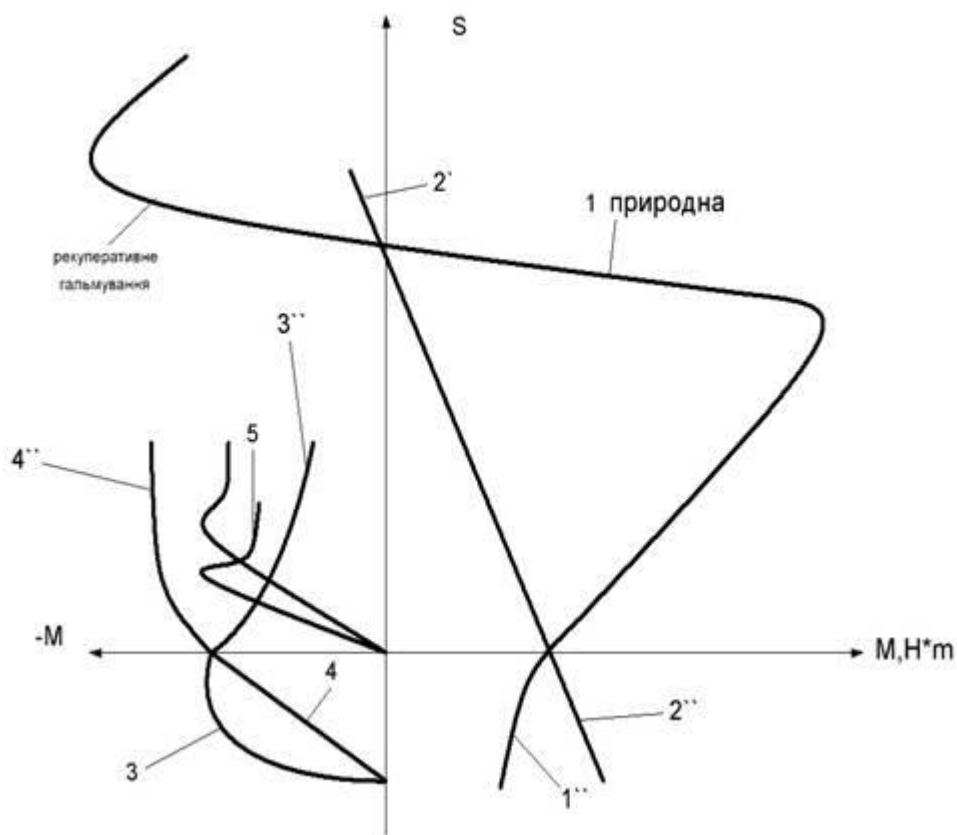


Рис.11. Механічні характеристики асинхронних двигунів у гальмівних режимах:

1' - гальмування противмиканням, зміною напрямку обертання ротора; 2'' - гальмування противмиканням, зміною напрямку обертання ротора при ввімкнених у коло ротора резисторах; 3'' - гальмування противмиканням, зміною напрямку обертання магнітного поля статора; 4'' - гальмування противмиканням, зміною напрямку обертання магнітного поля статора при ввімкнених у коло ротора гальмівних резисторах; 5 - динамічне гальмування; б - динамічне гальмування при введеному в коло ротора гальмівному резисторові

Рекуперативне гальмування виникає тоді, коли ввімкнений в електричну мережу асинхронний двигун під дією активного моменту статичних опорів робочої машини обертається у напрямі магнітного поля

статора зі швидкістю, вищою за синхронну ($W > w_0$). При цьому двигун працює як асинхронний генератор, віддаючи активну енергію в мережу.

Цей метод гальмування економічно дуже вигідний, оскільки супроводиться віддаванням енергії в електричну мережу.

Динамічне гальмування здійснюється так: обмотки статора двигуна вимикають з електричної мережі змінного струму і під'єднують до джерела

постійного струму напругою $U = 0,1 U_{\text{ном}}$. Крім того, у двигуні з фазним ротором обмотку ротора замикають на гальмівні резистори. При цьому, двигун, обертаючись за інерцією, працює як синхронний генератор. Електрична енергія, яку він виробляє, витрачається на нагрівання обмотки ротора і гальмівних резисторів. При зниженні кутової швидкості гальмівний момент знижується і ефективність гальмування зменшується.

Гальмування противмиканням має місце тоді, коли ротор і магнітне поле двигуна обертаються у протилежних напрямках. Протилежність напрямів обертання досягається двома способами: зміною напрямку обертання ротора при незмінному напрямі обертання магнітного поля або, навпаки, зміною напрямку обертання магнітного поля при незмінному напрямі обертання ротора двигуна.

Напрямок обертання ротора при незмінному напрямі обертання магнітного поля змінюється тоді, коли момент статичних опорів робочої машини активний і за своєю величиною більший від моменту, який розвивається двигуном (наприклад, в установках для гальмівного спуску вантажу). При цьому робоча машина обертає ротор двигуна проти напрямку обертання магнітного поля статора. Двигун працює з ковзанням $S > 1$ і розвиває гальмівний момент. Для обмеження струму в обмотках і збільшення гальмівного моменту в коло фазного ротора двигуна вмикають резистори з великим електричним опором.

Напрямок обертання магнітного поля статора при незмінному напрямі обертання ротора можна змінити, змінивши черговість фаз на обмотці статора. При цьому ротор двигуна за інерцією буде продовжувати обертатись у попередньому напрямі, але протилежно новому напрямі обертання магнітного поля. Двигун розвиває гальмівний момент, і рух електропривода сповільнюється. При швидкості, що дорівнює нулю, двигун необхідно

вимкнути з електромережі, в протилежному разі він знову перейде у двигунний режим і обертатиме машину в протилежному напрямі.

Недоліками гальмування противмикашіям є великі втрати енергії, мала жорсткість механічних характеристик; виникнення великих струмів і механічних зусиль у роторі; можливість реверсування двигуна після гальмування.

Однофазний асинхронний двигун.

Двигун з пусковою обмоткою

Однофазний асинхронний двигун не створює пускового моменту. Щоб цей момент з'явився, необхідно під час пуску двигуна створити в ньому обертове магнітне поле. З цією метою на статорі двигуна крім робочої обмотки A застосовують ще одну обмотку – пускову B . Ці обмотки розташовують на статорі звичайно так, щоб їхні осі були зміщені одна відносно іншої на 90^0 ел. Крім того, струми в обмотках статора I_A и I_B повинні бути зсунуті по фазі один відносно одного. Для цього в коло пускової обмотки включають фазозміщуючий елемент (ФЗЕ), у якості якого можуть бути застосовані активний опір, індуктивність або ємність (рис. 38.1). При досягненні частотою обертання значення, близького до номінального, пускову обмотку B відключають за допомогою реле. Таким чином, під час пуску двигун є двофазним, а під час роботи – однофазним.

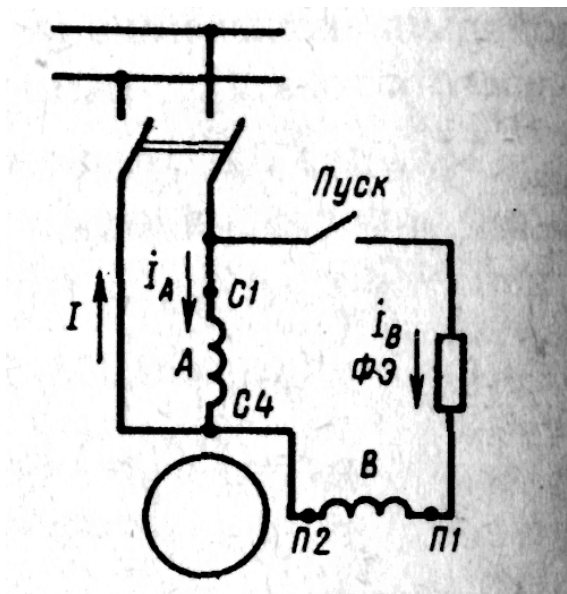


Рис. 38.1. Схема однофазного двигуна з пусковою обмоткою

Для одержання обертового магнітного поля за допомогою двох обмоток на статорі, зміщених одна відносно іншої на 90^0 ел., необхідно дотримувати наступних умов:

а) МРС робочої і пускової обмоток повинні бути рівні і зміщені в просторі одна відносно іншої на 90° ел.;

б) струми в обмотках статора I_A і I_B повинні бути зміщені по фазі один відносно одного на 90° ел.

При *строгому дотриманні* зазначених умов обертове поле статора є *круговим*, що відповідає найбільшому обертовому моменту. При *частковому порушенні* якого-небудь з умов поле статора стає *еліптичним*, яке містить зворотну складову. Зворотна складова поля створює гальмівний момент і погіршує пускові властивості двигуна.

Застосування ємності в якості ФЗЕ дозволяє отримати пусковий момент

$$M_n = (1,6 \div 2,0)M_{ном}$$

На рис. 38.2 приведені механічні характеристики однофазного АД при різних ФЗЕ: 1– активний опір; 2– ємність

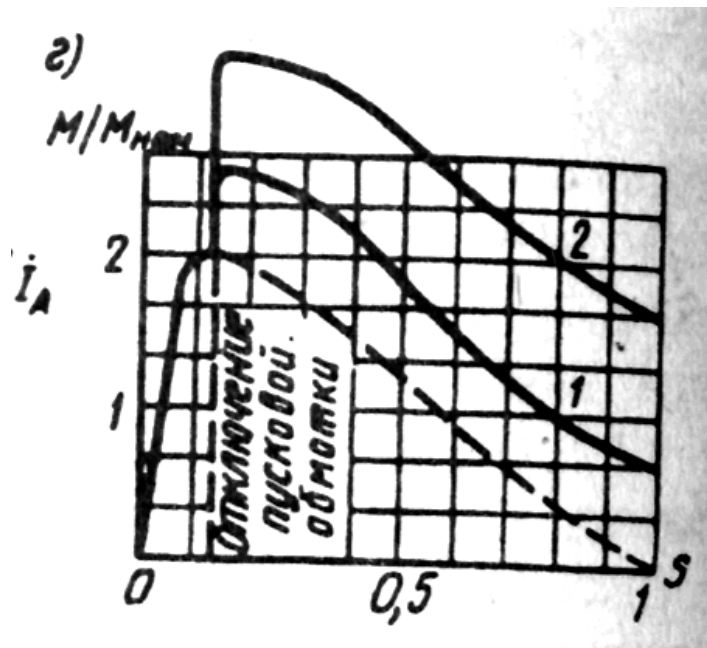


Рис. 38.2. Механічні характеристики однофазного АД при різних ФЗЕ: 1– активний опір; 2– ємність

Конденсаторний двигун

Асинхронний конденсаторний двигун має на статорі дві обмотки, що займають однакове число пазів і зсунуті в просторі відносно один одного на 90° ел. Одну з обмоток – головну – включають безпосередньо в однофазну мережу, а іншу – допоміжну – включають у цю ж мережу, але через робочий конденсатор $C_{раб}$ (рис. 38.3, а).

В конденсаторному двигуні допоміжна обмотка після пуску не відключається і залишається включеною протягом усього періоду роботи, при цьому ємність $C_{раб}$ створює фазове зміщення між струмами I_A і I_B .

Таким чином, якщо однофазний асинхронний двигун по закінченні процесу пуску працює з пульсуючою МРС статора, то конденсаторний двигун – з обертовою. Тому конденсаторні двигуни по своїх властивостях наближаються до трифазних двигунів.

Необхідна для одержання кругового обертового поля ємність (мкФ)

$$C_{\text{раб}} = 1,6 \cdot 10^5 I_A \sin \varphi_A / (f_1 U_A k^2),$$

при цьому відношення напруг на головній U_A і на допоміжній U_B обмотках повинне бути:

$$U_A / U_B = \text{tg} \varphi_A \neq 1. \quad (38.1)$$

Тут φ_A – кут зміщення фаз між струмом I_A і напругою U_A .

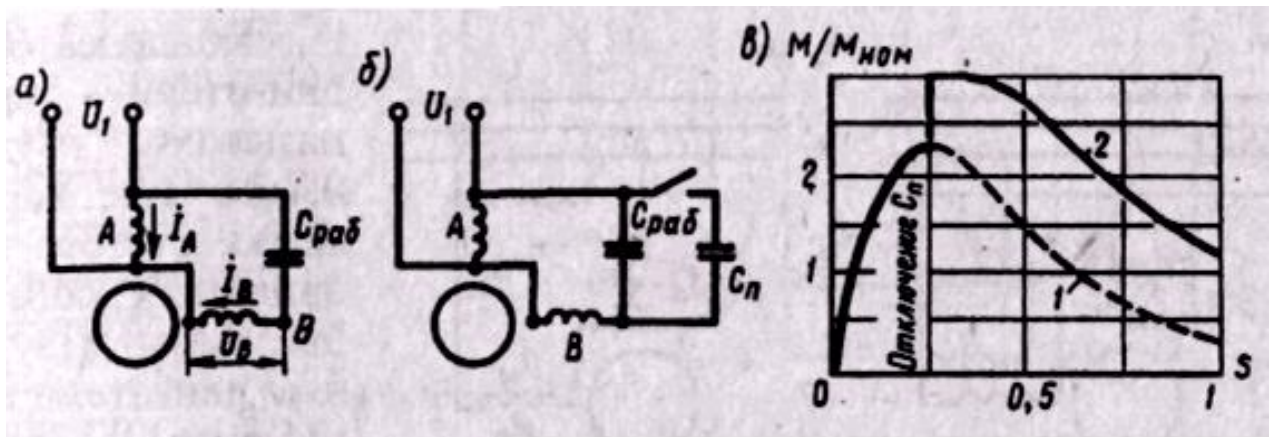


Рис. 38.3. Конденсаторний двигун:

a – з робочою ємністю, *б* – з робочою і пусковою ємностями, *в* – механічні характеристики; *1* – при робочій ємності, *2* – при робочій і пусковій ємностях

Ємність $C_{\text{раб}}$ забезпечує одержання кругового обертового поля лише при одному, цілком визначеному режимі роботи двигуна. Якщо ж зміниться режим (навантаження), то зміняться і струм I_A і фазовий кут φ_A , а отже, і $C_{\text{раб}}$, що відповідає круговому полю. Таким чином, якщо навантаження двигуна відрізняється від розрахункової, те обертове поле двигуна стають еліптичним і робочі властивості двигуна погіршуються. Звичайно розрахунок $C_{\text{раб}}$ здійснюють для номінального навантаження або близької до неї.

Володіючи порівняно високими ККД і коефіцієнтом потужності, конденсаторні двигуни мають погані пускові властивості, тому що ємність $C_{\text{раб}}$ забезпечує кругове поле лише при розрахунковому навантаженні, а при пуску двигуна поле статора еліптичне. При цьому пусковий момент звичайно не перевищує $0,5M_{\text{ном}}$.

Для підвищення пускового моменту паралельно ємності $C_{\text{раб}}$ включають ємність $C_{\text{пуск}}$, яка називається *пусковою* (рис. 38.3, *б*). Величину

$C_{\text{пуск}}$ вибирають, виходячи з умови одержання кругового поля статора при пуску двигуна, тобто одержання найбільшого пускового моменту. По закінченні пуску ємність $C_{\text{пуск}}$ необхідно відключити, оскільки при невеликих ковзаннях у колі обмотки статора, яка містить ємність C і індуктивність L , можливий резонанс напруг, внаслідок чого напруга на обмотці і на конденсаторі може в два-три разів перевищити напругу мережі.

ри виборі типу конденсатора варто пам'ятати, що його робоча напруга визначається амплітудним значенням синусоїдальної напруги, прикладеної до конденсатора U_c . При круговому обертовому полі ця напруга (U) перевищує напруга мережі U_1 і визначається вираженням

$$U_c = U_1 \sqrt{1 + k^2} .$$

$$k = \frac{w_B k_B}{w_A k_A}$$

– коефіцієнт трансформації; (k_A, k_B) – обмоточні коефіцієнти обмоток статора

Конденсаторні двигуни іноді називають двохфазними, тому що обмотка статора цього двигуна містить дві фази. Двохфазні двигуни можуть працювати і без конденсатора або іншого ФЗЕ, якщо до фаз обмотки статора підвести двохфазну систему напруг (дві напруги, однакові за значенням і частотою, але зсунуті одна відносно іншої на 90°).

Для одержання двохфазної системи напруг можна скористатися трифазною лінією з нульовим проводом, включивши обмотки статора так, як показано на рис. 38.4, а: одну обмотку – на лінійну напругу U_{AB} , а іншу – на фазну напругу U_C через автотрансформатор АТ (для вирівнювання значення напруг на фазних обмотках двигуна). Можливе включення двигуна і без нульового проводу (рис. 38.4, б), але в цьому випадку напруги на обмотках двигуна будуть зсунуті по фазі на 120° , що приведе до деякого погіршення робочих властивостей двигуна.

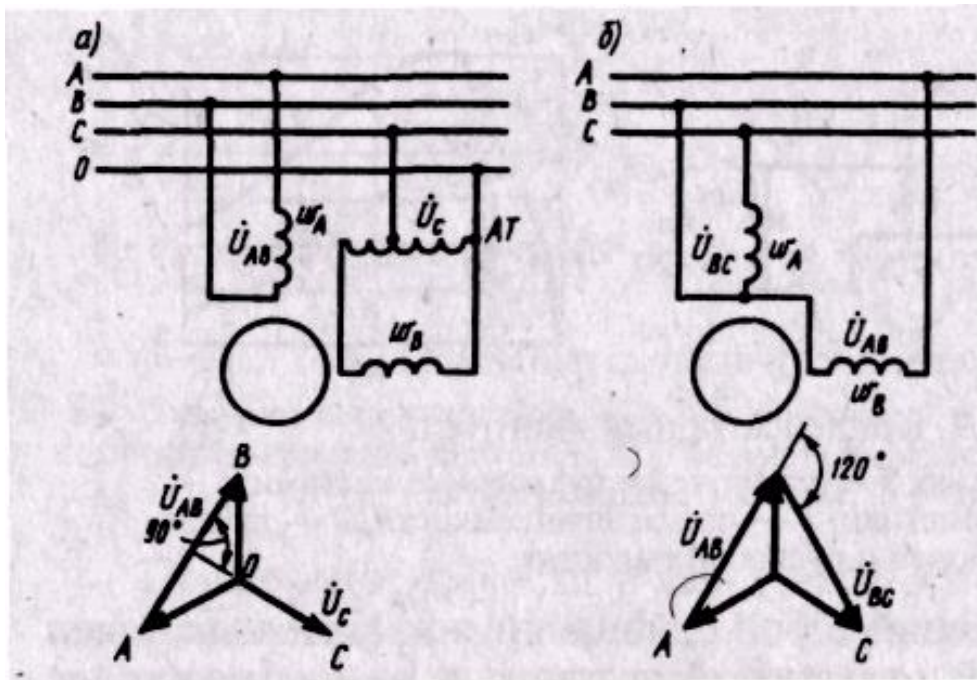


Рис 16.8. Схеми включення двохфазного двигуна в трифазну мережу

СРС: однофазний двигун з екрановими полюсами

Зміст

1. <u>Лекція №1</u>	
Синхронні машини.....	2
2. <u>Лекція №2</u>	
Реакція якоря синхронного генератора.....	9
3. <u>Лекція №3</u>	
Векторні діаграми та робочі характеристики синхронного генератора..	16
4. <u>Лекція №4</u>	
Робота синхронного генератора на автономне навантаження.....	21
5. <u>Лекція №5</u>	
Енергетична діаграма та кутова характеристика синхронного генератора.....	22
6. <u>Лекція №6</u>	
Синхронний двигун.....	27
7. <u>Лекція №7</u>	
Характеристики синхронного двигуна, синхронні компенсатори.....	32
8. <u>Лекція №8</u>	
Синхронні машини спеціального призначення.....	34

Лекція №1

Тема: «Синхронні машини»

Призначення СМ

Синхронні машини використовують головним чином як джерела електричної енергії змінного струму; їх установлюють на потужних теплових, гідравлічних і атомних електростанціях, а також на пересувних електростанціях і транспортних установках (тепловозах, автомобілях, літаках). Конструкція синхронного генератора визначається в основному типом привода. У залежності від цього розрізняють турбогенератори, гідрогенератори і дизель-генератори. Турбогенератори приводяться в обертання паровими або газовими турбінами, гідрогенератори – гідротурбінами, дизель-генератори – двигунами внутрішнього згоряння.

Синхронні машини широко використовують і як електродвигуни при потужності 100 кВт і вище для привода насосів, компресорів, вентиляторів і інших механізмів, що працюють при постійній частоті обертання. Для генерування або споживання реактивної потужності з метою поліпшення коефіцієнта потужності мережі і регулювання її напруги застосовують синхронні компенсатори.

В електро побутових приладах (магнітофонах, програвачах, кіноапаратурі) і системах керування широке застосування одержали різні синхронні мікромашини – з постійними магнітами, індукторні, реактивні, гістерезисні, крокові.

Принцип роботи СМ

Статор 1 синхронної машини (мал. 41.1, а) виконаний так само, як і асинхронної: на ньому розташована трифазна (у загальному випадку багатофазна) обмотка 3. Обмотку ротора 4, що живиться від джерела постійного струму, називають *обмоткою збудження*, тому що вона створює в машині магнітний потік збудження. Обертovu обмотку ротора з'єднують із зовнішнім джерелом постійного струму за допомогою контактних кілець 5 і щіток 6 (рис. 41.1, б). При обертанні ротора 2 з деякою частотою n_2 потік збудження перетинає провідники обмотки статора і індукуює у її фазах змінну ЕРС E , що змінюється з частотою

$$f_1 = pn_2/60. \quad (41.1)$$

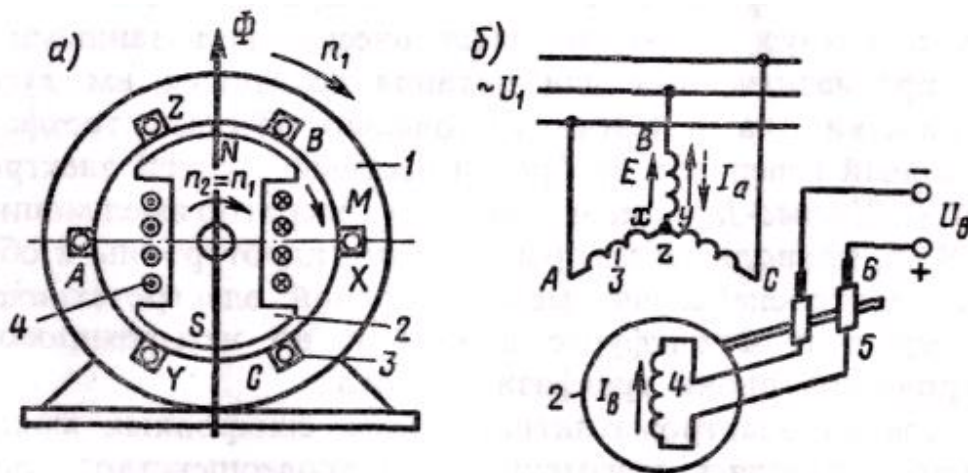


Рис. 41.1. Електромагнітна схема синхронної машини і схема її включення

Якщо обмотку статора підключити до якого-небудь навантаження, то багатозафазний струм I_a , що проходить по цій обмотці, створює обертове магнітне поле, частота обертання якого

$$n_1 = 60f_1/p. \quad (41.2)$$

З (41.1) і (41.2) випливає, що $n_1=n_2$, тобто що ротор обертається з тією ж частотою, що і магнітне поле статора. Тому розглянуту машину називають *синхронною*. Результуючий магнітний потік $\Phi_{рез}$ синхронної машини створюється спільною дією МРС обмотки збудження й обмотки статора, і *результуюче магнітне поле обертається в просторі з тією ж частотою, що і ротор*.

У синхронній машині обмотку, у якій індукуються ЕРС і проходить струм навантаження, називають *обмоткою якоря*, а частина машини, на якій розташована обмотка збудження, – *індуктором*.

Отже, у приведеній машині (рис 41.1) статор є якорем, а ротор – індуктором. Для принципу дії і теорії роботи машини не має значення – обертається якір або індуктор, тому в деяких випадках застосовують синхронні машини з оберненою конструктивною схемою: обмотку якоря, до якої підключають навантаження, розташовують на роторі, а обмотку збудження, що живиться постійним струмом, – на статорі. Таку машину називають *оберненою*. Обернені машини мають порівняно невелику потужність, тому що в них є складним процес віддачі потужності від обмотки ротора.

Синхронна машина може працювати автономно як генератор, що живить підключене до неї навантаження, або паралельно з мережею, до якої приєднані інші генератори. При роботі паралельно з мережею вона може віддавати або споживати електричну енергію, тобто працювати генератором або двигуном.

При підключенні обмотки статора до мережі з напругою U і частотою f_1 струм, що проходить по обмотці, створює, так само як в асинхронній машині, обертове магнітне поле, частота обертання якого визначається по (41.2). У

результаті взаємодії цього поля зі струмом I_{ϕ} , що проходить по обмотці ротора, створюється електромагнітний момент M , який при роботі машини в двигунному режимі є обертаючим, а при роботі в генераторному режимі – гальмівним.

У розглянутій машині на відміну від асинхронної потік збудження (холостого ходу) створюється обмоткою постійного струму, розміщеною здебільшого на роторі. У сталому режимі ротор нерухомий відносно магнітного поля й обертається з частотою обертання $n_1=n_2$ незалежно від механічного навантаження на валові ротора або електричного навантаження. Таким чином, для сталих режимів роботи синхронної машини характерні наступні особливості:

а) ротор машини, що працює як у двигунному, так і в генераторному режимах, обертається з постійною частотою, рівній частоті обертового магнітного поля, тобто $n_2=n_1$;

б) частота зміни ЕРС E , що індукується в обмотці якоря, пропорційна частоті обертання ротора;

в) у сталому режимі ЕРС в обмотці збудження не індукується; МРС цієї обмотки визначається тільки струмом збудження і не залежить від режиму роботи машини.

Будова СМ

Конструктивна схема машини

Синхронна машина має дві обмотки. Одна обмотка підключається до джерела постійного струму і створює основне магнітне поле машини. Ця обмотка називається обмоткою збудження. Іноді в машинах невеликої потужності обмотка збудження відсутня, а магнітне поле створюється постійними магнітами. Інша обмотка є обмоткою якоря і складається з однієї, двох або трьох фаз. Найбільше поширення в синхронних машинах мають трифазні обмотки якоря. В обмотці якоря індукується основна ЕРС машини.

У синхронних машинах найбільше поширення одержала конструкція, коли обмотка якоря розташовується на статорі, а обмотка збудження – на роторі (рис. 41.2). Іноді в синхронних машинах невеликої потужності застосовується обернене виконання, коли обмотка якоря розташовується на роторі, а обмотка збудження – на полюсах статора (рис. 41.3). В електромагнітному відношенні обидві конструкції рівноцінні. Однак із практичних розумінь більш кращою є перша конструкція, тому що в цьому випадку до ковзного контакту на роторі підводиться потужність збудження, що складає лише 0,3–3% номінальної потужності машини. В другому варіанті ковзний контакт варто було б розраховувати на повну потужність машини. Для великих машин, що мають відносно високу напругу і великі струми, забезпечити задовільну роботу такого контакту було б досить важко.

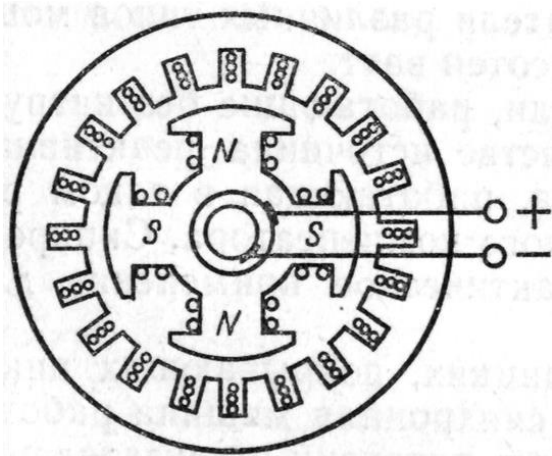


Рис. 41.2. Конструктивний варіант синхронної машини: обмотка якоря розташована на статорі, а обмотка збудження – на роторі

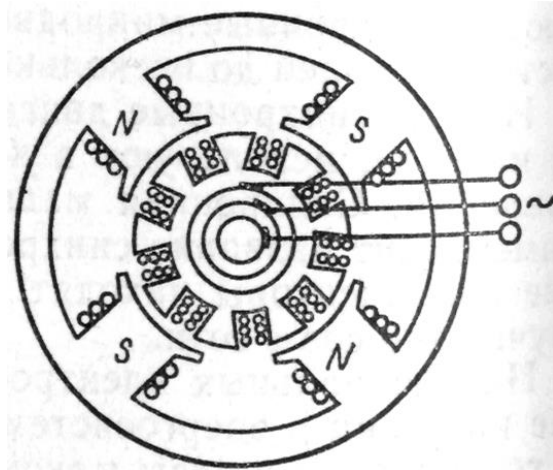


Рис. 41.3. Конструктивний варіант синхронної машини: обмотка якоря розташована на роторі, а обмотка збудження – на статорі

Конструкція якоря

У синхронних машинах застосовують дві різні конструкції ротора: *неявнополюсного* – з неявновираженими полюсами (рис. 41.4, а) і *явнополюсного* – з явновираженими полюсами (рис. 41.4, б).

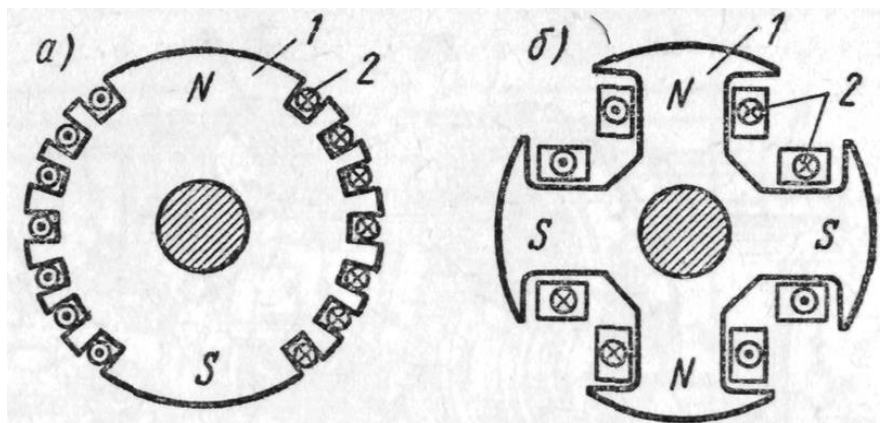


Рис. 41.4. Ротори синхронних неявнополюсної (а) і явнополюсної (б) машин: 1 – сердечник ротора; 2 — обмотка збудження

Двох- і чотирьохполюсні машини великої потужності, що працюють при частоті обертання ротора 1500 і 3000 об/хв, виготовляють, як правило, з неявнополюсним ротором. Застосування в них явнополюсного ротора неможливе за умов забезпечення необхідної механічної міцності кріплення полюсів і обмотки збудження. Обмотку збудження в такій машині розміщують у пазах сердечника ротора, виконаного з масивного сталеві поковки, і зміцнюють немагнітними клинами. Лобові частини обмотки, на які впливають значні відцентрові сили, кріплять за допомогою сталевих масивних бандажів. Для одержання приблизно синусоїдального розподілу

магнітної індукції обмотку збудження укладають у пази, що займають $\frac{2}{3}$ полюсного розподілу.

Явнополюсний ротор звичайно використовують у машинах з чотирма полюсами і більше. Обмотку збудження в цьому випадку виконують у вигляді циліндричних котушок прямокутного перетину, що розміщують на сердечниках полюсів і зміцнюють за допомогою полюсних наконечників. Ротор, сердечники полюсів і полюсні наконечники виготовляють з листової сталі.

У синхронній машині сердечник статора збирають з ізольованих листів електротехнічної сталі і на ньому розташовують трифазну обмотку якоря. На роторі розміщують обмотку збудження. У явнополюсних машинах полюсним наконечникам звичайно додають такий профіль, щоб повітряний зазор між полюсним наконечником і статором був мінімальним під серединою полюса і максимальним у його країв, завдяки чому крива розподілу індукції в повітряному зазорі наближається до синусоїди.

У полюсних наконечниках синхронних двигунів з явнополюсним ротором розміщують стрижні пускової обмотки (рис. 41.5), виконаної з матеріалу з підвищеним питомим електричним опором (латуні). Таку ж обмотку (типу «біляча клітка»), що складається з мідних стрижнів, застосовують і в синхронних генераторах; її називають заспокійливою або демпферною обмоткою, тому що вона забезпечує швидке загасання коливань ротора, що виникають у перехідних режимах роботи синхронної машини. Якщо синхронна машина виконана з масивними полюсами, то при пуску і перехідних режимах у них виникають вихрові струми, дія яких еквівалентна дії струму в короткозамкнутій обмотці.

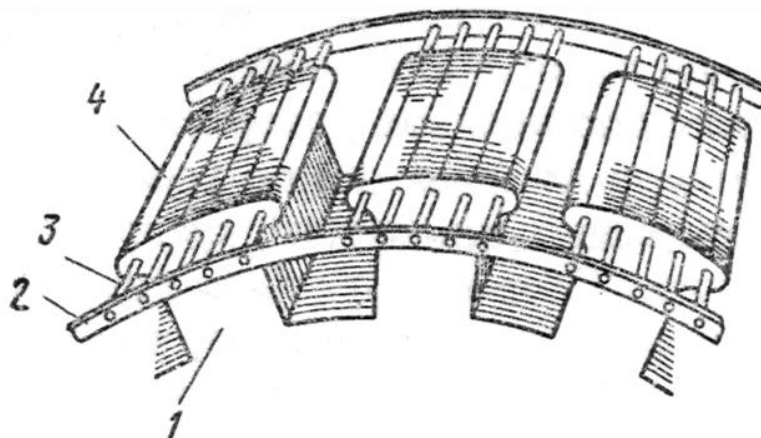


Рис. 41.5. Будова пускової обмотки в синхронних двигунах: 1 – полюси ротора; 2 – короткозамикаючі кільця; 3 – стержні «білячої клітки»; 4 – полюсні наконечники

Живлення обмотки збудження

У залежності від способу живлення обмотки збудження розрізняють системи незалежного збудження і самозбудження. При *незалежному*

збудженні, як джерело для живлення обмотки збудження служить генератор постійного струму (збудник), установлений на валу ротора синхронної машини (рис. 41.6, а), або окремий допоміжний генератор, що приводиться в обертання синхронним або асинхронним двигуном. При *самозбудженні* обмотка збудження живиться від обмотки якоря через керований або некерований випрямляч – здебільшого напівпровідниковий (рис. 41.6, б). Потужність, необхідна для збудження, порівняно невелика і складає 0,3–3% від потужності синхронної машини.

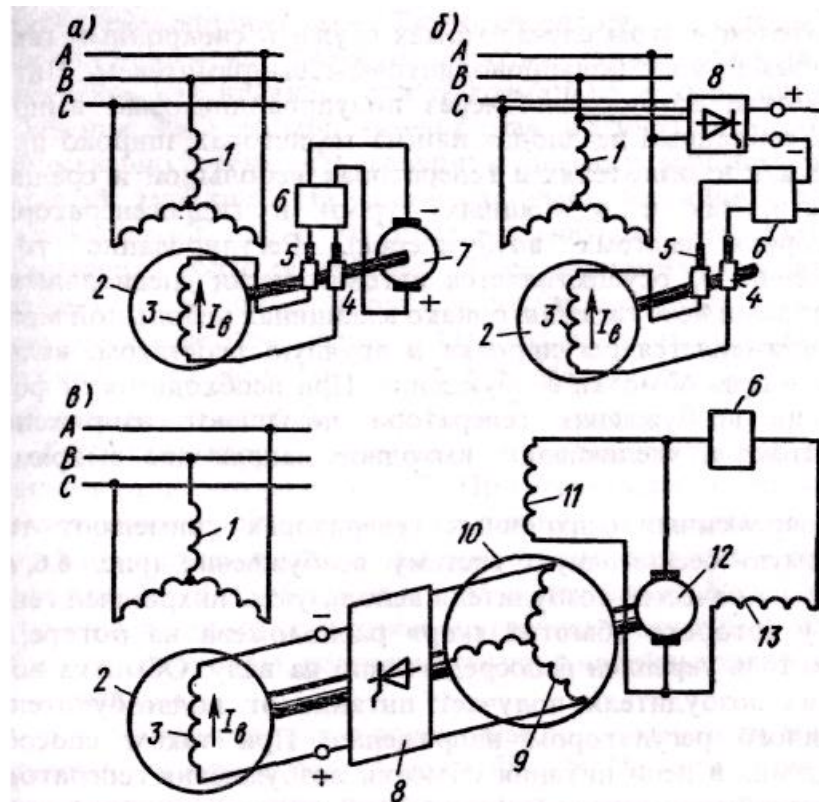


Рис. 41ю.6. Схеми збудження синхронної машини: 1 – обмотка якоря; 2 – ротор генератора; 3 – обмотка збудження; 4 – кільця; 5 – щітки; 6 – регулятор напруги; 7 – збудник; 8 – випрямляч; 9 – обмотка якоря збудника; 10 – ротор збудника; 11 – обмотка збудження збудника; 12 – підзбуджувач; 13 – обмотка збудження підзбуджувача

У потужних генераторах крім збудника здебільшого застосовують *підзбуджувач* – невеликий генератор постійного струму, що служить для збудження основного збудника. Основним збудником у цьому випадку може служити синхронний генератор разом з напівпровідниковим випрямлячем. Живлення обмотки збудження через напівпровідниковий випрямляч, зібраний на діодах або на тиристорах, широко застосовують як у двигунах і генераторах невеликої і середньої потужності, так і в потужних турбо- і гідрогенераторах (тиристорна система збудження). Регулювання струму збудження I_e здійснюється автоматично спеціальними регуляторами збудження, однак у машинах невеликої потужності застосовується

регулювання і вручну реостатом, включеним у коло обмотки збудження. При необхідності форсування збудження генератора підвищують напругу збудника і збільшують вихідну напругу випрямляча.

У сучасних синхронних генераторах застосовують так звану безщіткову систему збудження (рис. 41.6, в). При цьому як збудник використовують синхронний генератор, у якого обмотка якоря розташована на роторі, а випрямляч закріплений безпосередньо на валу. Обмотка збудження збудника одержує живлення від підбуджувача, постаченого регулятором напруги. При такому способі збудження в колі живлення обмотки збудження генератора відсутні ковзні контакти, що істотно підвищує надійність системи збудження.

Лекція №2

Тема: «Реакція якоря синхронного генератора»

Реакція якоря

Розглянемо роботу трифазного синхронного генератора в автономному режимі, коли до фаз обмотки статора підключені рівні й однорідні опори (симетричне навантаження). У цьому випадку по фазних обмотках генератора проходять рівні струми, зсунуті за часом відносно один одного на 120° . Ці струми створюють магнітне поле якоря, що обертається з частотою n_1 рівній частоті обертання ротора n_2 . Отже, магнітні потоки якоря Φ_a і збудження Φ_b взаємно нерухомі і результуючий потік машини $\Phi_{рез}$ при навантаженні створюється сумарною дією МРС F_b обмотки збудження і МРС F_a обмотки якоря.

Однак у синхронній машині (на відміну від асинхронної) МРС обмотки ротора (збудження) не залежить від навантаження, тому результуючий потік при роботі генератора в розглянутому режимі істотно відрізняється від потоку при холостому ході.

Вплив МРС якоря на магнітне поле синхронної машини називають *реакцією якоря*. Так як під дією реакції якоря змінюється результуючий потік у машині, напруга генератора, що працює в автономному режимі, залежить від значення і характеру навантаження, а також від індивідуальних особливостей машини: значення МРС обмотки збудження, властивостей магнітної системи й ін. Розглянемо, як виявляється реакція якоря при двох основних конструктивних формах синхронних машин — неявнополюсних і явнополюсних.

Реакція якоря в неявнополюсній машині

У цій машині повітряний зазор між статором і ротором по всій окружності залишається незмінним, тому результуючий магнітний потік машини $\Phi_{рез}$ і створювану ним ЕРС E при будь-якому навантаженні можна визначити по характеристиці холостого ходу, виходячи з результуючої МРС $F_{рез}$. Однак при відсутності насичення в магнітному колі машини цей метод визначення потоку $\Phi_{рез}$ можна істотно спростити, тому що від додавання зазначених МРС можна перейти до безпосереднього додавання просторових векторів відповідних потоків:

$$\vec{\Phi}_{рез} = \vec{\Phi}_b + \vec{\Phi}_a. \quad (6.6)$$

Розглянемо вплив реакції якоря на робочі властивості синхронної машини при різних кутах зсуву фаз ψ між ЕРС E_0 і струмом I_a в обмотці якоря. Цей

кут визначається характером навантаження, тобто значеннями опорів R , X_L і X_C навантаження.

При $\psi=0$ (мал. 6.19,а і 6.20, а) струм у фазі $AХ$ досягає максимуму в момент часу, коли осі полюсів N і S ротора збігаються з віссю середнього паза розглянутої обмотки. Відомо, що в машинах змінного струму вісь магнітного потоку, створюваного усіма фазами обмотки якоря, збігається з віссю тієї фази, струм у якій максимальний. Отже, у даний момент часу вісь потоку якоря збігається з віссю фази $AХ$, тобто відстає від осі потоку ротора на 90 електричних градусів.

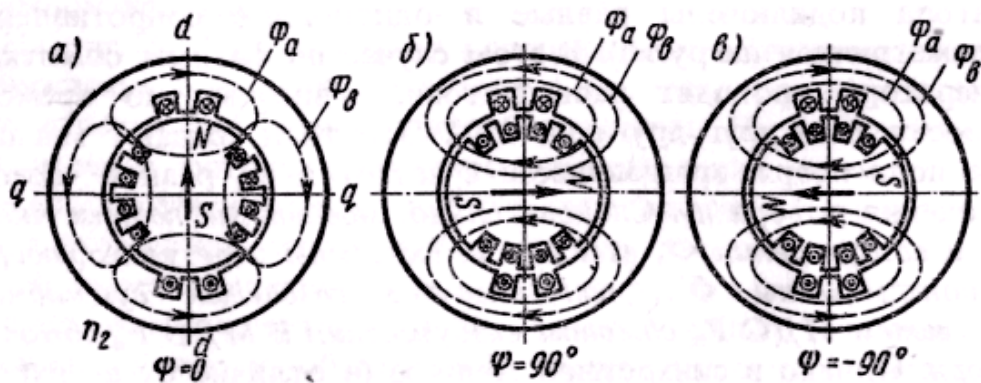


Рис. 6.19. Магнітні потоки в неявнополюсній машині при різних кутах ψ навантаження

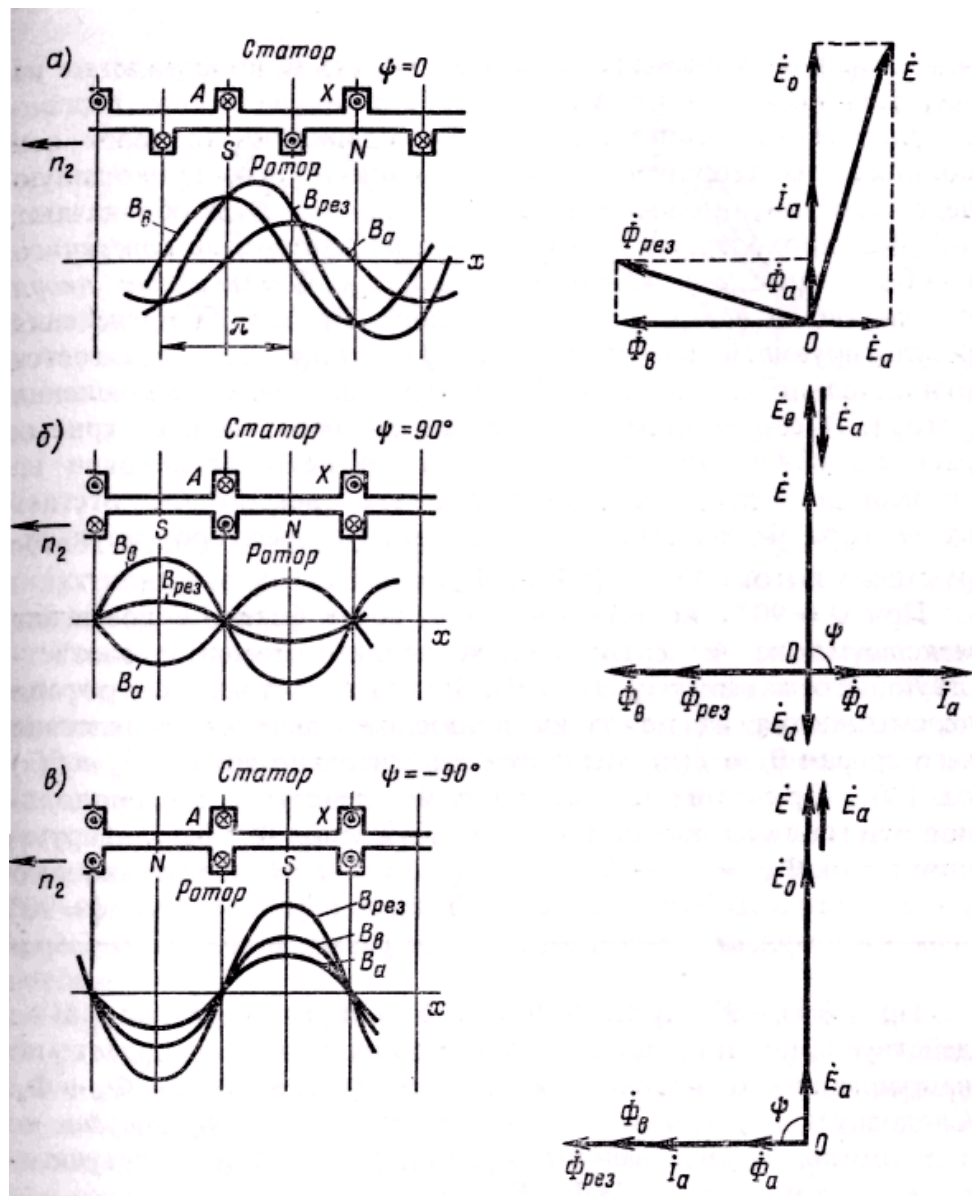


Рис. 6.20. Криві розподілу індукції в неявнополюсній машині і векторні діаграми потоків і ЕРС при різних кутах ψ

Для цього випадку показані діаграми розподілу основних гармонік магнітних полів. Крива розподілу індукції $B_\alpha = f(x)$ для двополюсної машини зміщена відносно кривої індукції $B_\beta = f(x)$ у просторі на 90° , тобто потік якоря Φ_α діє в напрямку, перпендикулярному дії потоку збудження Φ_β (поперек осі полюсів).

У теорії синхронної машини вісь, що проходить через середину полюсів, називають *подовжньою* і позначають $d-d$; вісь, що проходить між полюсами, називають *поперечною* і позначають $q-q$.

Отже, при $\psi = 0$ потік якоря діє по поперечній осі машини. Крива розподілу результуючої індукції $B_{рез} = f(x)$ при цьому зміщується відносно кривої $B_\beta = f(x)$ проти напрямку обертання ротора. Відповідно до просторового зміщення кривих розподілу індукції зміщуються і вектори потоків на тимчасовій векторній діаграмі, тобто вектор Φ_α відстає від вектора

Φ_B на 90° . При цьому модуль вектора результуючого потоку $\Phi_{рез} = \sqrt{\Phi_B^2 + \Phi_a^2}$.

При $\psi=90^\circ$ (мал. 6.19,6 і 6.20,6) струм у фазі $AХ$ досягає максимуму на чверть періоду пізніше моменту, що відповідає максимумові ЕРС E_0 . За цей час полюси ротора переміщуються на половину полюсного розподілу, унаслідок чого крива $B_a=f(x)$ зміщується відносно кривої $B_e=f(x)$ на 180° . При цьому потік якоря Φ_a діє по подовжній осі машини проти потоку збудження Φ_B ; результуючий потік $\Phi_{рез}=\Phi_B-\Phi_a$ сильно зменшується, унаслідок чого зменшується і ЕРС якоря E . Таким чином, *при $\psi=90^\circ$ реакція якоря діє на машину розмагнічуючим чином.*

При $\psi=90^\circ$ (мал. 6.19,в і 6.20,в) потік якоря також діє по подовжній осі машини, але збігається по напрямку з потоком збудження, тобто $\Phi_{рез}=\Phi_B+\Phi_a$. Отже, *при $\psi=-90^\circ$ реакція якоря діє на машину підмагнічуючим чином, збільшуючи її результуючий потік $\Phi_{рез}$ і ЕРС E .*

Висновки, отримані на підставі розглянутих трьох випадків, можна поширити і на загальний випадок, коли $-90^\circ < \psi < 90^\circ$. При цьому характерним є те, що *відстаючий струм* (активно-індуктивне навантаження) *розмагнічує машину, а випереджальний струм* (активно-ємнісне навантаження) *підмагнічує її.*

ЕРС E при роботі генератора під навантаженням можна розглядати як суму двох складових

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_a \quad (6.7)$$

ЕРС E_a пропорційна потоковій Φ_a , а при відсутності насиченні – і струму I_a в обмотці якоря, тому її можна розглядати як ЕРС самоіндукції, індуковану в обмотці якоря, і представити у виді $\dot{E}_a = -jI_a X_a$, де X_a – індуктивний опір синхронної машини, обумовлений потоком якоря.

Реакція якоря в явнополюсній машині

У цій машині повітряний зазор між статором і ротором не залишається постійним – він розширюється в напрямку до країв полюсів і різко збільшується в зоні міжполюсного простору. Отже, потік якоря тут залежить не тільки від значення МРС якоря F_a , але і від положення кривої розподілу цієї МРС $F_a=f(x)$ відносно полюсів ротора, тому що та сама МРС якоря в залежності від її просторового положення створює різні магнітні потоки.

Так, наприклад, при куті $\psi=0$ (мал. 6.21, а), коли потік якоря спрямований по поперечній осі машини ($q-q$), крива розподілу індукції $B_a=B_{aq}$ має сідлоподібну форму, хоча МРС якоря F_a розподілена синусоїдально. При цьому максимумові МРС F_a відповідає невелика індукція, тому що магнітний опір повітряного зазору максимальний.

При куті $\psi=90^\circ$ (мал. 6.21,б), коли потік якоря спрямований по подовжній осі машини, крива розподілу індукції $B_a=B_{ad}$ розташована симетрично

відносно осі полюсів $d-d$. У цьому випадку індукція має більше значення, ніж при $\psi=0$, тому що магнітний опір повітряного зазору в даному місці невеликий. Відповідно різні максимальні значення мають і перші гармоніки B_{ad1} і B_{aq1} зазначених кривих (штрихові лінії).

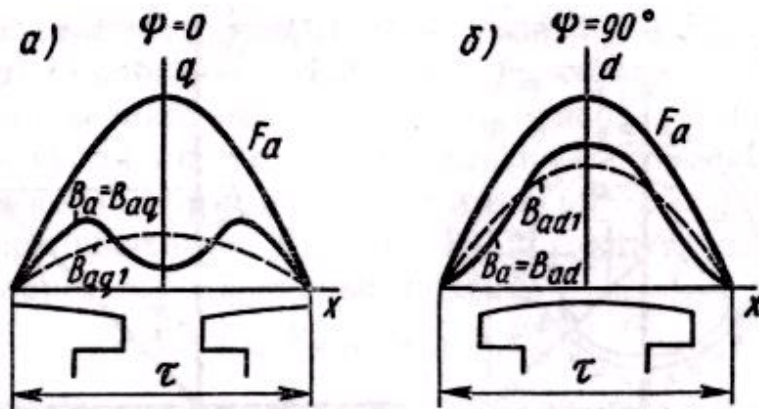


Рис. 6.21. Криві розподілу МРС якоря і створюваної нею індукції в явнополісній машині

У зв'язку зі зміною результуючого опору повітряного зазору при різних режимах явнополісної машини при аналізі її роботи використовують так званий *метод двох реакцій*. Відповідно до цього методу, МРС якоря F_a у загальному випадку представляють у виді суми двох складових – *подовжньої* $F_{ad} = F_a \sin \psi$ і *поперечної* $F_{aq} = F_a \cos \psi$ (мал. 6.22, а), причому $\vec{F}_a = \vec{F}_{ad} + \vec{F}_{aq}$. Подовжня складова \vec{F}_{ad} створює подовжній потік якоря Φ_{ad} , що індукуює в обмотці якоря ЕРС E_{ad} , а поперечна складова \vec{F}_{aq} – поперечний потік Φ_{aq} , індукуюючий ЕРС E_{aq} , причому приймають, що ці потоки не роблять впливу один на одного. Відповідно до прийнятого методу струм якоря I_a , що створює МРС F_a , також представляють у виді двох складових – подовжньої I_d , і поперечної I_q (мал. 6.22,б).

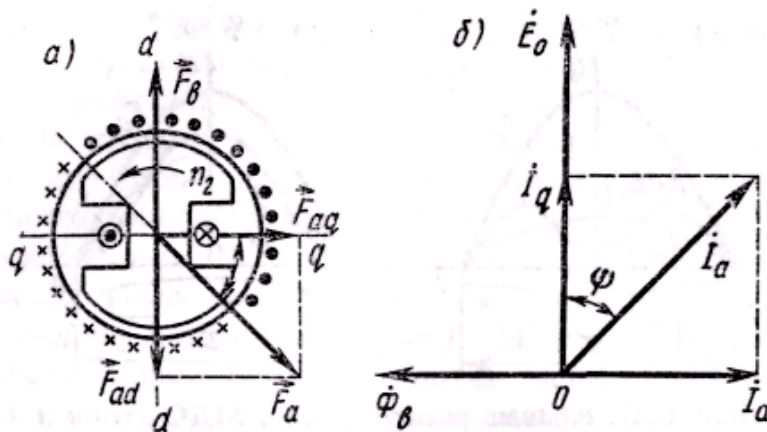


Рис. 6.22. Подовжні і поперечні складові векторів МРС F_a і струму якоря I_a

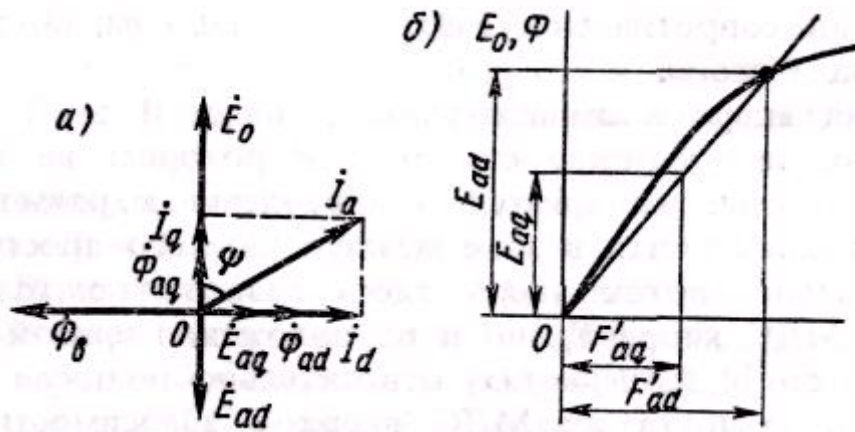


Рис. 6.23. Векторна діаграма потоків Φ_{ad} і Φ_{aq} і ЕРС E_{ad} і E_{aq} явнополюсної машини і їх визначення по характеристиці холостого ходу

Магнітні потоки Φ_{ad} і Φ_{aq} і індуковані ними ЕРС E_{ad} і E_{aq} (мал. 6.23, а) можна визначити по кривій намагнічування машини або по спрямленій характеристиці (мал. 6.23, б). Однак крива намагнічування будується для МРС збудження, що має не синусоїдальний, а прямокутний розподіл уздовж окружності якоря. Щоб скористатися цією кривою або спрямленою характеристикою, МРС F_{ad} і F_{aq} варто привести до прямокутного МРС збудження F_B , тобто знайти їхні еквівалентні значення F'_{ad} і F'_{aq} .

Встановлення еквівалентних значень F'_{ad} і F'_{aq} роблять на наступній підставі: МРС F_{ad} і F_{aq} створюють у повітряному зазорі машини індукції i_{ad} і i_{aq} , розподілені уздовж окружності якоря так само, як і індукції, створювані МРС F_a відповідно при кутах $\psi=0$ і $\psi=90^\circ$ (див. мал. 6.21, а, б). Перші гармоніки B_{ad1} і B_{aq1} кривих $B_{ad}=f(x)$ і $B_{aq}=f(x)$ утворюють магнітні потоки

$$\Phi_{ad} = F_{ad}/R_{mad}; \quad \Phi_{aq} = F_{aq}/R_{maq},$$

де R_{mad} і R_{maq} – магнітні опори для відповідних потоків, що враховують не тільки форму повітряного зазору, але і синусоїдальність кривої розподілу МРС F_{ad} і F_{aq} уздовж окружності якоря.

МРС збудження може створювати такі ж потоки Φ_{ad} і Φ_{aq} , при менших значеннях МРС F'_{ad} и F'_{aq} :

$$\begin{aligned} \Phi_{ad} &= F_{ad}/R_{mad} = F'_{ad}/R_{м.в}; \\ \Phi_{aq} &= F_{aq}/R_{maq} = F'_{aq}/R_{м.в}. \end{aligned}$$

З останніх виразів можна знайти коефіцієнти реакції якоря k_d і k_q , що характеризують зменшення ефективних значень МРС якоря:

$$k_d = F'_{ad}/F_{ad} = R_{м.в}/R_{mad}; \quad k_q = F'_{aq}/F_{aq} = R_{м.в}/R_{maq} \quad (6.8)$$

де $R_{м.в}$ – магнітний опір потоку збудження, що враховує форму повітряного зазору по подовжній осі машини і прямокутний розподіл МРС F_B уздовж окружності якоря.

Коефіцієнти k_d і k_q фізично характеризують зменшення магнітного опору для потоку Φ_b у порівнянні з потоками Φ_{ad} і Φ_{aq} . Звичайно $k_d=0,80-0,95$; $k_q=0,30-0,65$.

У машині з явно вираженими полюсами ЕРС E при роботі генератора під навантаженням можна представити як суму трьох складових:

$$\dot{E} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} \quad (6.9)$$

ЕРС E_{ad} і E_{aq} , індуковані подовжнім Φ_{ad} і поперечним Φ_{aq} потоками якоря, являють собою власне кажучи ЕРС самоіндукції, тому що потоки Φ_{ad} і Φ_{aq} створюються МРС F_{ad} і F_{aq} , пропорційними струмам I_d і I_q . Тому для ненасиченої машини можна вважати, що

$$\dot{E}_{ad} = -j\dot{I}_d X_{ad}; \quad \dot{E}_{aq} = -j\dot{I}_q X_{aq} \quad (6.10)$$

де X_{ad} і X_{aq} – індуктивні опори обмотки якоря, що відповідають полям подовжньої і поперечної реакції якоря. Для машини з неявновираженими полюсами МРС якоря приводяться до МРС обмотки збудження по формулі

$$F'_a = k_d F_a$$

Лекція №3

Тема: «Векторні діаграми та робочі характеристики синхронного генератора»

Неявнополісний генератор

При аналізі роботи синхронних генераторів і двигунів в основному використовують векторні діаграми: при якісному – спрощені діаграми, справедливі для машин, у яких відсутнє насичення; при кількісному – уточнені діаграми.

Для кола якоря неявнополісного синхронного генератора можна скласти рівняння

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a \quad (6.12)$$

або

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_a X_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - j\dot{I}_a R_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a \quad (6.13)$$

де $E_{\sigma a}$ – ЕРС, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання;

$X_{\sigma a}$ – індуктивний опір, обумовлений цим потоком.

Векторна діаграма неявнополісної машини (мал. 6.24, а), що називається *діаграмою Потьє*, дозволяє визначити ЕРС холостого ходу E_0 з урахуванням насичення, якщо задані напруга, струм навантаження (по величині і фазі), характеристика холостого ходу і параметри машини. При її побудові по відомих спадах напруги визначають вектор ЕРС

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}_a R_a + j\dot{I}_a X_{\sigma a} \quad (6.14)$$

Оскільки ЕРС E індукується результуючим потоком $\Phi_{рез}$, що створюється результуючої МРС $\dot{F}_{рез} = \dot{F}_B + k_d \dot{F}_a$, то по характеристиці холостого ходу (мал. 6.24, б) за значенням $F_{рез}$ можна визначити відповідну ЕРС E . Вектори $\dot{F}_{рез}$ і $\dot{\Phi}_{рез}$ співпадають по фазі й обоє ці вектора випереджають вектор E на 90° . Знаючи $F_{рез}$ і параметри машини, можна знайти МРС збудження $\dot{F}_B = \dot{F}_{рез} - k_d \dot{F}_a$, а потім по характеристиці холостого ходу визначити ЕРС холостого ходу E_0 . Вектор E_0 відстає від вектора F_B на 90° . Якщо потрібно перейти від режиму холостого ходу до режиму навантаження, побудови роблять у зворотному порядку.

Якщо машина не насичена, то векторна діаграма істотно спрощується, тому що в цьому випадку можна складати не МРС F_B і $k_d F_a$, а відповідні їм потоки і ЕРС. Спрощену векторну діаграму синхронної неявнополісної машини (мал. 6.25, а) будують по рівнянню (6.13).

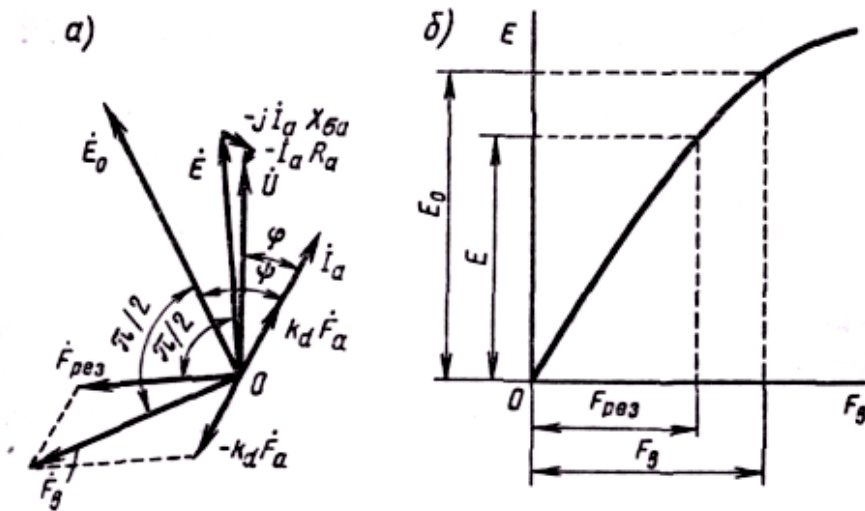


Рис. 6.24. Векторна діаграма синхронної неявнополюсної машини і характеристика холостого ходу

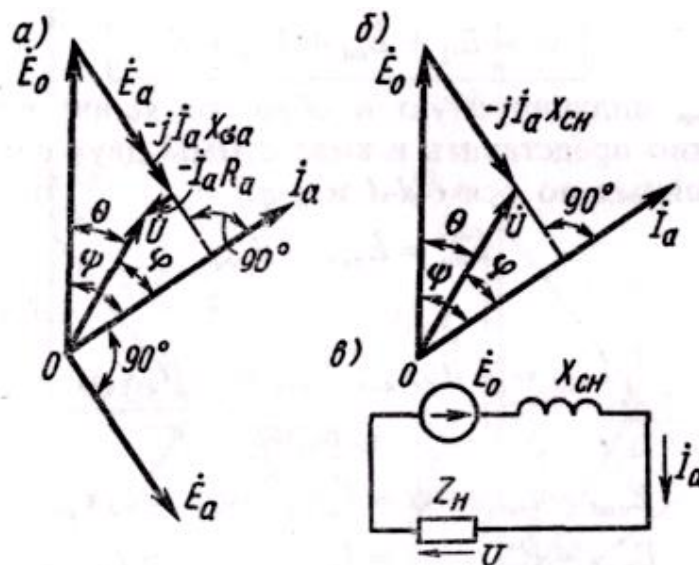


Рис. 6.25. Спрощені векторні діаграми і схема заміщення синхронної неявнополюсної машини

Оскільки спад напруги в активному опорі обмотки якоря $I_a R_a$ порівняно невеликий, ними можна знехтувати. Заміняючи, крім того, у рівнянні (6.13) $E_a = -jI_a X_a$, одержуємо

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a X_a - j\dot{I}_a X_{sa} = E_0 - j\dot{I}_a X_{сн} \quad (6.15)$$

Величину $X_{сн} = X_a + X_{sa}$ називають повним або синхронним індуктивним опором машини. Спрощена векторна діаграма і схема заміщення, що відповідають рівнянню (6.15), зображені на мал. 6.25, б, в; їх широко використовують при якісному аналізі роботи синхронної машини. Необхідно, однак, відзначити, що при визначенні E_0 по спрощеній діаграмі виходить трохи більше значення, ніж по точній діаграмі (див. мал. 6.24, а), у якій враховується насичення.

Кут θ між векторами U і E_0 називають *кутом навантаження*. При роботі синхронної машини в генераторному режимі напруга U завжди відстає від ЕРС E_0 , у цьому випадку кут θ вважається позитивним. Чим більше навантаження генератора (потужність, що віддається ним), тим більший кут θ .

Явнополісний генератор

Спрощену діаграму синхронної явнополісної машини можна також побудувати по загальному рівнянню (6.12), що з врахуванням (6.9) приймає вид

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a \quad (6.16)$$

На мал. 6.26, а приведено векторну діаграму, що відповідає рівнянню (6.16). Якщо знехтувати малою величиною R_a , то

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} \quad (6.17)$$

ЕРС $E_{\sigma a}$, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання, можна представити у виді суми двох складових, орієнтованих по осях $d-d$ і $q-q$:

$$\dot{E}_{\sigma a} = \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} \quad (6.18)$$

де

$$\dot{E}_{\sigma ad} = -j\dot{I}_d X_{\sigma a}; \quad \dot{E}_{\sigma aq} = -j\dot{I}_q X_{\sigma a} \quad (6.19)$$

або

$$\begin{aligned} E_{\sigma ad} &= E_{\sigma a} \sin \psi = I_a X_{\sigma a} \sin \psi = I_d X_{\sigma a}; \\ E_{\sigma aq} &= E_{\sigma a} \cos \psi = I_a X_{\sigma a} \cos \psi = I_q X_{\sigma a}. \end{aligned}$$

З врахуванням (6.18) замість (6.17) одержимо

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} = \dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q \quad (6.20)$$

де

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma ad}; \quad \dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma aq}$$

Векторна діаграма, побудована по (6.20), приведена на мал. 6.26,б. Замінімо ЕРС відповідними індуктивними спадами напруги:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_{ad} - j\dot{I}_q X_{aq} - j\dot{I}_d X_{\sigma a} - j\dot{I}_q X_{\sigma a}$$

або

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_d - jI_q X_q \quad (6.21)$$

де $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$; $X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$.

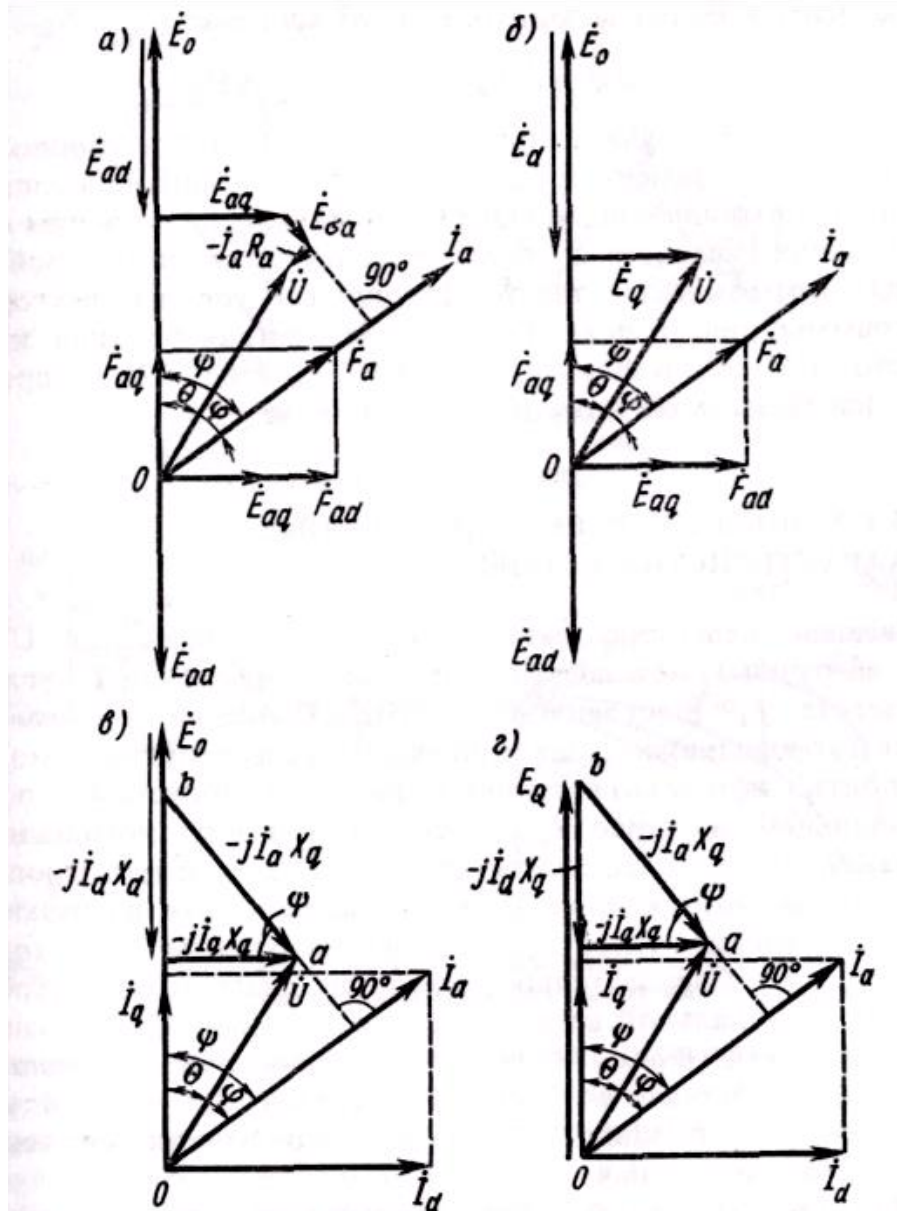


Рис. 6.26. Спрощені векторні діаграми синхронної явнополюсної машини

Опори X_d і X_q називають *повними або синхронними індуктивними опорами обмотки якоря по подовжній і поперечній осях*.

На мал. 6.26,в приведена векторна діаграма, побудована по (6.21). Якщо задані вектори струму I_a і напруги U , а кут ψ невідомий, то його можна визначити, провівши з кінця вектора напруги U відрізок ab , рівний $I_a X_q$ і перпендикулярний векторові струму I_a . При цьому точка b буде розташована на лінії, що відповідає напрямкові вектора E_0 , тому що проекція відрізка ab на вектор E_q дорівнює модулеві цього вектора:

$$\overline{ab} \cos \psi = I_a X_q \cos \psi = I_q X_q = E_q.$$

У деяких випадках при якісному аналізі явнополюсну машину заміняють еквівалентною неявнополюсною у якої синхронний індуктивний опір по обох осях дорівнює опоріві X_q розглянутої явнополюсної машини. Можливість такої заміни впливає з векторної діаграми (мал. 6.26, в). Така еквівалентна машина має замість ЕРС E_o еквівалентну ЕРС E_Q (мал. 6.26, з), причому кут навантаження θ залишається тим самим.

Лекція №4

Тема: «Робота синхронного генератора на автономне навантаження»

Синхронні генератори працюють в автономному режимі (рис. 4.4, б) в тих випадках, коли промислова електрична мережа має недостатню потужність або взагалі відсутня, наприклад, на віддалених будівельних майданчиках, нафтових і газових промислах, лісозаготівельних пунктах, морських і річкових суднах, літальних апаратах і т.п. Напруга на висновках автономно працюючого синхронного генератора U у великій мірі залежить від навантаження і її характеру

Залежність $U(I)$ при $n_0 = \text{const}$, $I_{\text{в}} = \text{const}$ і $\cos\varphi = \text{const}$ називається зовнішньою характеристикою генератора. Сімейство зовнішніх характеристик синхронного генератора при різних $\cos\varphi$ зображено на рис. 4.10. Характеристики показують, що напруга генератора при активно-індуктивному навантаженні досить різко падає, що пояснюється розмагнічуючою дією реакції якоря, а при активно-емнісний навантаженні змінюється незначно і навіть може збільшуватися, що пов'язано з намагнічує дією реакції якоря при цьому навантаженні. При експлуатації генератора стабілізацію напруги здійснюють регуляторами збудження, які при збільшенні струму навантаження I збільшують потік ротора Φ_0 , а отже, і ЕРС E_0 за рахунок збільшення струму I в збудження ротора.

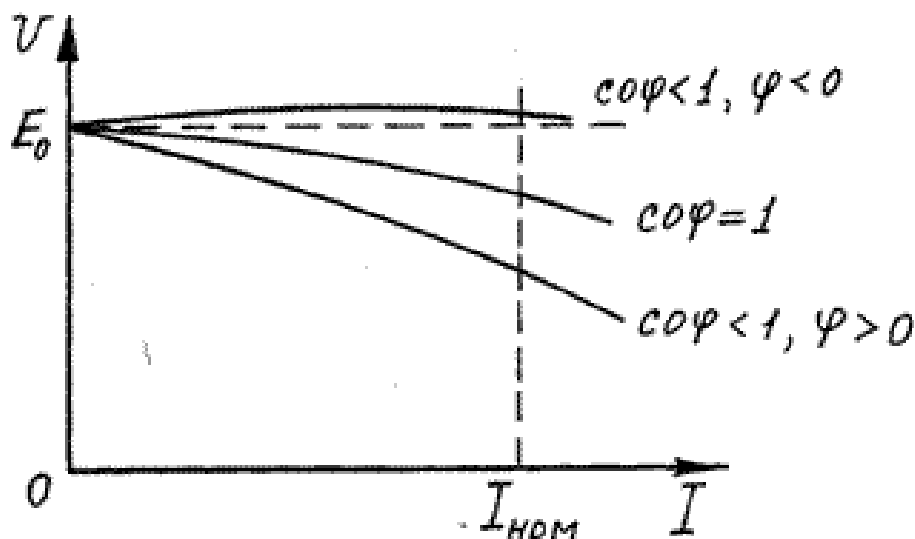


Рис. 4.10

Лекція №5

Тема: «Енергетична діаграма та кутова характеристика синхронного генератора»

Неявнополісний генератор

При аналізі роботи синхронних генераторів і двигунів в основному використовують векторні діаграми: при якісному – спрощені діаграми, справедливі для машин, у яких відсутнє насичення; при кількісному – уточнені діаграми.

Для кола якоря неявнополісного синхронного генератора можна скласти рівняння

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a, \quad (6.12)$$

або

$$\dot{U} = \dot{E} - j\dot{I}_a X_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_a - j\dot{I}_a R_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a, \quad (6.13)$$

де $E_{\sigma a}$ – ЕРС, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання;

$X_{\sigma a}$ – індуктивний опір, обумовлений цим потоком.

Векторна діаграма неявнополісної машини (мал. 6.24, а), що називається *діаграмою Потьє*, дозволяє визначити ЕРС холостого ходу E_0 з урахуванням насичення, якщо задані напруга, струм навантаження (по величині і фазі), характеристика холостого ходу і параметри машини. При її побудові по відомих спадах напруги визначають вектор ЕРС

$$\dot{E} = \dot{U} + \dot{I}_a R_a + j\dot{I}_a X_{\sigma a}. \quad (6.14)$$

Оскільки ЕРС E індукується результируючим потоком $\Phi_{\text{рез}}$, що створюється результируючої МРС $\dot{F}_{\text{рез}} = \dot{F}_B + k_d \dot{F}_{\sigma a}$ то по характеристиці холостого ходу (мал. 6.24, б) за значенням $F_{\text{рез}}$ можна визначити відповідну ЕРС E . Вектори $\dot{F}_{\text{рез}}$ і $\dot{\Phi}_{\text{рез}}$ співпадають по фазі й обоє ці вектора випереджають вектор E на 90° . Знаючи $F_{\text{рез}}$ і параметри машини, можна знайти МРС збудження $\dot{F}_B = \dot{F}_{\text{рез}} - k_d \dot{F}_{\sigma a}$, а потім по характеристиці холостого ходу визначити ЕРС холостого ходу E_0 . Вектор E_0 відстає від вектора F_B на 90° . Якщо потрібно перейти від режиму холостого ходу до режиму навантаження, побудови роблять у зворотному порядку.

Якщо машина не насичена, то векторна діаграма істотно спрощується, тому що в цьому випадку можна складати не МРС F_B і $k_d F_{\sigma a}$, а відповідні їм потоки і ЕРС. Спрощену векторну діаграму синхронної неявнополісної машини (мал. 6.25, а) будують по рівнянню (6.13).

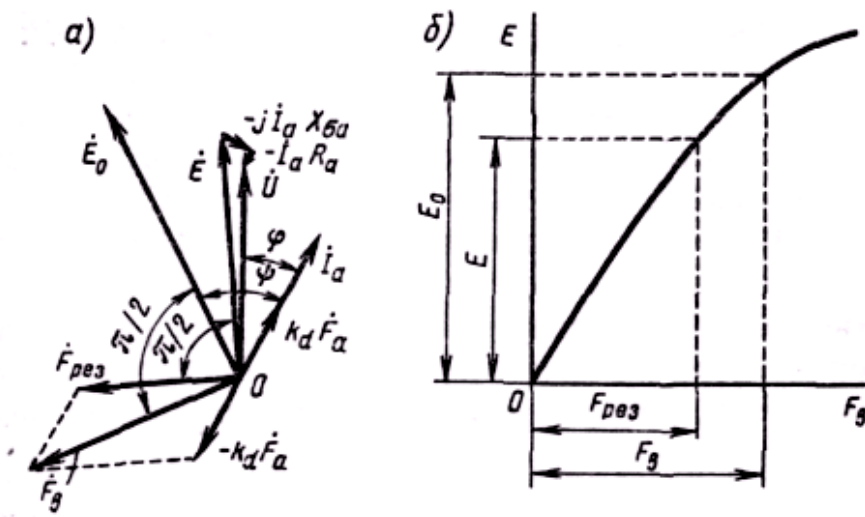


Рис. 6.24. Векторна діаграма синхронної неявнополюсної машини і характеристика холостого ходу

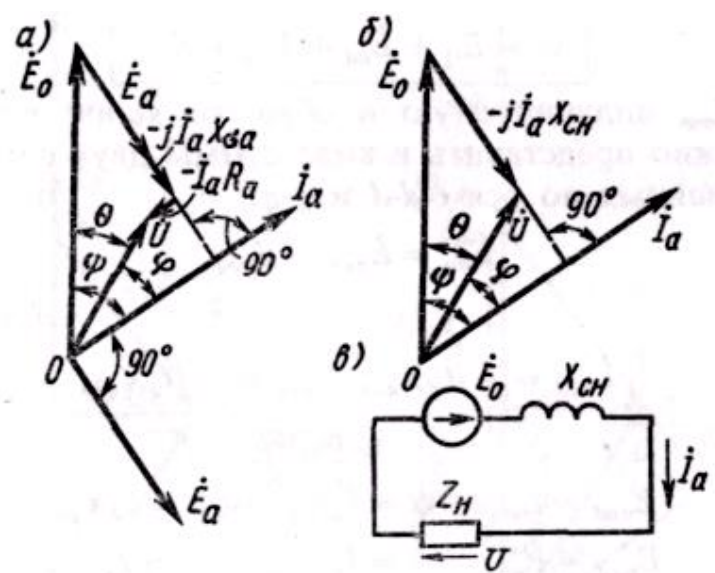


Рис. 6.25. Спрощені векторні діаграми і схема заміщення синхронної неявнополюсної машини

Оскільки спад напруги в активному опорі обмотки якоря $I_a R_a$ порівняно невеликий, ними можна знехтувати. Заміняючи, крім того, у рівнянні (6.13) $E_a = -jI_a X_a$, одержуємо

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a X_a - j\dot{I}_a X_{sa} = E_0 - j\dot{I}_a X_{сн} \tag{6.15}$$

Величину $X_{сн} = X_a + X_{sa}$ називають повним або синхронним індуктивним опором машини. Спрощена векторна діаграма і схема заміщення, що відповідають рівнянню (6.15), зображені на мал. 6.25, б, в; їх широко використовують при якісному аналізі роботи синхронної машини. Необхідно, однак, відзначити, що при визначенні E_0 по спрощеній діаграмі виходить трохи більше значення, ніж по точній діаграмі (див. мал. 6.24, а), у якій враховується насичення.

Кут θ між векторами U і E_0 називають *кутом навантаження*. При роботі синхронної машини в генераторному режимі напруга U завжди відстає від ЕРС E_0 , у цьому випадку кут θ вважається позитивним. Чим більше навантаження генератора (потужність, що віддається ним), тим більший кут θ .

44.2. Явнополюсний генератор

Спрощену діаграму синхронної явнополюсної машини можна також побудувати по загальному рівнянню (6.12), що з врахуванням (6.9) приймає вид

$$\dot{U} = \dot{E} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} - \dot{I}_a R_a \quad (6.16)$$

На мал. 6.26, а приведено векторну діаграму, що відповідає рівнянню (6.16). Якщо знехтувати малою величиною R_a , то

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma a} \quad (6.17)$$

ЕРС $E_{\sigma a}$, індукована в обмотці якоря потоком розсіювання, можна представити у виді суми двох складових, орієнтованих по осях $d-d$ і $q-q$:

$$\dot{E}_{\sigma a} = \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} \quad (6.18)$$

де

$$\dot{E}_{\sigma ad} = -j\dot{I}_d X_{\sigma a}; \quad \dot{E}_{\sigma aq} = -j\dot{I}_q X_{\sigma a} \quad (6.19)$$

або

$$\begin{aligned} E_{\sigma ad} &= E_{\sigma a} \sin \psi = I_a X_{\sigma a} \sin \psi = I_d X_{\sigma a}; \\ E_{\sigma aq} &= E_{\sigma a} \cos \psi = I_a X_{\sigma a} \cos \psi = I_q X_{\sigma a}. \end{aligned}$$

З врахуванням (6.18) замість (6.17) одержимо

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma ad} + \dot{E}_{\sigma aq} = \dot{E}_0 + \dot{E}_d + \dot{E}_q \quad (6.20)$$

де

$$\dot{E}_d = \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{\sigma ad}; \quad \dot{E}_q = \dot{E}_{aq} + \dot{E}_{\sigma aq}$$

Векторна діаграма, побудована по (6.20), приведена на мал. 6.26,б. Замінімо ЕРС відповідними індуктивними спадами напруги:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_{ad} - j\dot{I}_q X_{aq} - j\dot{I}_d X_{\sigma a} - j\dot{I}_q X_{\sigma a}$$

або

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - jI_d X_d - jI_q X_q \quad (6.21)$$

де $X_d = X_{ad} + X_{\sigma a}$; $X_q = X_{aq} + X_{\sigma a}$.

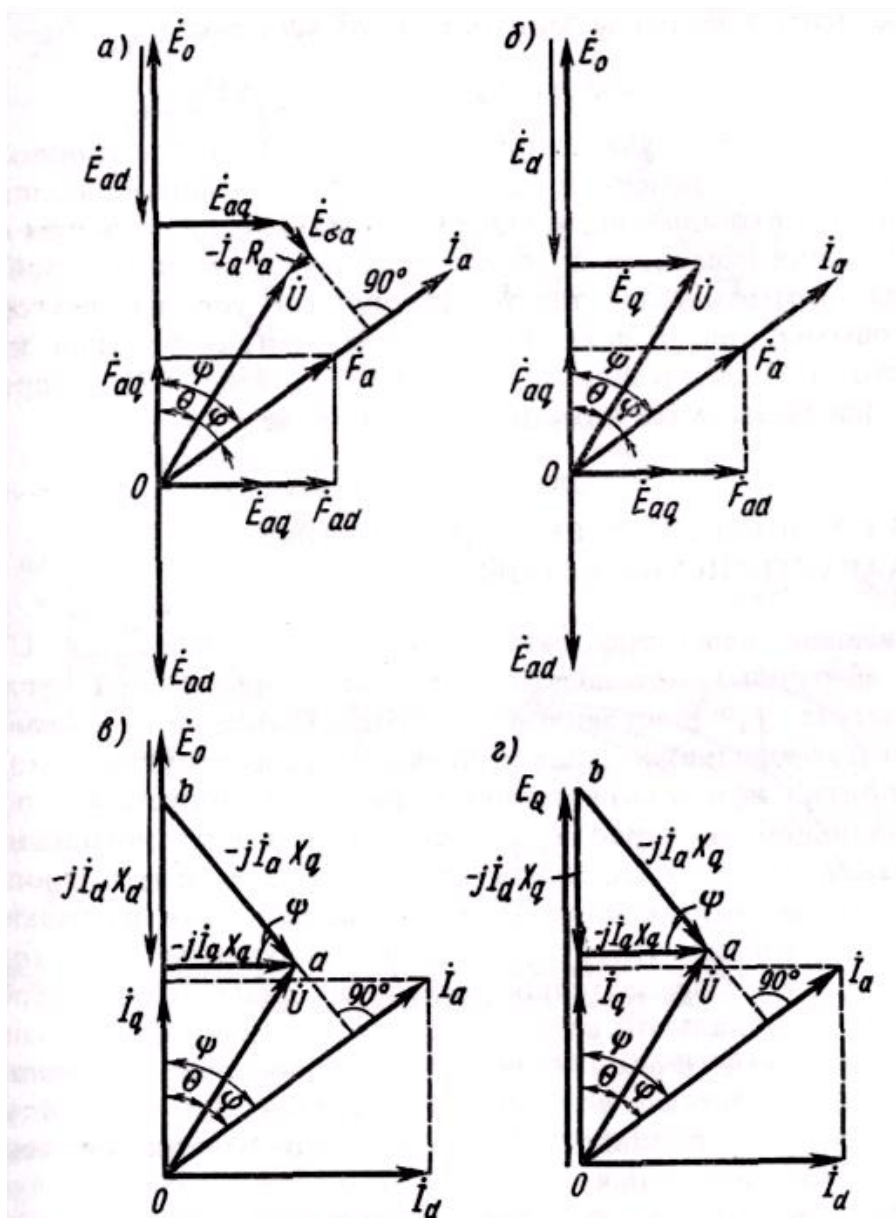


Рис. 6.26. Спрощені векторні діаграми синхронної явнополюсної машини

Опори X_d і X_q називають *повними або синхронними індуктивними опорами обмотки якоря по подовжній і поперечній осях*.

На мал. 6.26,в приведена векторна діаграма, побудована по (6.21). Якщо задані вектори струму I_a і напруги U , а кут ψ невідомий, то його можна визначити, провівши з кінця вектора напруги U відрізок ab , рівний $I_a X_q$ і перпендикулярний векторові струму I_a . При цьому точка b буде розташована на лінії, що відповідає напрямкові вектора E_0 , тому що проекція відрізка ab на вектор E_q дорівнює модулеві цього вектора:

$$\overline{ab} \cos \psi = I_a X_q \cos \psi = I_q X_q = E_q.$$

У деяких випадках при якісному аналізі явнополюсну машину заміняють еквівалентною неявнополюсною у якої синхронний індуктивний опір по обох осях дорівнює опоріві X_q розглянутої явнополюсної машини. Можливість такої заміни впливає з векторної діаграми (мал. 6.26, в). Така еквівалентна машина має замість ЕРС E_o еквівалентну ЕРС E_Q (мал. 6.26, з), причому кут навантаження θ залишається тим самим.

Лекція №6

Тема: «Синхронний двигун»

Синхронна машина, що працює паралельно з мережею, автоматично переходить у двигунний режим, якщо до вала ротора прикладений гальмівний момент. При цьому машина починає споживати з мережі активну потужність і виникає електромагнітний обертаючий момент. Частота обертання ротора залишається незмінною, жорстко зв'язаною з частотою мережі, по співвідношенню $n_2=n_1=60f_1/p$, що є найважливішою експлуатаційною властивістю синхронних двигунів.

Векторні діаграми

По основних комплексних рівняннях синхронної машини (6.15 і 6.21)

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a X_a - j\dot{I}_a X_{ca} = E_0 - j\dot{I}_a X_{ch} \quad (6.15)$$

$$\dot{U} = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q \quad (6.21)$$

можуть бути побудовані векторні діаграми. Однак для синхронного двигуна в приведені рівняння замість напруги машини U , треба підставити $-U_c$, тому що термін «напруга двигуна» звичайно не вживається; при цьому для неявнополюсної і явнополюсної машин маємо

$$\left. \begin{array}{l} -\dot{U}_c = \dot{E}_0 - j\dot{I}_a X_{ch}; \\ -\dot{U}_c = \dot{E}_0 - j\dot{I}_d X_d - j\dot{I}_q X_q. \end{array} \right\} \quad (6.45)$$

Побудова векторних діаграм (мал. 6.45, а і б) по формулах (6.45) рекомендується починати з зображення векторів U_c і $-U_c$. Потім будується вектор струму I_a , активна складова якого збігається з напрямком вектора U_c , і визначається вектор E_0 . При побудові діаграми для явнополюсної машини (мал. 6.45,б) потрібно також (за аналогією з побудовою діаграми для генератора, див. мал. 6.26,в) спочатку визначити напрямок вектора E_0 , добавивши до $-U_c$ додатковий вектор $j\dot{I}_a X_q$.

Щоб з'ясувати властивості синхронного двигуна, розглянемо його роботу при зміні навантажувального моменту $M_{вн}$ і постійному струмі збудження; при цьому для простоти будемо користуватися векторною діаграмою неявнополюсної машини.

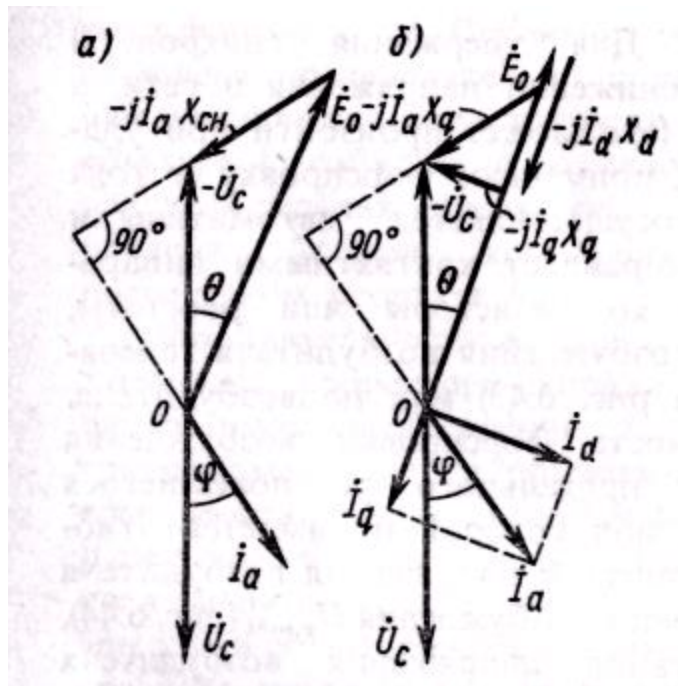


Рис. 6.45. Спрощені векторні діаграми синхронного неявнополюсного (а) і явнополюсного (б) двигуна

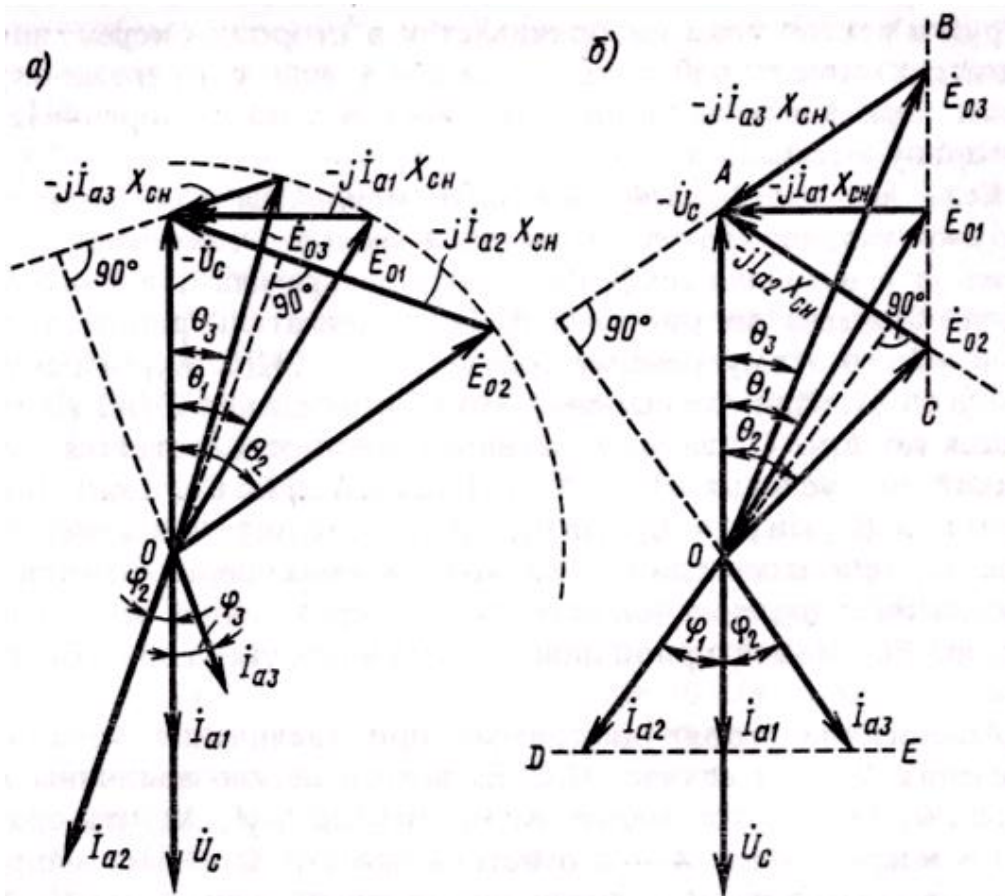


Рис. 6.46. Спрощені векторні діаграми синхронного двигуна при зміні навантажувального моменту на валові і струму збудження

Припустимо, що двигун працює при $\cos\varphi=1$, чому на векторній діаграмі (мал. 6.46, а) відповідають струм I_{a1} і кут Θ_1 . З підвищенням навантаження збільшується кут між векторами E_0 і $-U_c$ до якогось значення Θ_2 , тому що згідно (6.35) обертаючий момент $M=M_{\text{вн}}$ пропорційний $\sin\theta$. При цьому кінець вектора E_0 переміщається по окружності з радіусом, рівним E_0 , і при прийнятих умовах ($I_e=\text{const}$; $E_0=\text{const}$; $U_c=\text{const}$) вектор струму I_{a2} також повертається навколо точки O , розташовуючись перпендикулярно векторові $-jI_{a2}X_{\text{сн}}$. З діаграми видно, що в розглянутому випадку струм двигуна I_{a2} має відстаючу реактивну складову. Якщо навантаження двигуна зменшується в порівнянні з вихідним, то кут θ зменшується до значення Θ_3 . При цьому струм двигуна I_{a3} має випереджальну реактивну складову.

Отже, зміна активної потужності синхронного двигуна приводить до зміни його $\cos\varphi$: при зменшенні навантаження вектор струму повертається убік випередження і двигун може працювати з $\cos\varphi=1$ або з випереджальним струмом; при збільшенні навантаження вектор струму повертається убік відставання.

Якщо при незмінній активній потужності змінювати струм збудження, то буде змінюватися тільки реактивна потужність, тобто величина $\cos\varphi$. Векторна діаграма для цього випадку зображена на мал. 6.46, б. Якщо двигун працює при $\cos\varphi=1$, то цьому режимові відповідає ЕРС E_{01} і деякий кут θ_1 . При зменшенні струму збудження ЕРС E_0 знижується до E_{02} . Оскільки активна потужність залишається незмінною, з умови

$$P_{\text{эл}}=P_{\text{ем}}=(mUE_0/X_{\text{сн}})\sin\theta=\text{const}$$

одержуємо, що

$$E_{01}\sin\theta_1=E_{02}\sin\theta_2,$$

звідки випливає, що кінець вектора E_0 при зміні струму збудження переміщається по прямій BC , паралельно векторові U_c і минаючої через кінець вектора E_{01} . З векторної діаграми видно, що кут Θ_2 більше Θ_1 .

Аналогічно будують діаграму при збільшенні струму збудження. У цьому випадку ЕРС E_0 зростає до величини E_{03} і кут Θ_3 стає меншим θ_1 . Вектор $-jI_{a3}X_{\text{сн}}$ повертається навколо точки A і відповідно йому змінює напрям вектор струму I_{a3} , перпендикулярний векторові $-jI_{a3}X_{\text{сн}}$, при цьому з умови рівності активних потужностей

$$I_{a1}\cos\varphi_1=I_{a2}\cos\varphi_2=I_{a3}\cos\varphi_2$$

кінець вектора струму I_a переміщається по прямій DE , перпендикулярній векторові U_c .

По діаграмі, приведеній на мал. 6.46, б, можна побудувати U -подібні характеристики для двигуна $I_a=f(I_e)$, що будуть мати таку ж форму, як і характеристики для генератора (див. мал. 6.36), з тією лише відмінністю,

що для двигуна кут зсуву фаз φ прийнято відраховувати від вектора напруги мережі U_C .

При недозбудженні струм I_a відстає від напруги мережі U_C , тобто двигун споживає з мережі реактивну потужність, а при перезбудженні струм випереджає напругу мережі U_C , тобто двигун віддає в мережу реактивну потужність.

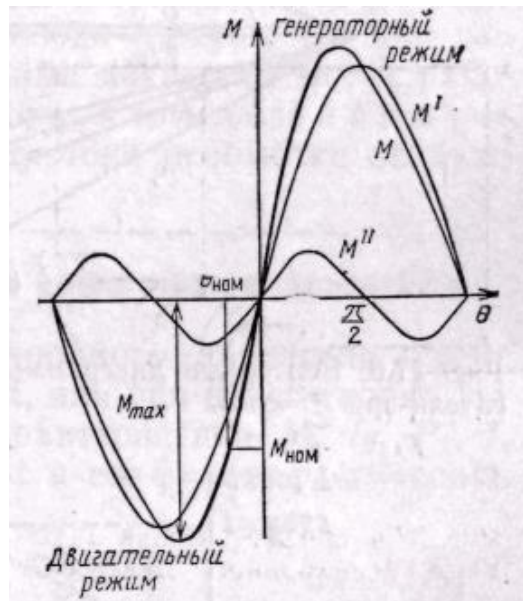


Рис. . Кутова характеристика електромагнітного моменту явноплюсного синхронного двигуна

Залежність $M=f(\theta)$, що представляє собою куту характеристика синхронного двигуна, є його механічною характеристикою.

.Робочі характеристики

Робочі характеристики синхронного двигуна можуть бути отримані або при $I_B=\text{const}$, або при $\cos\varphi=\text{const}$. На рис. 55.3 показані робочі характеристики $M, I_3, P_1, I, \eta=f(P_2)$ за умови $U=\text{const}$ і $\cos\varphi=\cos\varphi_{\text{ном}}=\text{const}$.

Залежність моменту на валу $M_2 \approx M$ від корисної потужності має лінійний характер, тому що швидкість $\omega_1=\text{const}$ ($M=P_2/\omega_1$). Як впливає з рис. 55.3, для підтримки $\cos\varphi=\text{const}$ зі збільшенням навантаження струм збудження I_3 варто збільшувати.

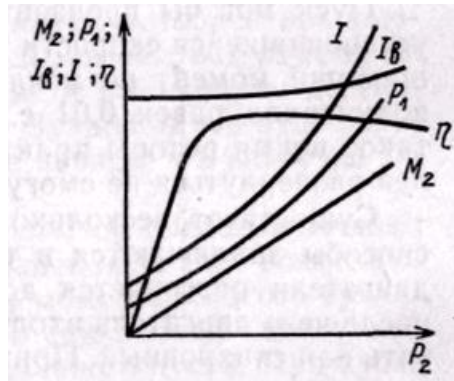


Рис. 55.3. Робочі характеристики синхронного двигуна при $\cos\varphi = \text{const}$

При холостому ході ($P_2=0$) двигун споживає з мережі активну потужність, необхідну для покриття втрат (механічних і магнітних) всередині машини. Тому холостому ході струм статора не буде дорівнює нулеві. Із зростанням P_2 буде збільшуватися P_1 , а отже, і струм ($P_1=P_2+\Sigma P$, де ΣP містить у собі як втрати холостого ходу – постійні втрати, так і електричні втрати обмотці якоря).

Залежність ККД від P_2 не відрізняється від інших машин.

Переваги і недоліки синхронного двигуна в порівнянні з асинхронним

Синхронні двигуни мають наступні переваги:

а) можливість роботи при $\cos\varphi=1$; це приводить до поліпшення $\cos\varphi$ мережі, а також до скорочення розмірів двигуна, тому що його струм менший струму асинхронного двигуна тієї ж потужності. При роботі з випереджальним струмом синхронні двигуни служать генераторами реактивної потужності, що надходить в асинхронні двигуни, що знижує споживання цієї потужності від генераторів електростанцій;

б) меншу чутливість до коливань напруги, тому що їхній максимальний момент пропорційний напрузі в першому ступені (а не квадратові напруги);

в) строга сталість частоти обертання незалежно від механічного навантаження на валові.

Недоліками синхронних двигунів є:

а) складність конструкції;

б) порівняльна складність пуску в хід;

в) труднощі з регулюванням частоти обертання, що можливо тільки шляхом зміни частоти напруги живлення,

Зазначені недоліки синхронних двигунів роблять їх менш вигідними, ніж асинхронні двигуни, при обмежених потужностях до 100 кВт. Однак при більш високих потужностях, коли особливо важливо мати високий $\cos\varphi$ і зменшені габаритні розміри машини, синхронні двигуни переважніше асинхронних.

Лекція №7

Тема: «Характеристики синхронного двигуна, синхронні компенсатори»

Синхронний компенсатор

Синхронний компенсатор являє собою синхронний двигун, що працює без навантаження на валу; при цьому по обмотці якоря проходить практично тільки реактивний струм. Синхронний компенсатор може працювати в режимі покращення $\cos\varphi$ або в режимі стабілізації напруги.

Звичайно електрична мережа, що живить електроенергією промислові підприємства, навантажена струмом I_H , що відстає по фазі від напруги мережі U_C (мал. 6.55, а). Це пояснюється тим, що від мережі одержують живлення асинхронні двигуни, у яких реактивна складова струму досить велика. Для поліпшення $\cos\varphi$ мережі синхронний компенсатор повинний працювати в режимі перезбудження. При цьому струм збудження регулюється так, щоб струм якоря I_a синхронного компенсатора випереджав на 90° напругу мережі U_C (мал. 6.55, а) і був приблизно рівним реактивній складові I_{HP} струму навантаження I_H . У результаті мережа завантажується тільки активним струмом навантаження $I_C = I_{на}$.

При роботі в режимі стабілізації напруги струм збудження синхронного компенсатора встановлюється постійним, причому такого значення, щоб ЕРС компенсатора E_0 дорівнювала номінальній напрузі мережі $U_{с.ном}$ (мал. 6.55, б). У мережі при цьому є деякий струм I_H , що створює спад напруги $\Delta U \approx I_H R_c \cos\varphi + I_H X_c \sin\varphi$, де R_c і X_c – активний і індуктивний опір мережі; φ – кут зсуву фаз між векторами напруги і струму мережі.

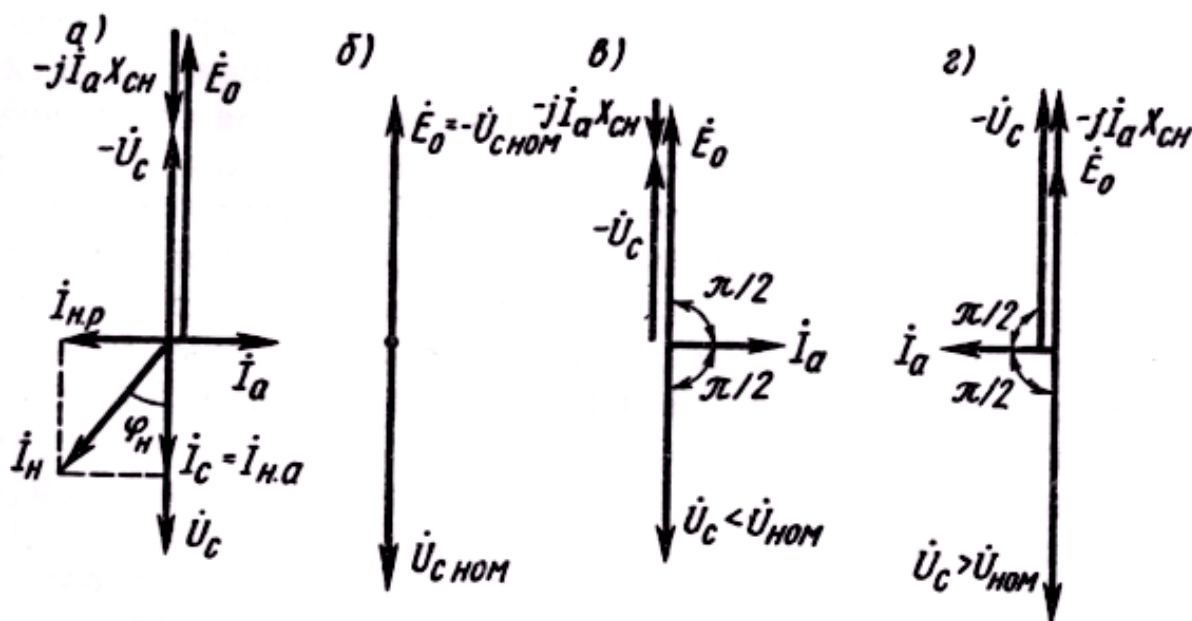


Рис. 6.55. Векторні діаграми синхронного компенсатора: а – у режимі покращення $\cos\varphi$ мережі; б, в, г – у режимі стабілізації напруги

Якщо напруга мережі в точці підключення синхронного компенсатора трохи знижується через зростання струму навантаження I_n і стає меншим $U_{с.ном}$, то синхронний компенсатор починає забирати з мережі реактивний випереджальний струм I_a (мал. 6.55, в). Це зменшує спад напруги в ній на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При підвищенні напруги в мережі, коли $U_c > U_{с.ном}$, синхронний компенсатор завантажує мережу реактивним відстаючим струмом I_a (мал. 6.55, г), що приводить до збільшення спаду напруги на величину $\Delta U_k = I_a X_c$. При достатній потужності синхронного компенсатора коливання напруги в мережі не перевищують 0,5–1,0%. Недоліком зазначеного методу стабілізації напруги є те, що синхронний компенсатор завантажує лінію реактивним струмом, збільшуючи втрати в ній.

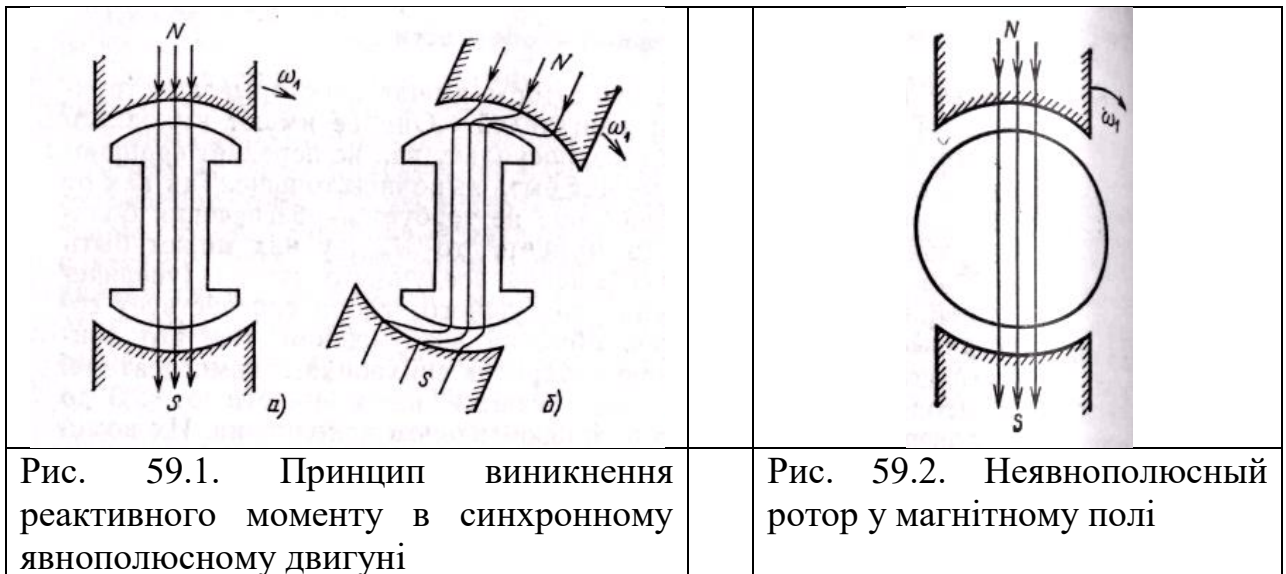
Лекція №8

Тема: «Синхронні машини спеціального призначення»

Реактивні двигуни

Реактивний синхронний двигун має явнополюсну конструкцію. Його відмінність від звичайного двигуна полягає у відсутності обмотки збудження на полюсах ротора. Магнітний потік у такій машині створюється обмоткою якоря. Обертаючий момент утвориться внаслідок того, що в явнополюсному роторі магнітний потік, замикаючись по шляху з найменшим магнітним опором, проходить вздовж полюсів (рис. 59.1,а). Тому, якщо попередньо розігнати ротор до швидкості, близької до синхронної, обертовий магнітний потік якоря внаслідок тяжіння індукційних ліній буде захоплювати за собою ротор (рис. 59.1, б) і він буде обертатися з ним синхронно.

В машин з неявнополюсним ротором (рис. 59.2) умови проходження потоку в будь-яких напрямках будуть однаковими, і в них при відсутності збудження обертовий момент створюватися не буде. Таким чином, поява обертового моменту в реактивному двигуні обумовлено неоднаковими магнітними провідностями по поздовжній і поперечній осям. Цим провідностям пропорційні індуктивні опори x_d і x_q .



Обертаючий момент у реактивному двигуні буде залежати від співвідношення між x_d і x_q :

$$M = \frac{mU^2}{2\omega_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2\theta.$$

Максимальний обертаючий момент розвивається при $\theta=45^\circ$. Чим більше буде розходження між x_d і x_q , тим більший максимальний момент буде розвивати двигун.

У двигунах звичайної конструкції, де відношення $x_d/x_q \approx 1,5$, максимальне значення реактивного моменту не перевищує 0,25 номінального. У реактивних двигунах для збільшення моменту відношення x_d/x_q збільшують, але, незважаючи на це, реактивні двигуни розвивають у 2—3 рази меншу потужність, чим однакові з ними по габаритах асинхронні двигуни. Крім того, реактивні двигуни мають низькі енергетичні показники. Малий $\cos\varphi$ пояснюється тим, що для створення робочого потоку ці двигуни споживають з мережі намагнічуючий струм. Зниження ККД викликане великими електричними втратами в обмотці якоря.

В цих реактивних двигунах застосовується асинхронний пуск. Ротори реактивних двигунів досить різні. На рис. 59.3 показані найбільш розповсюджені конструкції.

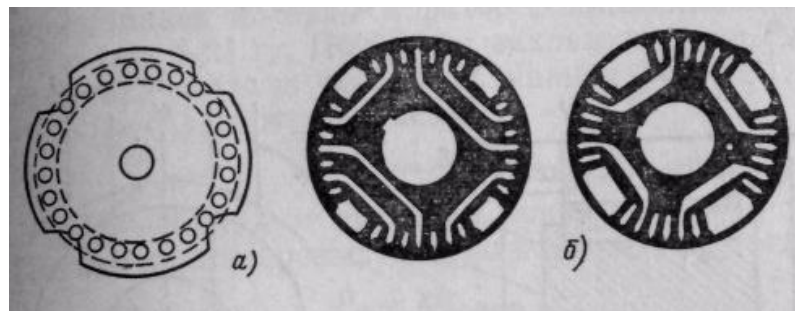


Рис 59.3. Ротор реактивного двигуна

Ротор на рис. 59.3, а відрізняється від звичайного короткозамкнутого ротора асинхронного двигуна лише наявністю западин. Біляча клітка, розміщена на ньому, служить для асинхронного пуску.

Кращими робочими і пусковими характеристиками володіють реактивні двигуни, ротори яких збираються з аркушів електротехнічної сталі з показаної на рис. 59.3,б конфігурацією. За рахунок внутрішніх вирізів розходження в магнітних провідностях, а отже, і в синхронних індуктивних опорах по подовжньої x_d і поперечної x_q осях велике. У зібраного пакета прорізи і пази заливаються сплавами алюмінію, що скріплює його й утворює пускову обмотку. Після заливання зовнішні феромагнітні перемички між пазами і полюсами (рис. 59.3,б) віддаляються при токарській обробці ротора. Реактивні двигуни застосовуються в апаратах звукозапису і звуковоспроизведения, схемах синхронного зв'язку і т. д. Перевагами цих двигунів є простота конструкції, невисока вартість і відсутність необхідності для їхнього живлення джерела постійного струму.

Гістерезисні двигуни

Статор 1 гістерезисного двигуна має таку ж конструкцію, як у синхронних і асинхронних машин. У його пазах розміщується трифазна або двофазна обмотка 2, яка при включенні в мережу створює обертове магнітне поле (рис. 59.4). Ротор двигуна складається з двох частин; насадженої на вал 6 магнітної або немагнітної втулки 5 і розташованого на ній суцільного або

шихтованого сталевго циліндра 3, виконаного з магнітно-твердого матеріалу, що має широку петлю гістерезису. Для фіксації циліндра 3 служить кільце 4.

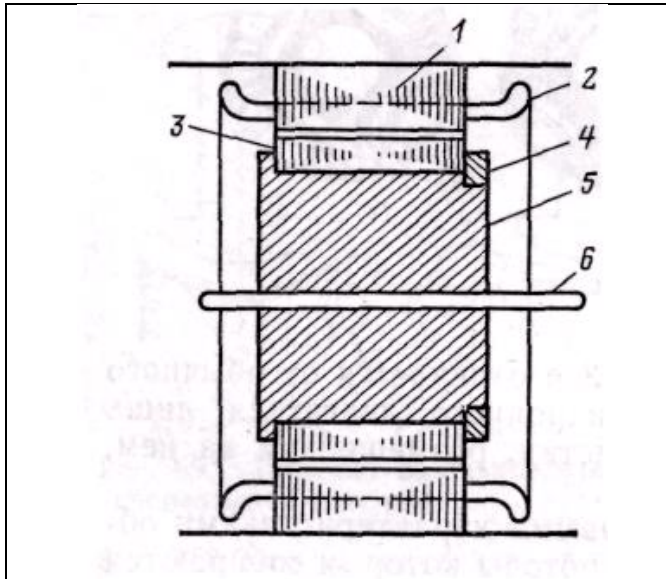


Рис. 59.4. Гістерезисний двигун:
1 – статор; 2 – обмотка статора; 3 – кільце з магнітно-твердого матеріалу; 4 – запірне кільце; 5 – втулка ротора; 6 – вал

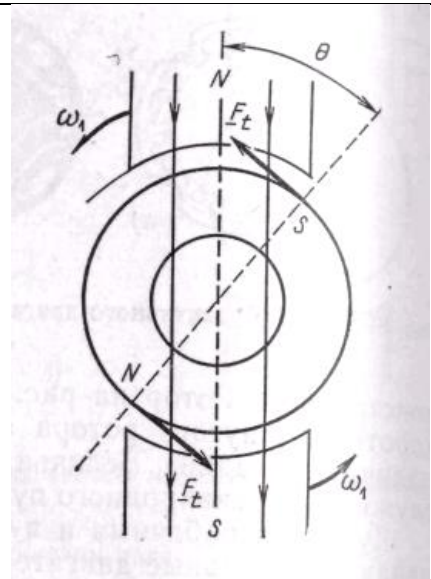


Рис. 59.5. Принцип утворення гістерезисного моменту

Гістерезисний двигун може працювати як у синхронному, так і асинхронному режимах. В асинхронному режимі обертаючий момент утвориться в результаті перемагнічування ротора і складається з двох складових: моменту від вихрових струмів M_e і гістерезисного моменту M_G :

$$M = M_B + M_G.$$

Перша складова моменту виникає, коли ротор обертається з ковзанням відносно поля й у ньому індукується вихрові струми. Від взаємодії цих струмів з магнітним полем утвориться момент. Друга складова виникає внаслідок перемагнічування гістерезисного шару ротора в обертовому полі статора. Внаслідок магнітного (гістерезисного) запізнювання вісь наведених полюсів ротора буде відставати від осі полюсів статора на кут Θ (рис. 59.5). У результаті цього виникне взаємодія між цими полями і з'явиться тангенціальна F_t , що створює гістерезисний момент M_G .

Електромагнітний момент M в асинхронному режимі пропорційний втратам у роторі, поділеним на ковзання s . Утрати від вихрових струмів P_B залежать від квадрата частоти перемагнічування ротора f_2 . Враховуючи, що $f_2 = f_1 s$, можна записати

$$P_B = s^2 P_{B, \text{НОМ}},$$

де $P_{в,ном}$ – втрати від вихрових струмів при $s=1$.
 Втрати на гістерезис пропорційні f_2 , тоді

$$P_{\Gamma} = sP_{\Gamma,ном},$$

де $P_{\Gamma,ном}$ – втрати на гістерезис при $s = 1$, тоді

$$M = M_{в} + M_{\Gamma} = \frac{P_{в}}{\omega_1 s} + \frac{P_{\Gamma} s}{\omega_1 s} = \frac{P_{в,ном} s}{\omega_1} + \frac{P_{\Gamma,ном}}{\omega_1}. \quad (59.1)$$

Як впливає з (59.1), момент від вихрових струмів пропорційний ковзанню і при синхронній швидкості ($s=0$) дорівнює нулеві. Момент від гістерезису постійний і від ковзання не залежить. Для збільшення моменту матеріал для ротора бажано вибирати з підвищеними втратами.

На рис. 59.6 показана механічна характеристика двигуна.

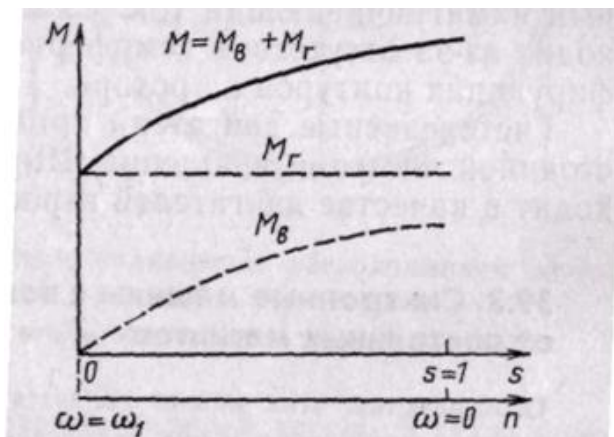


Рис. 59.6. Механічна характеристика гістерезисного двигуна в асинхронному режимі

Асинхронний режим у гістерезисних двигунах використовується головним чином при пуску. У цьому випадку, як впливає з рис. 59.6, виходить великий пусковий момент, що є головною перевагою цього типу двигунів.

Нормальна робота в асинхронному режимі неекономічна через значні втрати в роторі. Після закінчення асинхронного пуску ротор двигуна втягується в синхронізм і машина працює як синхронний двигун. Обертовий момент у цьому випадку створюється в результаті взаємодії поля статора з намагніченим у процесі пуску ротором, як і в синхронному двигуні із збудженням від постійних магнітів. У цьому режимі ротор двигуна перемагнічується, гістерезисні втрати в ньому відсутні.

Чим ширша петля гістерезису матеріалу, з якого виготовлений ротор, тим більше залишкова індукція і тим більший обертаючий момент буде розвивати двигун.

Гістерезисні двигуни випускаються на потужності від часток вата до 1-2 кВт. Вони надійні в експлуатації прості по конструкції, малошумні, мають великий пусковий момент і малий пусковий струм. Їх ККД доходить до 60 %. До недоліків гістерезисних двигунів варто віднести низький $\cos\phi$, схильність до качання ротора при різко змінюються навантаженнях, високу вартість через необхідність застосування для роторів дорогих магніто-твердих матеріалів і складність їхньої механічної обробки.

Низький $\cos\phi$ у синхронному режимі обумовлений слабкою намагніченістю ротора внаслідок порівняно малої МРС статора. Тому для створення потрібного потоку двигун споживає з мережі відносно великий реактивний намагнічувальний струм. Схильність до качання відбувається через відсутність демпферної обмотки й інших контурів, що демпфірують, на роторі.

Гістерезисні двигуни застосовуються в приводах з постійною частотою обертання. Широке застосування вони знаходять як двигуни гіроскопів.

Крокові двигуни

Крокові двигуни служать для перетворення електричних імпульсів напруги в дискретні кутові або лінійні переміщення – кроки. Вони широко застосовуються в системах програмного керування електроприводами.

Ротори крокових двигунів мають явнополюсне виконання. Вони підрозділяються на активні (що мають обмотку збудження або постійні магніти) і пасивні (реактивні). При активному роторі можна одержати відносно великі моменти, а при роторі з постійними магнітами можна забезпечити його фіксацію при знеструмлених обмотках.

На статорі крокового двигуна розташовуються одна або кілька обмоток – обмоток керування. Ці обмотки можуть бути зосередженими або розподіленими. Вони по черзі у визначеній послідовності одержують сигнал від електронного комутатора.

Існує велика розмаїтість крокових двигунів. Принцип їхньої роботи розглянемо на прикладі реактивного крокового двигуна з зосередженою обмоткою на статорі (рис. 59.7).

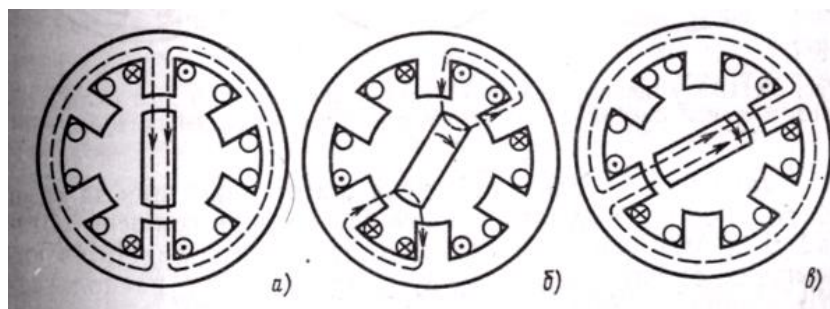


Рис. 39.10. Реактивний кроковий двигун із зосередженою обмоткою на статорі і двополюсним ротором

На статорі цього двигуна розташовуються три обмотки, кожна з яких складається з двох котушок, розміщених на діаметрально протилежних виступах (полюсах). Ротор має тільки два полюси, виконаних з магнітм'якого матеріалу. При подачі сигналу від електронного комутатора на першу обмотку ротор займе положення, що збігається з віссю цієї обмотки (рис. 59.7, а). Якщо потім, не відключаючи першу обмотку, підключити ще другу обмотку, так щоб сусідні виступи статора мали протилежну полярність, то ротор повернеться на 30° і займе положення, показане на рис. 59.7,б. Після цього відключається перша обмотка і ротор повертається ще на 30° , займаючи положення, що збігається з віссю другої обмотки (рис. 59.7, в). Далі підключається третя обмотка, і ротор повернеться ще на 30° і т.д. У такого двигуна за один оборот ротор може зробити 12 кроків.

Якщо ротор двигуна виконати чотирьохполюсним, то при розглянутій вище черговості включення обмоток кроки будуть рівні 15° (рис. 59.8), і за один оборот їх буде зроблено 24.

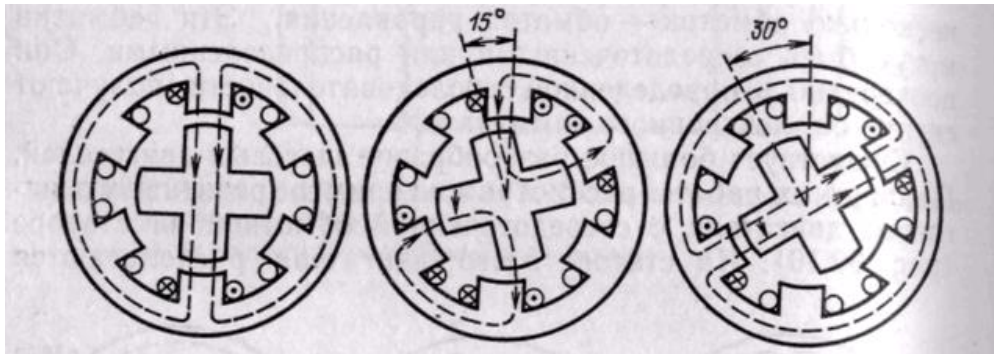


Рис. 89.8. До принципу дії реактивного крокового двигуна з зосередженою обмоткою на статорі і чотирьохполюсним ротором

Подальше збільшення числа кроків двигуна за один оборот можна одержати збільшенням числа полюсів ротора. Для цієї ж мети іноді статори виконують з декількох зміщених у просторі пакетів, розташовуваних в одному корпусі. Ротори для всіх пакетів розміщуються на одному валові і просторового зсуву не мають.

Робочі властивості крокових двигунів характеризуються наступними величинами:

- 1) кроком, що відпрацьовується;
 - 2) граничною частотою імпульсів, при якій до початку наступного кроку перехідний процес від попереднього кроку встигає закінчитися;
 - 3) частотою приємності, тобто максимальною частотою імпульсів, при якій можливий пуск без випадання ротора із синхронізму (без втрати кроків);
 - 4) частотою власних коливань;
 - 5) електромагнітною постійною часу обмоток статора;
- Основними характеристиками крокового двигуна є:

1) кутова характеристика, тобто залежність електромагнітного моменту від кута неузгодженості ротора (від стійкої рівноваги його при холостому ході);

2) гранична механічна характеристика, що являє собою залежність частоти подачі керуючих імпульсів від максимального моменту на валові ротора, при якому відбувається випадання двигуна із синхронізму;

3) гранична динамічна характеристика приємистості, що показує залежність частоти приємистості моменту на валові при перехідних процесах (пуск, гальмування, реверс).

Зміст

1. <u>Лекція №1</u>	
Будова і принцип дії машин постійного струму.....	2
2. <u>Лекція №2</u>	
Магнітне поле машини постійного струму.....	7
3. <u>Лекція №3</u>	
Генератори постійного струму	10
4. <u>Лекція №4</u>	
Втрати і коефіцієнт корисної дії генераторів постійного струму.....	15
5. <u>Лекція №5</u>	
Двигуни постійного струму.	20
6. <u>Лекція №6</u>	
Регулювання кутової швидкості та гальмування ДПС	23
7. <u>Лекція №7</u>	
Тема: Паралельна робота двигунів постійного струму на спільний вал....	39
8. <u>Лекція №8</u>	
Вентильні та універсальні колекторні двигуни.....	43

Лекція №1

Тема: «Будова і принцип дії машин постійного струму»

Будова МПС

МПС конструктивно складається із нерухомого *статора* (індуктора) з полюсами і *ротора* (якоря) з *колектором*, який жорстко закріплюється на валу з якорем і електрично зв'язаний з його обмоткою. Статор є джерелом магнітного поля, якір – частина машини, в якій індукується ЕРС.

До мідних пластин колектора дотикаються нерухомі вугільно-графітові *щітки*, розміщені в щіткотримачах на траверсі і електрично з'єднані із зовнішнім колом. Для запобігання іскріння щітки ретельно притираються до колектора, а їх помірний натиск повинен бути відрегульованим.

Будова статора

Статор (індуктор) МПС складається з циліндричної станини (корпусу), полюсів з обмоткою збудження і підшипникових щитів.

Станина (корпус): виливається або виконується зварною з сталі з великою магнітною проникністю, так як грає роль основи і магнітопроводу. На внутрішній стороні станини розміщені симетрично полюси. В машинах малої і середньої потужності до станини кріпляться підшипникові щити з підшипниками. В потужних машинах підшипники інколи виносяться на окремі стояки.

Основні полюси з струмом в котушках обмотки створюють в машині магнітне поле. Кожен полюс є електромагнітом, складається з сталюго сердечника з полюсним наконечником (башмаком) і котушкової обмотки з ізолюваного мідного проводу. Обмотка основних полюсів є *обмоткою збудження* машини. Сердечник полюса для зменшення втрат на вихрові струми набирається у вигляді пакету з листової електротехнічної сталі товщиною 0,5-2 мм і стягується шпильками. Полюси кріпляться до станини болтами або шпильками.

Додаткові полюси мають аналогічну будову, але їх сердечники частіше виготовляються з литої сталі і мають малу магнітну індукцію. Вони розміщуються симетрично між основними полюсами, містять обмотку з товстого ізолюваного проводу (включається послідовно з якорем) і призначені для зменшення іскріння щіток.

Будова якоря

Якір (ротор) МПС складається із сталюго валу, сталюго сердечника, обмотки і колектора.

Сердечник якоря являє собою циліндричний барабан, в повздовжніх зовнішніх пазах якого розміщена обмотка якоря. Для зменшення втрат на вихрові струми сердечник набирається з ізолюваних штампованих листів

електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 мм. Для кращого охолодження в сердечнику якоря є осьові вентиляційні канали, а в машинах великої потужності – і радіальні між пакетами сердечника. В машинах малої і середньої потужності застосовується *самовентиляція* – повітря проганяється вентилятором, який насаджується на вал якоря, а в машинах великої потужності використовується *незалежне охолодження* – від вентилятора з власним приводом.

Повітряний зазор між полюсами якорем в малих машинах менше 1 мм, а у великих – до 1 см.

Колектор виконується у вигляді циліндра, набраного з клиноподібних мідних пластин (ломелей), які ізолюються одна від другої міканітом або слюдою. Вузькі краї колекторних пластин мають форму ластівкового хвоста; після збірки колектора їх зажимають між корпусом і наживним фланцем й ізолюють манжетами з міканіту. Секції обмотки якоря впаюють в прорізи, які є у виступаючих частинах колекторних пластин.

Щітковий апарат

По циліндричній частині колектора ковзають щітки, встановлені в щіткотримачах. Щітки являють собою прямокутні бруски, виготовлені шляхом пресування і термічної обробки з порошків графіту, коксу й інших компонентів. Вони призначені для з'єднання колектора з зовнішнім колом і притискаються до поверхні колектора пружинами.

При обертанні якоря щітки зберігають незмінне положення щодо полюсів машини. Щіткотримачі зміцнюються на щіткових пальцях і ізолюють від них. Щіткові пальці, у свою чергу, кріплять або до підшипникового щита, або до траверси, що дозволяє при необхідності повертати всю систему щіток відносно полюсів машини. У машинах малої потужності часто застосовують трубчасті щіткотримачі, встановлювані безпосередньо в підшипниковому щиті.

У залежності від складу, способу виготовлення і фізичних властивостей усі щітки поділяють на шість основних груп: вугільно-графітні, графітні, електрографітовані, мідно-графітні, бронзо-графітні і срібно-графітні. Для кожної машини варто застосовувати щітки тільки встановленої марки, що вибирається заводом-виготовлювачем, виходячи з умов роботи машини.

Принцип дії МПС

Принцип дії МПС будується на законі електромагнітної індукції і законі Ампера.

Магнітне поле (МП) машини створюється постійним струмом (струмом збудження) в обмотці полюсів або постійними магнітами в машинах малої потужності. Його силові лінії замикаються через сталеві станину, сердечники полюсів і сердечники якоря, двічі перетинаючи повітряний зазор між ними.

Площина, яка проходить через вісь машини під кутом α , при якому вона перпендикулярна до силових ліній, називається *геометричною нейтраллю*.

В режимі генератора машина перетворює механічну енергію в електричну: до обмотки збудження статора підводиться постійний струм збудження, а якір обертається деяким первинним двигуном. При цьому проводи якоря пересікають магнітні силові лінії полюсів і в них індукується ЕРС. З допомогою колектора і щіток, які є механічним випрямлячем, ці змінні пульсуючі ЕРС сумуються в постійну по значенню і напрямку ЕРС машини E . Якщо до щіток під'єднати приймач, то в ньому встановиться постійний струм I .

В режимі двигуна машина перетворює електричну енергію в механічну: до якоря і обмотки збудження машини одночасно підводиться постійний струм від джерела. Взаємодія магнітного поля полюсів статора з струмом обмотки якоря створює обертовий електромагнітний момент, який і приводить в рух якір (ротор).

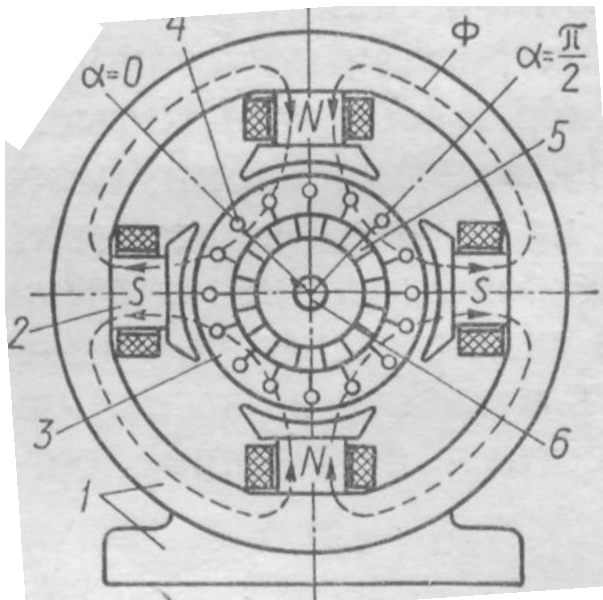


Рис. 1-3. Правила правої (а) і лівої (б) руки

ЕРС, яка індукується в провіднику обмотки якоря:

$$e_{i\delta} = Bl\vartheta, \quad (62.1)$$

де B – магнітна індукція в повітряному зазорі між полюсом і якорем в місці розміщення провідника;

l – активна довжина провідника (на протязі якої він розміщений в магнітному полі);

ϑ – лінійна швидкість руху провідника.

ЕРС E_a – змінна, оскільки провідники обмотки якоря проходять позмінно під північним і південним полюсами, внаслідок чого напрямок ЕРС в провідниках змінюється.

Частота ЕРС:

$$f = pn, \quad (62.2)$$

де p – кількість пар полюсів;
 n – швидкість обертання якоря (об/хв).

Напряга постійного струму на затискачах якоря генератора:

$$U_a = E_a - I_a R_a, \quad (62.3)$$

на затискачах двигуна:

$$U_a = E_a + I_a R_a. \quad (62.4)$$

В генераторі $U_a < E_a$, а в двигуна $U_a > E_a$.

Провідники обмотки якоря знаходяться в магнітному полі, тому на них буде діяти електромагнітні сили:

$$F_{np} = Bli_a, \quad (62.5)$$

$$i_a = \frac{I_a}{2}.$$

напрямок яких визначається правилом лівої руки. Ці сили створюють механічний момент, який називається електромагнітним моментом:

$$M_{em} = F_{np} \frac{D_a}{2}, \quad (62.6)$$

де D_a – діаметр якоря.

Перетворення енергії

Електромагнітний момент в генераторі при усталеному режимі роботи:

$$M_{em} = M_e - M_{mp} - M_c, \quad (62.7)$$

де M_e – момент на валу генератора, який розвивається первинним генератором;

M_{mp} – момент сил тертя в підшипниках, з повітрям і на колекторі;

M_c – гальмівний момент, викликаний втратами на гістерезис і на вихрові струми в сердечнику якоря.

Електромагнітний момент для двигуна при усталеному режимі роботи:

$$M_{em} = M_{\epsilon} + M_{mp} + M_c, \quad (62.8)$$

де M_{ϵ} – момент на валу двигуна, який розвивається робочою машиною (станок, насос...)

Потужність, яка розвивається електромагнітним моментом, називається електромагнітною потужністю:

$$P_{em} = M_{em}\omega, \quad (62.9)$$

де кутова швидкість обертання

$$\omega = \frac{2\pi \cdot n}{60} . \quad (62.10)$$

Лекція №2

Тема: «Магнітне поле машини постійного струму»

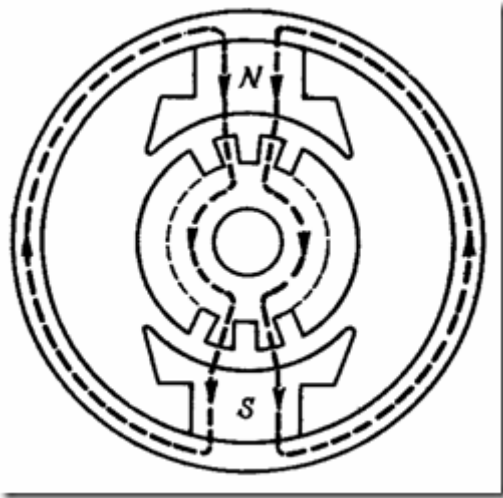


Рис.1.1.20. Магнітне коло колекторної електричної машини

Магнітним колом називається сукупність частин машини, по яким проходить головний магнітний потік (рис.1.1.20). Магнітне коло машини постійного струму складається з п'яти ділянок: осердя головних полюсів, повітряний проміжок, зубчатий слой якоря, ярмо якоря і ярмо статора (станина). Кожна з цих ділянок створює опір магнітному потоку. Для подолання магнітних опорів необхідна магніторушійна сила (МРС), що створюється постійним струмом, який протікає по обмотці збудження. Щоб знайти потрібне значення МРС, розраховують магнітне коло, визначаючи МРС, необхідну для підтримання заданих значень магнітної індукції на кожній з ділянок магнітного кола. МРС окремих ділянок кола додають і отримують повну МРС обмотки збудження на пару полюсів F_z , необхідну для створення потрібного робочомагнітного потоку.

Отримане значення МРС дозволяє визначити кількість витків в катушках кожного з полюсів обмотки збудження:

$$w_z = F_z / (2I_z), \quad (1.1.7)$$

де I_z — величина струму в обмотці збудження.

Якщо обмотка збудження вмикається паралельно обмотці якоря, то струм I_z приймається рівним 2,5 % від номінального струму в машинах великої і середньої потужності і до 30% в машинах малої потужності. Якщо обмотка збудження ввімкнена послідовно з обмоткою якоря, то струм збудження рівний струмові якоря.

Магнітне поле машини. При роботі машини кожна з обмоток створює своє магнітне поле. Результуюче поле машини, таким чином, можна розглядати як суму двох магнітних полів.

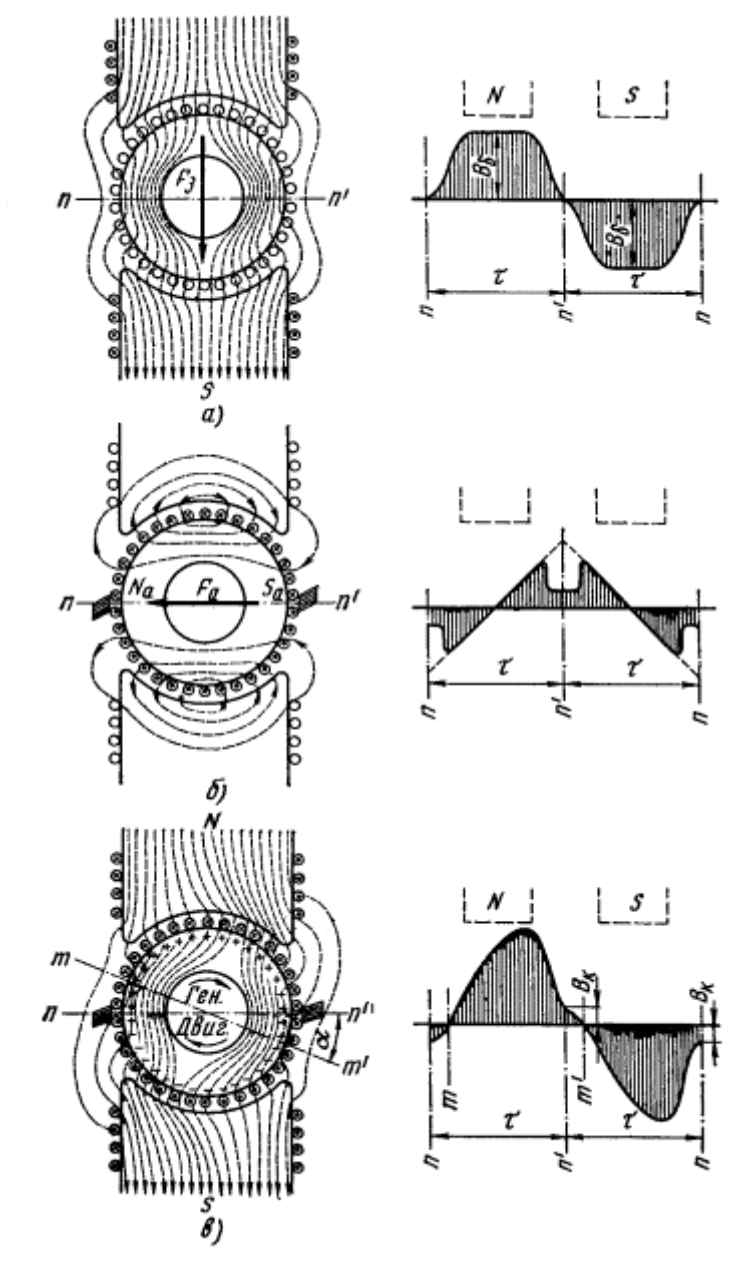


Рис.1.1.21. Магнітне поле колекторної електричної машини.

При ідеальному холостому ході машини постійного струму, коли струм в обмотці якоря відсутній, в машині діє тільки МРС обмотки збудження F_3 , яка і створює магнітне поле, симетрично розподілене відносно вісей полюсів. Графік розподілення магнітної індукції B_0 в повітряному проміжку являє собою трапецеїдальну криву (рис. 1.1.21, а). В цьому випадку *фізична нейтраль*, тобто лінія, проведена через точки окружності якоря, де магнітна індукція рівна нулю, співпадає з *геометричною нейтраллю* $\text{пп}\phi$ — лінією, що проходить через середину міжполюсного простору.

З появою навантаження в обмотці якоря виникає струм, що створює МРС якоря F_a , нерухому в просторі і напрямлену по вісі щіток. МРС якоря створює магнітне поле якоря.

Якір машини постійного струму створений так, що по одну сторону від ліній щіток струм по обмотці якоря протікає в одному напрямку, а по іншу сторону – в іншому напрямку (рис.1.1.21, б). Якір, таким чином, можна розглядати як котушку з зігнутих каркасом і віссю, що співпадає з лінією щіток. МРС якоря завжди напрямлена по вісі щіток. Якщо щітки розташовані на геометричній нейтралі, то F_a співпадає з геометричною нейтраллю, тобто напрямлена по поперечній вісі машини.

На рис. 1.1.21, б зображена картина магнітного поля, створеного МРС обмотки якоря F_a при відсутності струму в обмотці збудження. На цьому рисунку зображений графік розподілення індукції в проміжку від магнітного потоку обмотки якоря. Зменшення індукції на геометричній нейтралі пояснюється збільшенням магнітного опору потоку якоря в міжполюсному просторі.

При роботі машини під навантаженням одночасно діють дві МРС: F_z і F_a , в результаті чого в машині створюється результуюче магнітне поле. Дія магнітного поля якоря на головне поле машини називається *реакцією якоря*. На рис.1.1.21,в зображена картина результуючого магнітного поля машини і графік розподілення індукції результуючого магнітного поля в повітряному проміжку машини.

З порівняння рис.1.1.21,а і 1.1.21,в слідує, що реакція якоря спотворює магнітне поле машини. Вісь результуючого поля зміщується відносно вісі полюсів, зміщуючи при цьому фізичну нейтраль $m\phi$ відносно геометричної нейтралі $n\phi$ на кут α в напрямку обертання якоря при роботі машини в генераторному режимі і в зворотньому напрямку при роботі машини в режимі двигуна.

Лекція №3

Тема: «Генератори постійного струму»

Класифікація генераторів постійного струму виконується за способом їхнього збудження. Вони поділяються на *генератори з незалежним збудженням та із самозбудженням*.

Генератори з незалежним збудженням виконуються з електромагнітним і магнітоелектричним збудженням.

У генераторах з електромагнітним збудженням обмотка збудження, розташовувана на головних полюсах, підключається до незалежного джерела живлення (рис. 66.1). 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 зі зростанням номінальної потужності машини.

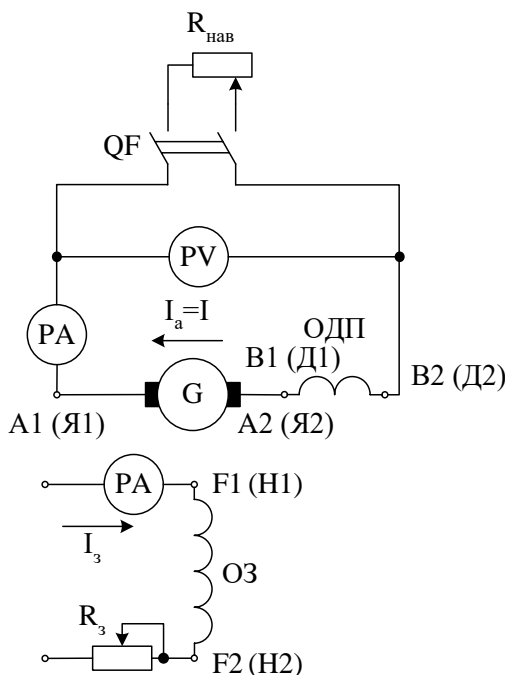


Рис. 66.1. Схема генератора з незалежним збудженням

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 важкість регулювання напруги.

У генераторів із самозбудженням обмотка збудження одержує живлення від власного якоря. У залежності від способу її включення генератори із самозбудженням підрозділяються на *генератори з паралельним, послідовним і змішаним збудженням*.

Схема з'єднання генератора паралельного збудження показана на рис. 66.2.

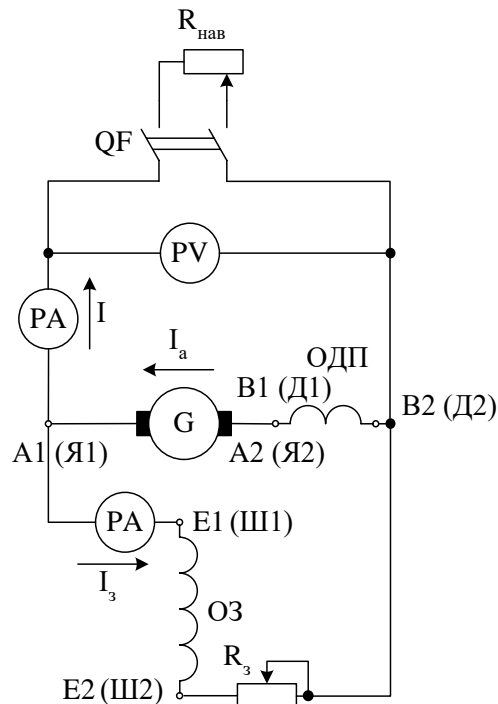


Рис. 66.2. Схема генератора паралельного збудження

Резистор R_3 дає можливість змінювати струм збудження I_3 , а отже, і вихідна напруга. Струм якоря I_a у цього генератора дорівнює сумі

$$I_a = I + I_3, \quad (66.1)$$

де I – струм навантаження.

Струм збудження відносно малий і для номінального режиму складає 1–5 % номінального струму машини.

У генератора послідовного збудження обмотка збудження з'єднується послідовно з якорем, і її струм збудження дорівнює струму якоря (рис. 66.3):

$$I_3 = I_a = I. \quad (66.2)$$

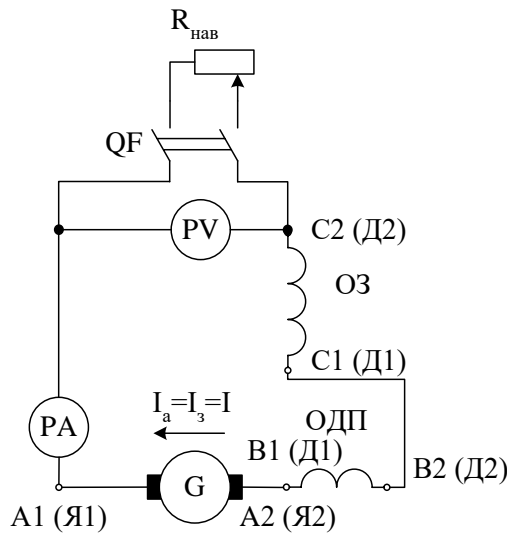


Рис. 66.3. Генератор послідовного збудження

У генераторів змішаного збудження (рис. 66.4) на полюсах розміщуються дві обмотки. Одна з них, має велике число витків і виконана з провідників відносно невеликого перерізу, включається паралельно якорем, а інша обмотка з малим числом провідників великого перерізу включається послідовно з якорем.

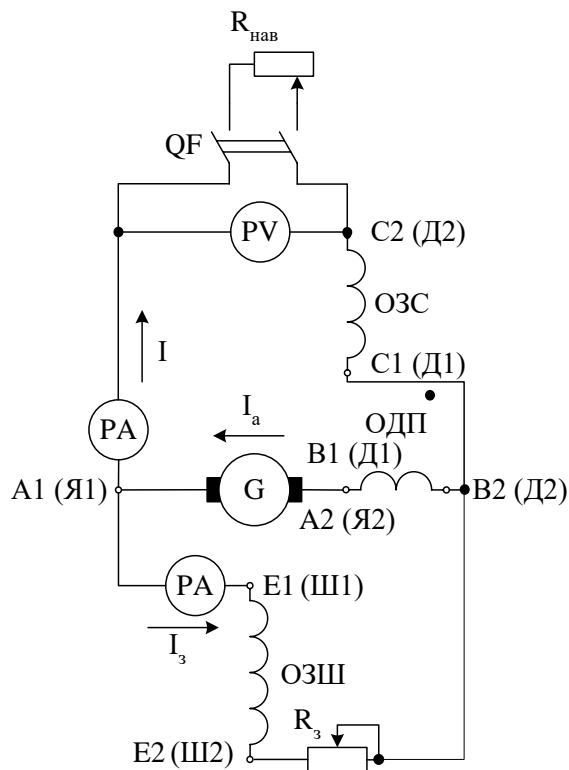


Рис. 66.4. Генератор змішаного збудження

Струм якоря такого генератора

$$I_a = I + I_3, \quad (66.3)$$

У цих генераторів паралельна і послідовна обмотки можуть бути включені узгоджено (МРС цих обмоток направлені узгоджено) і зустрічно (їхні МРС спрямовані зустрічно). У залежності від цього розрізняють *генератори змішаного узгодженого вмикання і генератори змішаного зустрічного вмикання.*

В основному в генераторах змішаного збудження основна частина МРС збудження створюється паралельною обмоткою.

Генератори паралельного, послідовного і змішаного збудження іноді називають відповідно генераторами шунтового, серієсного і компаундного збудження.

Для нових розроблених машин установлені позначення, що відповідають СТ СЭВ 3170-81 і публікації МЭК 34-8. Основні позначення приведені в табл.6.1.

Таблиця 6.1. Буквено-цифрові позначення виводів обмоток збудження МПС

Найменування обмотки	Позначення виводів			
	(ДСТ 26772-85)		ГОСТ 183-74	
	Початок	Кінець	Початок	Кінець
Обмотка якоря	<i>A1</i>	<i>A2</i>	<i>Я1</i>	<i>Я2</i>
Обмотка додаткового полюса	<i>B1</i>	<i>B2</i>	<i>Д1</i>	<i>Д2</i>
Компенсаційна	<i>C1</i>	<i>C2</i>	<i>K1</i>	<i>K2</i>
Послідовна обмотка збудження	<i>Д1</i>	<i>Д2</i>	<i>С1</i>	<i>С2</i>
Паралельна обмотка збудження	<i>E1</i>	<i>E2</i>	<i>Ш1</i>	<i>Ш2</i>
Незалежна обмотка збудження	<i>F1</i>	<i>F2</i>	<i>Н1</i>	<i>Н2</i>

Цифра 1 позначає початок, а цифра 2 – кінець обмотки.

Енергетична діаграма генератора незалежного збудження (ГНЗ)

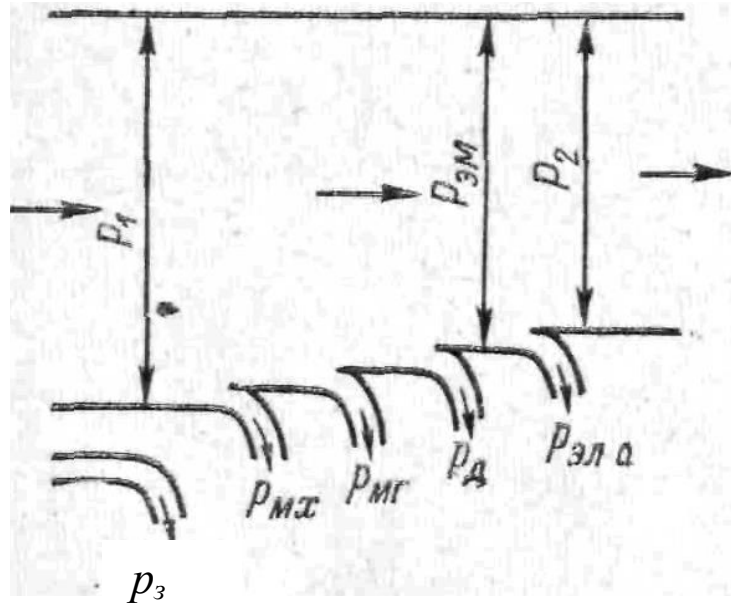


Рис. 66.5. Енергетична діаграма ГНЗ

Одержувана від первинного двигуна механічна потужність P_1 за винятком механічних втрат p_{mx} , магнітних p_{mg} і додаткових p_d перетворюється в якорі в електромагнітну потужність P_{em} . Потужність P_{em} частково витрачається на електричні втрати p_{ela} в колі якоря (в обмотках якоря, додаткових полюсах і в компенсаційній обмотці та в перехідному опорі щіткового контакту), а інша частина цієї потужності являє собою корисну потужність P_2 , що віддається споживачам.

Втрати на збудження p_z у генераторі незалежного збудження покриваються за рахунок стороннього джерела струму.

На підставі викладеного для ГНЗ маємо рівняння потужностей

$$P_2 = P_1 - p_{mx} - p_{mg} - p_d - p_{ela} = P_{em} - p_{ela}. \quad (66.4)$$

Можна написати також наступне рівняння потужностей:

$$P_1 = p_{mx} + p_{mg} + p_d + P_e. \quad (66.5)$$

Аналогічні енергетичні діаграми можна побудувати і для інших типів генераторів.

СРС: способи покращення комутації.

Лекція №4

Тема: «Втрати і коефіцієнт корисної дії генераторів постійного струму. Загальні положення»

При роботі електричної машини частина енергії, яку вона споживає, витрачається даремно і розсіюється у вигляді тепла. Потужність втраченої енергії називають *втратами потужності* або просто *втратами*.

Втрати в електричних машинах підрозділяються на *основні і додаткові*. Основні утрати виникають у результаті протікаючих у машині основних електромагнітних і механічних процесів, а додаткові втрати обумовлені різними вторинними явищами. В обертових електричних машинах основні втрати підрозділяються на 1) механічні втрати, 2) магнітні втрати, або втрати в сталі, 3) електричні втрати.

До електричних втрат відносяться втрати в обмотках, що називаються також 0втратами в міді, хоча обмотки і не завжди виготовляються з міді; втрати в регулювальних реостатах і втрати в перехідному опорі щіткових контактів.

Механічні втрати $p_{мх}$ складаються з

- 1) втрат у підшипниках $p_{підш}$ залежать тільки від швидкості обертання і не залежать від навантаження;
- 2) втрат на тертя щіток об колектор або контактні кільця. ;

Втрати на тертя щіток можуть бути обчислені по формулі

$$p_{тр.щ} = k_{тр} f_{щ} S_{щ} \vartheta_k, \quad (65.1)$$

де $k_{тр}$ – коефіцієнт тертя щіток об колектор або контактні кільця ($k_{тр} = 0,15 \div 0,30$);

$f_{щ}$ – питомий (на одиницю площі) тиск на щітку;

$S_{щ}$ – контактна поверхня всіх щіток;

ϑ_k – окружна швидкість колектора або контактних кілець.

- 3) вентиляційних втрат, що містять у собі втрати на тертя частин машини з повітрям й інші втрати, пов'язані з вентиляцією

Втрати на вентиляцію $p_{вент}$ залежать від конструкції машини і роду вентиляції.

У самовентильованих машинах з вбудованим відцентровим вентилятором втрати на вентиляцію у ватах іноді обчислюються приблизно по наступній емпіричній формулі:

$$p_{вент} = 1,75 Q \vartheta^2, \quad (65.2)$$

де Q – кількість повітря, прогнаного через машину, m^3/c ;

ϑ – окружна швидкість вентиляційних крил по їхньому зовнішньому діаметрі, m/c .

Загальні механічні втрати

$$P_{мх} = P_{нідиш} + P_{вент} + P_{тр.щ}, \quad (65.3)$$

У МПС потужністю 10–500 кВт втрати $p_{мк}$ складають відповідно близько 2–0,5% від номінальної потужності машини.

Магнітні втрати $p_{мг}$ містять у собі втрати на гістерезис і вихрові струми, викликані перемагнічуванням сердечників активної сталі.

Загальні магнітні втрати

$$P_{мг} = P_{мга} + P_{мгз} + P_{пов} + P_{пульс}, \quad (65.4)$$

де $P_{мга}$ – втрати в сердечнику якоря;

$P_{мгз}$ – втрати в зубцях якоря;

$P_{пов}$ – поверхневі втрати в полюсних наконечниках;

$P_{пульс}$ – пульсаційні втрати в зубцях.

Електричні втрати $p_{ел}$ у кожній обмотці обчислюють по формулі

$$p_{ел} = I^2 R. \quad (65.5)$$

Опір обмотки залежить від її температури. Тому ГОСТ 183-74 передбачає визначення втрат в обмотках при розрахунковій температурі 75° С для класів ізоляції обмоток А, Е і В і 115° С для класів F і H. У нормальних машинах постійного струму маються два електричні кола: коло якоря і коло збудження. Тому звичайно розраховують втрати в колах якоря $p_{ел.а}$ і в колі збудження $p_{ел.з}$.

Втрати в обмотках можна виразити також через щільність струму в обмотці j і масу обмотки (без ізоляції) G . Дійсно,

$$P_{ел.об} = I^2 R = I^2 \frac{\rho l}{s} = \left(\frac{I}{s}\right)^2 \frac{\rho l s \gamma}{\gamma}, \quad (65.6)$$

де l – загальна довжина провідників обмотки;

s – переріз провідника;

γ – густина провідника;

ρ – питомий опір.

Але

$$\left(\frac{I}{s}\right)^2 = j^2 \quad i \quad l s \gamma = G.$$

Тому

$$P_{ел.об} = \frac{\rho}{\gamma} j^2 G. \quad (65.7)$$

До електричних втрат відносять також втрати в регулювальних реостатах і втрати у перехідних опорах щіткових контактів. Втрати в перехідних опорах щіткових контактів для щіток однієї полярності обчислюються по формулі

$$P_{ел.щ} = \Delta U_{щ} I, \quad (65.8)$$

де $\Delta U_{щ}$ – спад напруги на один щітковий контакт. Приймається для вугільних і графітних щіток $\Delta U_{щ} = 1$ В і для металовугільних щіток $\Delta U_{щ} = 0,3$ В.

Додаткові втрати p_{δ} . До цієї групи відносять втрати, викликані різними вторинними явищами при навантаженні машини. Тому зазначені втрати, що залежать від струму навантаження, називають іноді також додатковими втратами при навантаженні.

Сумарні, або повні втрати p_{Σ} являють собою суму усіх втрат:

$$P_{\Sigma} = P_{мх} + P_{мг} + P_{ел} + P_{\delta}. \quad (65.9)$$

65.2. ККД

Загальні положення.

ККД визначається як відношення корисної, або тієї, що віддається, потужності P_2 до споживаної потужності P_1 :

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \quad \eta\% = \frac{P_2}{P_1} \cdot 100\%. \quad (65.10)$$

Крива ККД електричної машини $\eta = f(P_2)$ спочатку швидко росте зі збільшенням навантаження, потім ККД досягає максимального значення (звичайно при навантаженні, близької до номінального) і при великих навантаженнях зменшується (рис. 65.1). Останнє пояснюється тим, що окремі види втрат (електричні і додаткові) ростуть швидше, ніж корисна потужність.

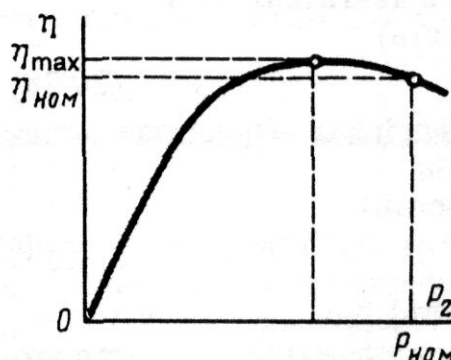


Рис. 65.1 Залежність ККД від навантаження

Прямий і непрямий методи визначення ККД. Прямий метод визначення ККД за експериментальним значенням P_1 і P_2 відповідно до формули (65.10) може дати похибку, оскільки, по-перше, P_1 і P_2 є близькими

по значенню i , по-друге, їхнє експериментальне визначення зв'язане з похибками. Найбільші труднощі і похибки викликає вимірювання механічної потужності.

Тому ГОСТ 11828-75 пропонує для машин з $\eta\% > 70\%$ непрямий метод визначення ККД, при якому по експериментальним даним визначається сума втрат p_{Σ} .

Підставивши у формулу (5-10)

$$P_2 = P_1 - p_{\Sigma}, \quad (65.11)$$

одержимо

$$\eta = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_1}. \quad (65.12)$$

Застосувавши тут підстановку $P_1 = P_2 + p_{\Sigma}$ одержимо інший вид формули:

$$\eta = 1 - \frac{p_{\Sigma}}{P_2 + p_{\Sigma}}. \quad (65.13)$$

Умови максимуму ККД.

$$P_2 = U_i I = U_i I_i \frac{I}{I_i}, \quad (65.14)$$

$$P_2 = k_{нав} P_{2н}, \quad (65.15)$$

де коефіцієнт навантаження

$$k_{нав} = \frac{I}{I_n} = \frac{P_2}{P_{2н}} \quad (65.16)$$

визначає відносну величину навантаження машини.

Сумарні втрати також можна виразити через $k_{нав}$:

$$p_{\Sigma} = p_0 + k_{нав} p_1 + k_{нав}^2 p_2, \quad (65.17)$$

де p_0 – постійні втрати, що не залежать від навантаження;

p_1 – значення втрат, що залежать від першого ступеня $k_{нав}$ при номінальному навантаженні;

p_2 – значення втрат, що залежать від квадрата $k_{нав}$ при номінальному навантаженні.

Підставимо P_2 з (65.15) і p_{Σ} з (65.17) у формулу ККД

$$\eta = \frac{P_2}{P_2 + p_{\Sigma}} \cdot \quad (65.18)$$

Тоді

$$\eta = \frac{k_{нав} P_{2н}}{k_{нав} P_{2н} + p_0 + k_{нав} p_1 + k_{нав}^2 p_2} \quad (65.19)$$

Встановимо, при якому значенні $k_{нав}$ ККД досягає максимального значення, для чого визначимо похідну $\frac{d\eta}{dk_{нав}}$ формули (65.19) і прирівняємо її нулеві:

$$\frac{d\eta}{dk_{нав}} = \frac{(p_0 - k_{нав}^2 p_2) P_{2н}}{(k_{нав} P_{2н} + p_0 + k_{нав} p_1 + k_{нав}^2 p_2)^2} = 0. \quad (65.20)$$

Це рівняння виконується, коли його знаменник дорівнює нескінченності. Цей випадок не представляє інтересу. Тому необхідно покласти рівним нулеві чисельник. При цьому одержимо

$$p_0 = k_{нав}^2 p_2. \quad (65.21)$$

Таким чином, ККД буде максимальним при такому навантаженні, при якому змінні втрати $k_{нав}^2 p_2$, які залежать від квадрата навантаження, стають рівними постійним втратам p_0 .

Значення коефіцієнта навантаження при максимумі ККД, відповідно до формули (65.21),

$$k_{нав} = \sqrt{\frac{p_0}{p_2}}. \quad (65.22)$$

CPC: процес комутації

Лекція №5

Тема: «Двигуни постійного струму»

Характеристики

ДПС знаходять широке застосування в промислових, транспортних і інших установках, де потрібно широке і плавне регулювання швидкості обертання (прокатні стани, могутні металорізальні верстати, електрична тяга на транспорті і т.д.).

По способу збудження ДПС підрозділяються аналогічно генераторам на двигуни незалежного, паралельного, послідовного і змішаного порушення.

Схеми двигунів і генераторів з даним видом збудження однакові.

У двигунах незалежного збудження струми якоря I_a і навантаження I рівні: $I = I_a$;

у двигунах паралельного і змішаного порушення $I = I_a + i_z$;

в двигунах послідовного порушення $I = I_a = I_z$.

Енергетична діаграма двигуна паралельного збудження зображена на рис. 74.1.

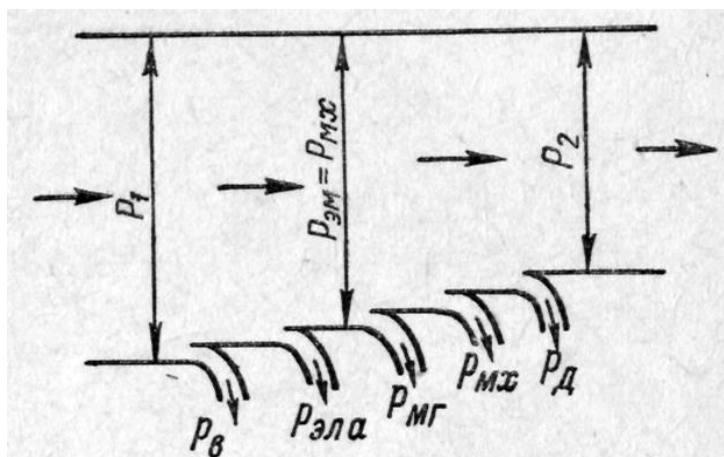


Рис. 74.1. Енергетична діаграма двигуна паралельного збудження

Первинна потужність P_1 є електричною і споживається з живлячої мережі. За рахунок цієї потужності покриваються втрати на збудження p_3 і електричні втрати $p_{ел а} = I_a^2 R_a$ в колі якоря, а частина, що залишилася, складає електромагнітну потужність якоря $P_{ем} = E_a I_a$, яка перетворюється в механічну потужність $P_{мх}$. Втрати магнітні $p_{мз}$, додаткові p_d і механічні $p_{мх}$ покриваються за рахунок механічної потужності, а інша частина цієї потужності являє собою корисну механічну потужність P_2 на валові.

Аналогічні енергетичні діаграми, що ілюструють перетворення енергії в двигуні, можна побудувати і для інших типів двигунів.

Рівняння обертаючих моментів. Електромагнітний момент двигуна

$$M_{ем} = P_{ем} / \omega, \quad (74.1)$$

який є рушійним і діє убік обертання, витрачається на зрівноважування гальмівних моментів:

- 1) моменту M_0 , який відповідає втратам $p_{мг}$, p_d , $p_{мх}$, що покривається за рахунок механічної потужності;
- 2) $M_в$ – моменту навантаження на валові, створюваного робочою машиною або механізмом;
- 2) $M_{дин}$ – динамічного моменту.

При цьому

$$M_в = P_2 / \omega, \quad (74.2)$$

Таким чином,

$$M_{ем} = M_0 + M_в + M_{дин} \quad (74.3)$$

або

$$M_{ем} = M_{ст} + M_{дин}, \quad (74.4)$$

де

$$M_{ст} = M_0 + M_в \quad (74.5)$$

є статичним моментом опору.

При усталеному режимі роботи, коли $n = \text{const}$ і тому $M_{дин} = 0$

$$M_{ем} = M_{ст}. \quad (74.6)$$

Надалі індекс «ем» у $M_{ем}$ будемо опускати.

Якщо виразити P у кіловатах, а Ω – через число оборотів у хвилину n_m , то між P , n_m і M в кгс·м буде існувати залежність

$$M_{кгс\cdot м} = \frac{P}{9,81\Omega} \omega = \frac{1000 \cdot 60P \text{ кВт}}{9,81 \cdot 2\pi n_m} = \frac{975P \text{ кВт}}{n_m}. \quad (74.7)$$

Рівняння напруги і струму. У двигунах напрямок дії ЕРС якоря E_a протилежна напрямкові струму якоря I_a , і тому E_a називається також протиЕРС якоря. Рівняння напруги для кола якоря двигуна можна записати в такий спосіб:

$$U = E_a + R_a I_a. \quad (74.8)$$

Тут R_a – повний опір ланцюга якоря.

У режимі двигуна завжди $U > E_a$.

З рівності (14-8) випливає, що

$$I_a = \frac{U - E_a}{R_a}, \quad (74.9)$$

де

$$E_a = c_e \Phi_\delta n. \quad (74.10)$$

Швидкість обертання і механічні характеристики. Розв'язуючи рівняння (74.8) разом з (74.10) відносно n , знаходимо *рівняння швидкісної характеристики* $n = f(I_a)$ двигуна:

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_\delta}. \quad (74.11)$$

Відповідно до вираження (63.15)

$$M_{em} = c_m \Phi_\delta I_a. \quad (74.12)$$

Визначивши звідси значення I_a і підставивши його в (74.11), одержимо *рівняння механічної характеристики* $n = f(M)$ двигуна:

$$n = \frac{U}{c_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{c_e c_m \Phi_\delta^2}, \quad (74.13)$$

яке визначає залежність швидкості обертання двигуна від моменту обертання, що розвивається.

Вид механічної характеристики $n = f(M)$ або $M = f(n)$ при $U = \text{const}$ залежить від того, як зі зміною моменту M змінюється потік машини Φ_δ , і різний для двигунів з різними способами збудження. Це ж справедливо і для швидкісних характеристик.

Характеристики ДПС:

- 1) швидкісна (електромеханічна) $\omega = f(I_a)$;
- 2) моментна $M = f(I_a)$;
- 3) механічна $\omega = f(M)$.

Швидкісна і механічна характеристики знімаються при $U_a = \text{const}$, а для ДНЗ, ДПарЗ і ДЗЗ крім того і при $I_3 = \text{const}$.

СРС: область застосування ДПС.

Лекція №6

Тема: «Регулювання кутової швидкості та гальмування ДПС»

Способи регулювання швидкості ДПС

Способи регулювання швидкості обертання двигунів постійного струму впливають зі співвідношень

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_\delta}. \quad (76.1)$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{c_e c_m \Phi_\delta^2}. \quad (76.2)$$

Можливі три способи регулювання швидкості обертання.

1. Найбільш зручний, розповсюджений і економічний є спосіб регулювання швидкості шляхом зміни потоку Φ , тобто струму збудження I_z .

Зі зменшенням Φ , відповідно до (76.1), швидкість зростає. Двигуни розраховуються для роботи при номінальному режимі з найбільшим значенням Φ , тобто з найменшою швидкістю n . Тому практично можна тільки зменшувати Φ .

Отже, розглянутий спосіб дозволяє регулювати швидкість ввєрх від номінальної. При такому регулюванні ККД двигуна залишається високим, тому що потужність збудження мала, зокрема мала потужність реостатів для регулювання струму збудження. До того ж при зменшенні I_z потужність збудження UI_z зменшується.

Верхня межа регулювання швидкості обертання обмежується механічною міцністю машини й умовами її комутації.

При високих швидкостях комутація погіршується внаслідок збільшення вібрації щіткового апарата, нестійкості щіткового контакту і зростання реактивної ЕРС, а також унаслідок збільшення максимальної напруги між колекторними пластинами в результаті ослаблення основного поля і посилення при цьому спотворюючого впливу поперечної реакції якоря.

2. Другий спосіб регулювання швидкості полягає у включенні послідовно в коло якоря реостата або регульованого опору R_{pa} .

Замість (76.1) при цьому маємо

$$n = \frac{U - (R_a + R_{pa}) I_a}{c_e \Phi_\delta}. \quad (76.3)$$

Цей спосіб дає можливість регулювати швидкість вниз від номінальної і зв'язаний зі значними втратами в опорі R_{pa} і зниженням ККД.

З цієї причини даний спосіб застосовується в основному для двигунів невеликої потужності, а для більш потужних двигунів використовується рідко і тільки короткочасно (пуско-налагоджувальні режими і т.д.).

3. Регулювання швидкості здійснюється також шляхом регулювання напруги кола якоря. Тому що робота двигуна при $U > U_n$ неприпустима, то даний спосіб, відповідно до (76.1) і (76.2), дає можливість регулювати швидкість також вниз від номінальної. ККД. двигуна при цьому залишається високим, тому що ніяких додаткових джерел втрат у схему двигуна не вноситься.

Однак у цьому випадку необхідне окреме джерело струму з регульованою напругою, що підвищує вартість установки.

Відзначимо, що регулювання швидкості шляхом зміни I_a неможливе, хоча така можливість на перший погляд впливає з рівності (76.1). Справа в тому, що двигун при кожній швидкості обертання повинен розвивати відповідний момент M , рівний моменту опору приводного механізму M_{cm} при даному значенні n . Але при цьому відповідно до

$$M_{em} = c_m \Phi_\delta I_a. \quad (76.4)$$

при даному значенні Φ_δ величина I_a у двигуні буде при кожному значенні M також цілком визначеною.

Реалізація цього способу можлива за допомогою систем Г–Д, „керований випрямляч – двигун”, а також за допомогою імпульсного управління.

В системі Г–Д двигун отримує живлення від перетворювальної установки, яка складається з ГНЗ, який приводиться в рух з допомогою приводного двигуна (рис. 76.1).

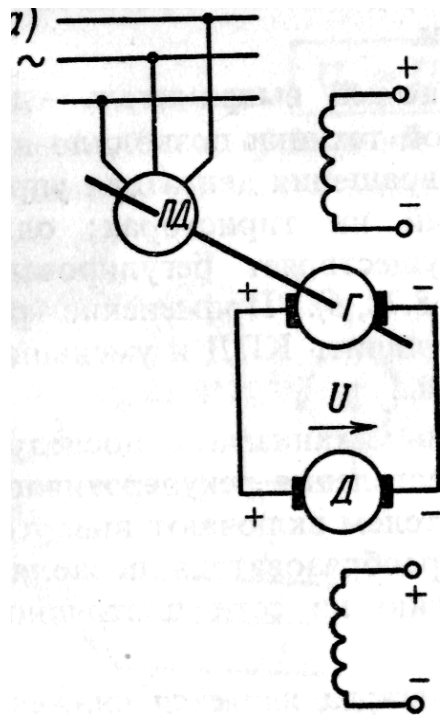


Рис. 76.1. Система Г-Д

Регулювання частоти обертання здійснюється шляхом зміни:

- 1) напруги, яка подається на обмотку якоря двигуна шляхом зміни струму збудження генератора;
- 2) магнітного потоку двигуна шляхом регулювання струму збудження двигуна.

Переваги: широкий діапазон регулювання кутової швидкості.

Недоліки:

- а) велика маса, габарити і вартість;
- б) низький ККД, оскільки здійснюється трикратне перетворення енергії.

Система КВ-Д (рис. 76.2) дозволяє збільшити ККД і зменшити масу установки. Недолік цієї системи:

- а) зниження коефіцієнту потужності при понижений вихідній напрузі;
- б) погіршується комутація двигуна із-за пульсацій струму якоря.

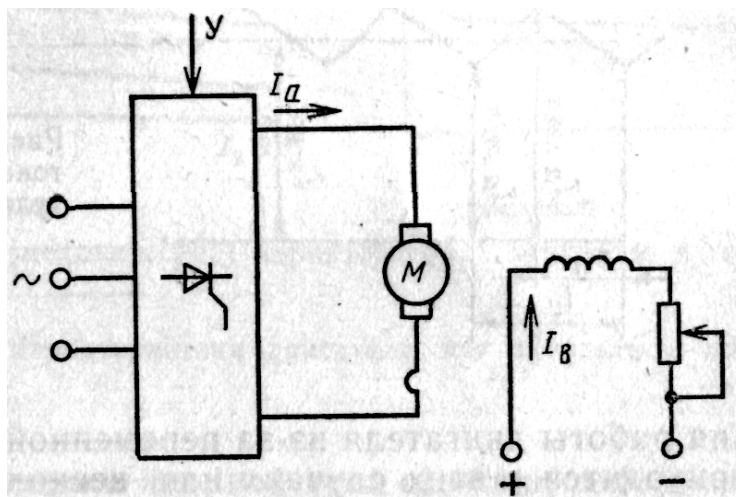


Рис. 76.2. Система КВ-Д

При імпульсному управлінні (рис. 76.3) на двигун з допомогою імпульсного регулятора періодично подають імпульси напруги відповідної частоти.

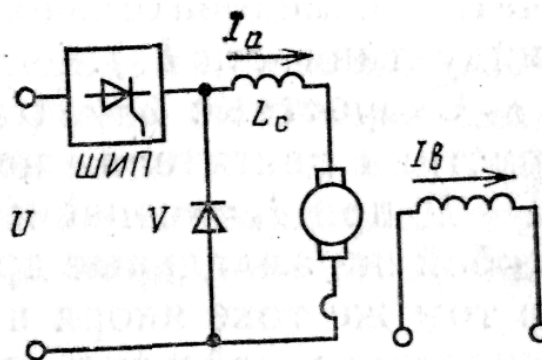


Рис. 76.3. Схема імпульсного регулювання швидкості : ШП

Швидкісні $\omega=f(I_a)$ і механічні $\omega=f(M)$ характеристики ДНЗ в системі Г-Д представлені на рис. 76.4, а при імпульсному управлінні – на рис. 76.5.

В системі з імпульсним управлінням характеристики будуть аналогічні системі Г-Д, але при малих моментах і струмах якоря вони будуть мати крутий підйом.

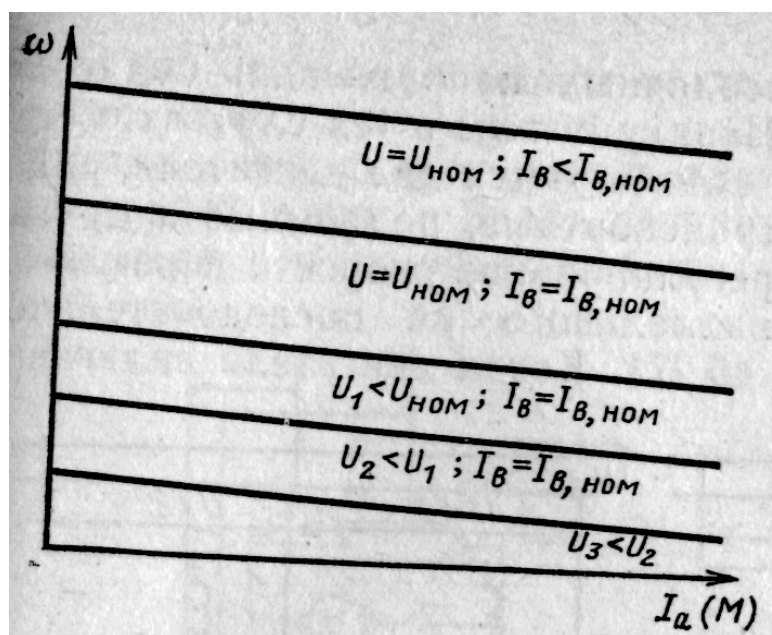


Рис. 76.4. Швидкісні (механічні) характеристики двигуна в системі Г-Д

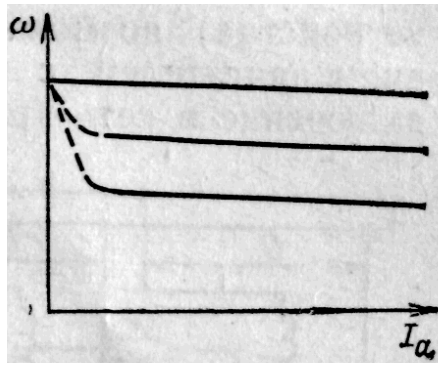


Рис. 76.5. Швидкісні характеристики двигуна при імпульсному управлінні

. Природні швидкісна і механічна характеристики

У ДПослЗ струм якоря одночасно є також струмом збудження: $I_z = I_a = I$. Тому потік Φ змінюється в широких межах і можна написати, що

$$\Phi_\delta = k_\phi I. \quad (78.1)$$

Коефіцієнт пропорційності k_ϕ у значному діапазоні навантажень, при $I < I_n$ є практично постійним, і лише при $I > (0,8 \div 0,9)I_n$ унаслідок насичення магнітного ланцюга k_ϕ починає трохи зменшуватися.

При використанні співвідношення (78.1) для ДПослЗ одержимо

$$n = \frac{U - R_a I_a}{c_e \Phi_\delta} = \frac{U}{c_e k_\phi I} - \frac{R_a}{c_e k_\phi}; \quad (78.2)$$

$$n = \frac{U}{c_e \Phi_\delta} - \frac{R_a M}{c_e c_m \Phi_\delta^2} = \frac{U}{c_e k_\phi I} - \frac{R_a M}{c_e c_m k_\phi^2 I^2}; \quad (78.3)$$

$$M = c_m \Phi I_a = c_m k_\phi I^2. \quad (78.4)$$

Швидкісна характеристика двигуна (див. вираз (78.2) представлена на рис 78.1, є м'якою і має гіперболічний характер. При $k_\phi = \text{const}$ вид кривої $n = f(I)$ показаний штриховою лінією. При малих I швидкість двигуна стає неприпустимо великою. Тому робота ДПослЗ, за винятком дуже маленьких, на холостому ходу не допускається, а використання ремінної передачі неприйнятне. Здебільшого мінімально допустиме навантаження $P_2 = (0,2 \div 0,25)P_n$.

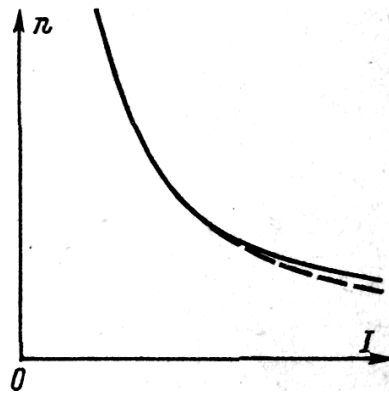


Рис.78.1. Природна швидкісна характеристика ДПослЗ

Природна механічна характеристика ДПослЗ $n = f(M)$ відповідно до співвідношення (78.3) показана на рис. 78.2 (крива 1).

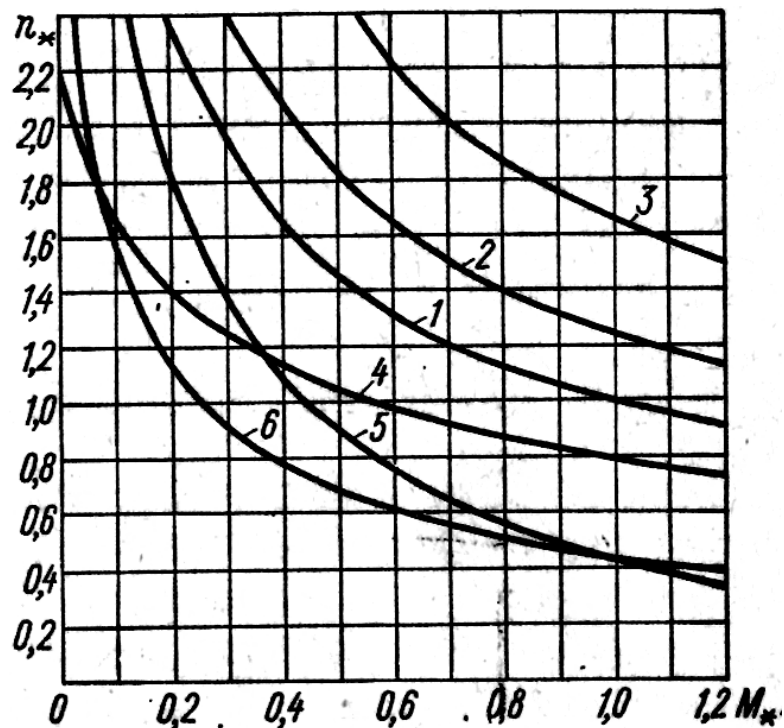


Рис. 78.2. Механічні характеристики ДПослЗ при різних способах регулювання швидкості: 1 – природна ($k_{o.e} = 1$); 2-3 – послабленням поля (2 – $k_{o.e} = 0,6$; 3 – $k_{o.e} = 0,3$); 4 – шунтуванням якоря; 5 – включенням опору в коло якоря; 6 – зміною напруги

Оскільки в ДПарЗ $M \sim I$, а в ДПослЗ $M \sim I^2$, то ДПослЗ розвивають значно більший пусковий момент у порівнянні з ДПарЗ. Крім того, у ДПарЗ

$$P_2 = \omega M \sim M, \quad (78.5)$$

а у ДПослЗ

$$P_2 = \omega M \sim \sqrt{M}, \quad (78.6)$$

Таким чином, у ДПослЗ при зміні моменту навантаження $M_{ст} = M$ у широких межах потужність змінюється в менших межах, чим у ДПарЗ.

Тому для ДПослЗ менш небезпечні перевантаження по моменту. У зв'язку з цим ДПослЗ мають істотні переваги у випадку тяжких умов пуску і зміні моменту навантаження в широких межах. Вони широко застосовуються для електричної тяги (трамвай, метро, тролейбуси, електровози тепловози на залізницях) і в підйомно-транспортних установках.

Відзначимо, що при зростанні швидкості обертання ДПослЗ в режим генератора не переходить. Фізично це пояснюється тим, що при переході в режим генератора, при заданому напрямку обертання і заданій полярності напруги, напрямок струму повинен змінюватися на зворотній, а напрямок ЕРС E_a і полярність полюсів повинні зберігатися незмінними, однак останнє при зміні напрямку струму в обмотці збудження неможливе. Тому для переведення ДПослЗ в режим генератора необхідно переключити кінці обмотки збудження.

Регулювання швидкості за допомогою послаблення поля

Регулювання n за допомогою послаблення поля здійснюється або шляхом шунтування обмотки збудження деяким опором $R_{ш.з}$ (рис. 78.3, а), або зменшенням числа включених у роботу витків обмотки збудження. В останньому випадку повинні бути передбачені відповідні виводи з обмотки збудження.

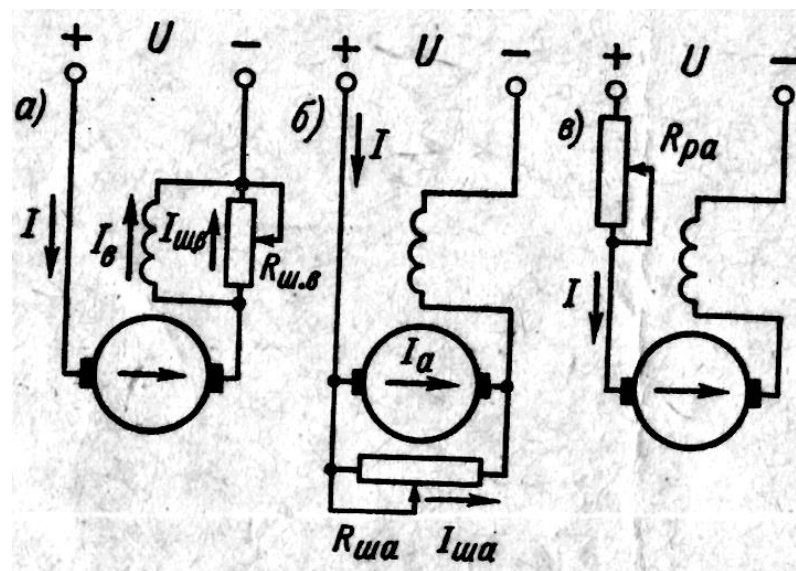


Рис. 78.3. Схеми регулювання швидкості обертання ДПослЗ за допомогою шунтування обмотки збудження (а), шунтування якоря (б) і включення опору в коло якоря (в)

Оскільки опір обмотки збудження R_z і спад напруги на ньому малі, то $R_{ш.з}$ також повинен бути малим. Тому втрати в опорі $R_{ш.з}$ малі, а сумарні втрати на збудження при шунтуванні навіть зменшуються. Унаслідок цього

ККД двигуна залишається високим, і такий спосіб регулювання широко застосовується на практиці.

При шунтуванні обмотки збудження струм збудження зі значення I зменшується до

$$I_B = \frac{R_{ш.в}}{R_B + R_{ш.в}} I$$

і швидкість n відповідно збільшується.

Вирази для швидкісної і механічних характеристик при цьому одержимо, якщо в (78.2) і (78.3) замінимо k_ϕ на $k_\phi k_{o.в}$, де

$$k_{o.в} = \frac{R_{ш.в}}{R_B + R_{ш.в}}$$

являє собою коефіцієнт послаблення збудження. При регулюванні швидкості зміною числа витків обмотки збудження

$$k_{o.в} = \omega_{в.раб} / \omega_{в.полн.}$$

На рис. 78.2 показані (криві 1, 2, 3) характеристики $n = f(M)$ для цього випадку регулювання швидкості при декількох значеннях $k_{o.в}$ (значенню $k_{o.в} = 1$ відповідає природна характеристика 1, $k_{o.в} = 0,6$ – крива 2 і $k_{o.в} = 0,3$ – крива 3).

Регулювання швидкості шляхом шунтування якоря

При шунтуванні якоря (рис. 78.3, б) струм і потік збудження зростають, а швидкість зменшується. Оскільки спад напруги $R_z I$ малий і тому можна прийняти $R_z \approx 0$; 0, то опір $R_{ша}$ практично знаходиться під повною напругою мережі, його значення повинне бути значним, втрати в ньому будуть великі і ККД сильно зменшиться.

Крім того, шунтування якоря ефективно тільки тоді, коли магнітне коло не насичене. У зв'язку з цим шунтування якоря на практиці використовується рідко.

На рис. 78.2 крива 4 являє собою характеристику $n = f(M)$ при

$$I_{ша} \approx U / R_{ша} = 0,5 I_n.$$

Регулювання швидкості включенням опору в коло якоря

Цей спосіб (рис. 78.3, в) дозволяє регулювати n униз від номінального значення. Оскільки одночасно при цьому значно зменшується ККД, то такий спосіб регулювання знаходить обмежене застосування.

Вирази для швидкісної і механічної характеристик у цьому випадку одержимо, якщо в рівностях (78.2) і (78.3) замінимо R_a на $R_a + R_{pa}$.

Характеристика $n = f(M)$ для такого способу регулювання швидкості зображена на рис. 78.2 у виді кривої 5.

Регулювання швидкості зміною напруги

Цим способом можна регулювати n униз від номінального значення зі збереженням високого ККД. Розглянутий спосіб регулювання широко застосовується в транспортних установках, де на кожній ведучій осі встановлюється окремий двигун і регулювання здійснюється шляхом переключення двигунів з паралельного включення в мережу на послідовне (рис. 78.4). На рис. 78.3 крива б являє собою характеристику $n = f(M)$ для цього випадку.

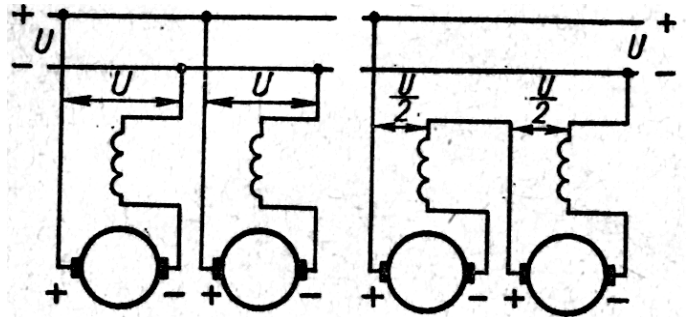


Рис. 78.4. Паралельне і послідовне вмикання ДПослЗ для зміни швидкості обертання

Характеристики двигуна змішаного збудження

Основна обмотка збудження – паралельна. Яка створює біля 70% потоку статора. При узгодженому вмиканні ОЗ двигуна набуває проміжних властивостей двигунів паралельного і послідовного збудження (рис. 79.1, б).

Важлива перевага в порівнянні з двигуном послідовного збудження – при малих навантаженнях і навіть при ХХ двигун змішаного збудження має обмежену частоту обертання.

При зустрічному вмиканні ОЗ їх потоки віднімаються, що приводить до більш жорсткої механічної характеристики (крива 2 на рис.79.1, б).

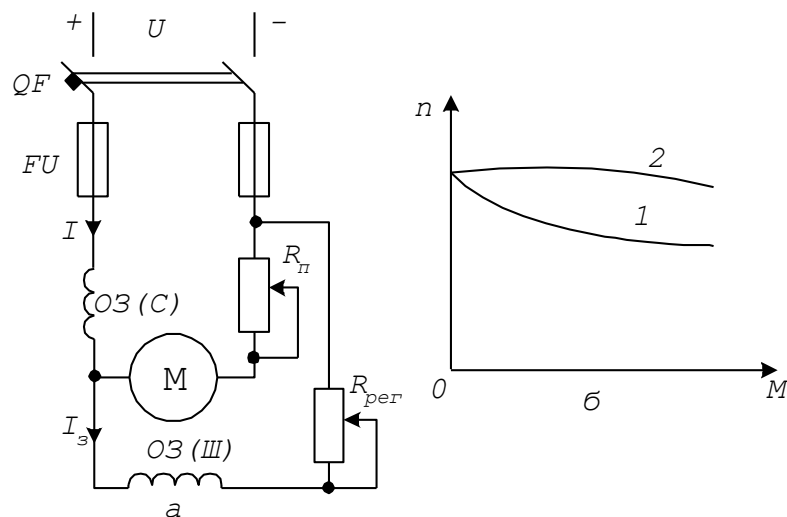


Рис.79.1. До розгляду двигуна змішаного збудження

Двигуни змішаного збудження застосовуються в установках, де потрібно мати великий пусковий момент і робота при малих моментах навантаження з можливістю регулювання частоти обертання в широких межах (н-д, в приводах насосів, компресорів, в електротязі...).

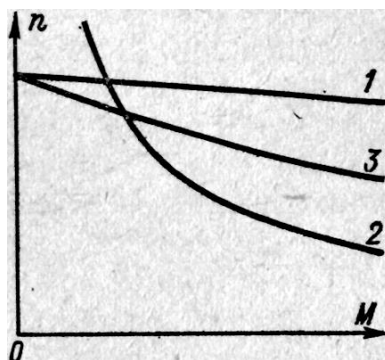


Рис. 79.2. Природні механічні характеристики двигунів паралельного (1), послідовного (2) і змішаного збудженням з узгодженим вмиканням послідовної обмотки (3)

Види електричного гальмування

Електричні двигуни, як правило, використовують не тільки для обертання механізмів, але і для їхнього гальмування. Електричне гальмування дозволяє швидко зупинити механізм або зменшити його частоту обертання без застосування механічних гальм.

Розрізняють три види електричного гальмування ДПС:

- 1) рекуперативне гальмування – генераторне гальмування з віддачею електричної енергії в мережу;
- 2) динамічне або реостатне гальмування – генераторне гальмування з гасінням виробленої енергії в реостаті, підключеному до обмотки якоря;
- 3) електромагнітне гальмування – гальмування противмиканням.

В усіх зазначених режимах електромагнітний момент M впливає на якір у напрямку, протилежному n , тобто є гальмовим.

Рекуперативне гальмування

ДШарЗ переходить у режим рекуперативного гальмування при збільшенні його частоти обертання n вище $n_0 = U/c_e\Phi$. У цьому випадку ЕРС машини стає більшою напруги мережі і струм згідно

$$I_a = \frac{E_a - U}{R_{a\Sigma}} \quad (80.1)$$

змінює свій напрямок, тобто двигун переходить у генераторний режим. У цьому режимі машина створює гальмівний момент, а вироблена електрична енергія віддається в мережу і може бути корисно використана.

У машині з паралельним збудженням (рис. 80.1, а) механічні характеристики генераторного режиму являються продовженням механічних характеристик двигунного режиму в область від'ємних моментів (рис. 80.1, б). Тому перехід з двигунного режиму в генераторний може відбуватися автоматично, якщо під дією зовнішнього моменту якір буде обертатися з частотою $n > n_0$. Можна перевести машину в генераторний режим і примусово, якщо перевести її на роботу з характеристики 1 на характеристику 2, зменшивши n_0 шляхом збільшення магнітного потоку (струму збудження) або зниження напруги, яка підводиться до двигуна. У цьому випадку деякій частоті обертання n відповідає на характеристиці 1 двигунний режим (точка А), а на характеристиці 2 – режим рекуперативного гальмування (точка В).

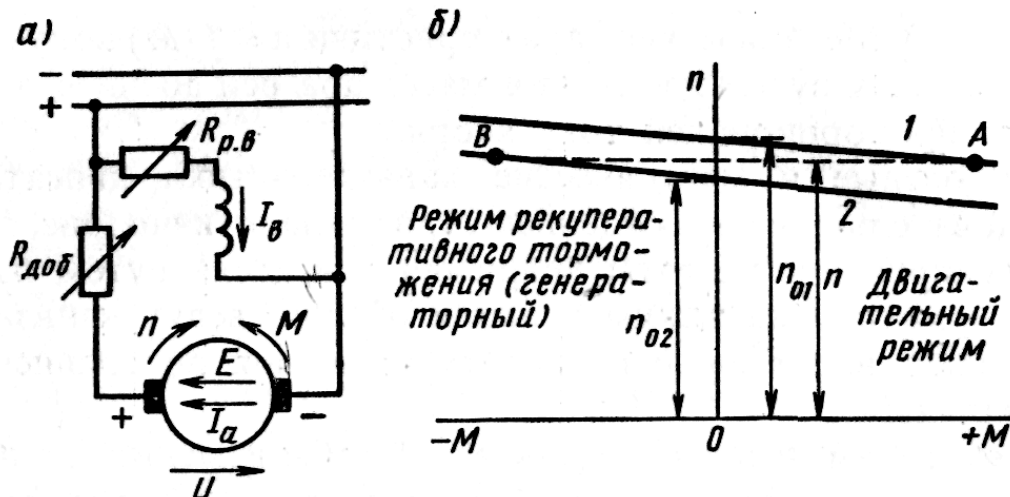


Рис. 80.1. Схема і механічні характеристики машини постійного струму в двигунному і генераторному режимах

ДПослЗ не можуть переходити в режим рекуперативного гальмування. При необхідності рекуперативного гальмування схему двигунів у

гальмівному режимі змінюють, перетворюючи двигуни в генератори з незалежним збудженням.

ДЗЗ можуть автоматично переходити в генераторний режим, що обумовило їхнє застосування в тролейбусах, трамваях й інших пристроях з частими зупинками, де двигун повинен володіти м'якою механічною характеристикою.

Динамічне гальмування

При цьому виді гальмування ДПарЗ обмотку якоря відключають від мережі і приєднують до неї реостат $R_{доб}$ (рис. 80.2, а).

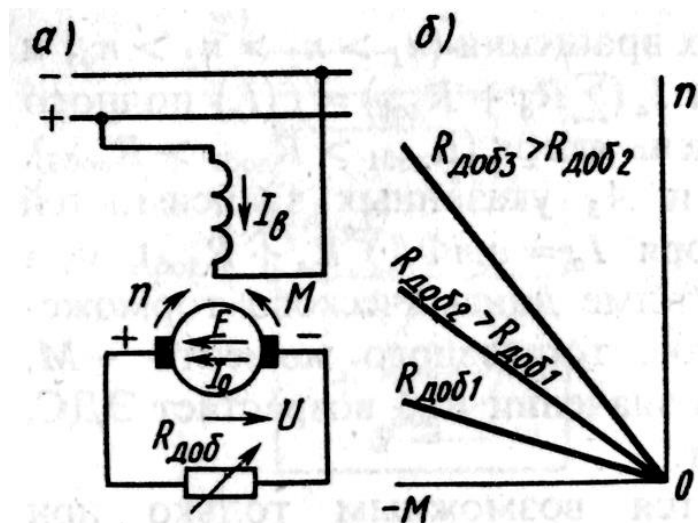


Рис. 80.2. Схема і механічні характеристики ДПарЗ в режимі динамічного гальмування

При цьому машина працює як генератор, створює гальмівний момент, але вироблена електрична енергія даремно гаситься в реостаті. Регулювання струму

$$I_a = \frac{E_a}{R_{a\Sigma} + R_{доб}}$$

тобто гальмівного моменту M , здійснюють шляхом зміни опору $R_{доб}$, підключеного до обмотки якоря (рис. 80.2, б), або ЕРС E_a (впливають на струм збудження). При $n = 0$ гальмівний момент M дорівнює нулеві, отже, машина не може бути загальмована в нерухомому стані.

ДПослЗ може працювати в режимі динамічного гальмування при незалежному збудженні і при самозбудженні. При незалежному збудженні обмотку збудження відключають від обмотки якоря і підключають до мережі живлення послідовно з резистором, опір якого вибирають так, щоб струм збудження не перевищував номінального значення. При цьому механічні характеристики двигуна лінійні (див. рис. 80.2, б).

При самозбудженні при переході машини в генераторний режим необхідно переключити проводи, що підводять струм до обмотки збудження (рис. 80.3, а, б). Останнє необхідно для того, щоб при зміні напрямку струму в якорі (при переході з двигунного режиму в генераторний) напрямок струму в обмотці збудження залишався незмінним і створювана цією обмоткою МРС F_3 збігалася за напрямом з МРС $F_{зал}$ від залишкового магнетизму. У протилежному випадку генератори із самозбудженням розмагнічуються.

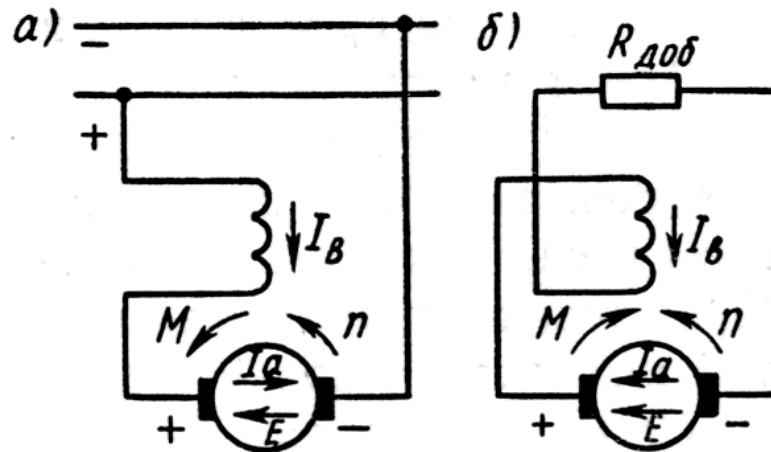


Рис. 80.3. Схеми машини з послідовним збудженням в режимах двигунного (а) і динамічного гальмування (б)

На рис. 80.4 показані залежності ЕРС E від струму якоря I_a при різних частотах обертання ($n_1 > n_2 > n_3 > n_4$) і вольт-амперні характеристики $I_a(R_{a\Sigma} + R_{доб}) = f(I_3)$ повного опору, включеного в коло якоря ($R_{доб1} > R_{доб2} > R_{доб3}$).

Точки перетину A_1 , A_2 і A_3 зазначених залежностей визначають значення струму якоря, при якому працює машина в режимі динамічного гальмування, а отже, і значення гальмівного моменту – M . При збільшенні n і незмінному значенні $R_{доб}$ зростає ЕРС, струм якоря і гальмівний момент.

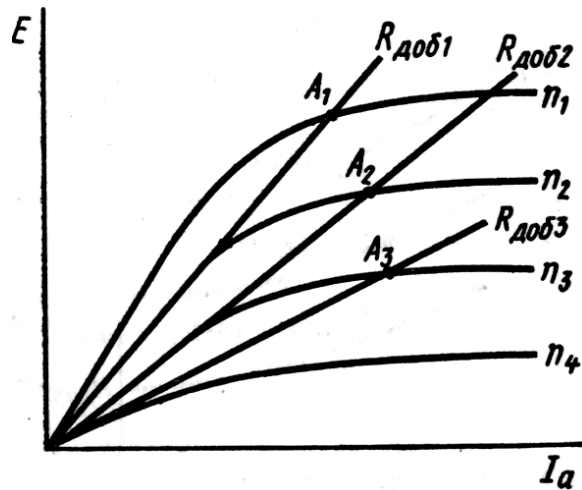


Рис. 80.4. Залежності ЕРС від струму якоря для ДПослЗ у режимі динамічного гальмування

Самозбудження виявляється можливим тільки при частоті обертання, більшій деякого критичного значення $n_{кр}$, при якому вольт-амперна характеристика опору кола якоря розташовується по дотичній до залежності $E = f(I_a)$. Так, наприклад, при підключенні до машини реостата з опором $R_{доб1}$ гальмівний режим при частоті обертання n_1 може бути реалізованим (точка A_1); при зменшенні ж її до значення n_2 він неможливий.

На рис. 80.5, а показані залежності частоти обертання від струму якоря, а на рис. 80.5, б – механічні характеристики двигуна при роботі в режимі динамічного гальмування.

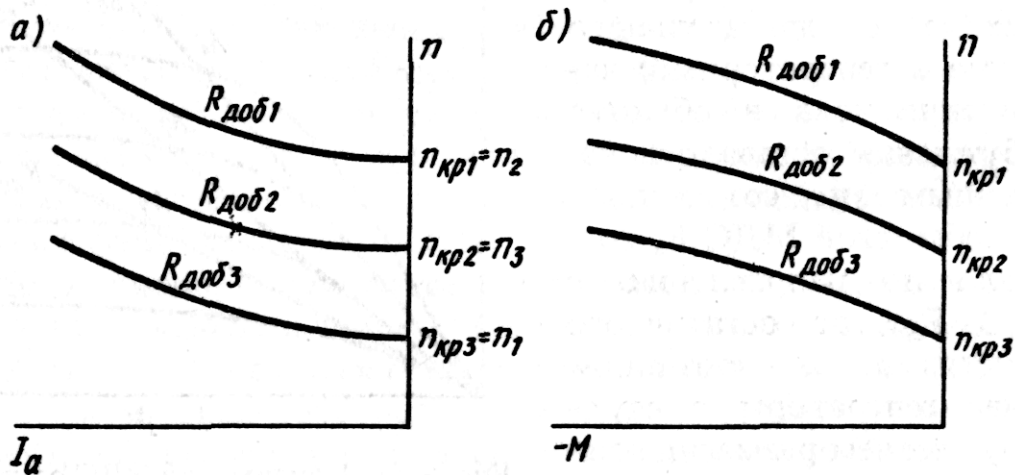


Рис. 80.5. Залежність частоти обертання від струму двигуна в режимі динамічного гальмування якоря (а) і механічні характеристики (б)

Відповідно до рис. 80.4 при збільшенні $R_{доб}$ динамічне гальмування виявляється можливим при більш високих частотах обертання ($n_{кр1} > n_{кр2} > n_{кр3}$).

ДЗЗ також може працювати в режимі динамічного гальмування.

Електромагнітне гальмування

У цьому режимі змінюють напрямок електромагнітного моменту M , зберігаючи незмінним напрямок струму з мережі, тобто момент роблять гальмівним. Останнє здійснюють так само, як і при зміні напрямку обертання двигуна – шляхом переключення проводів, що підводять струм до обмотки якоря (рис. 80.6, а) або до обмотки збудження.

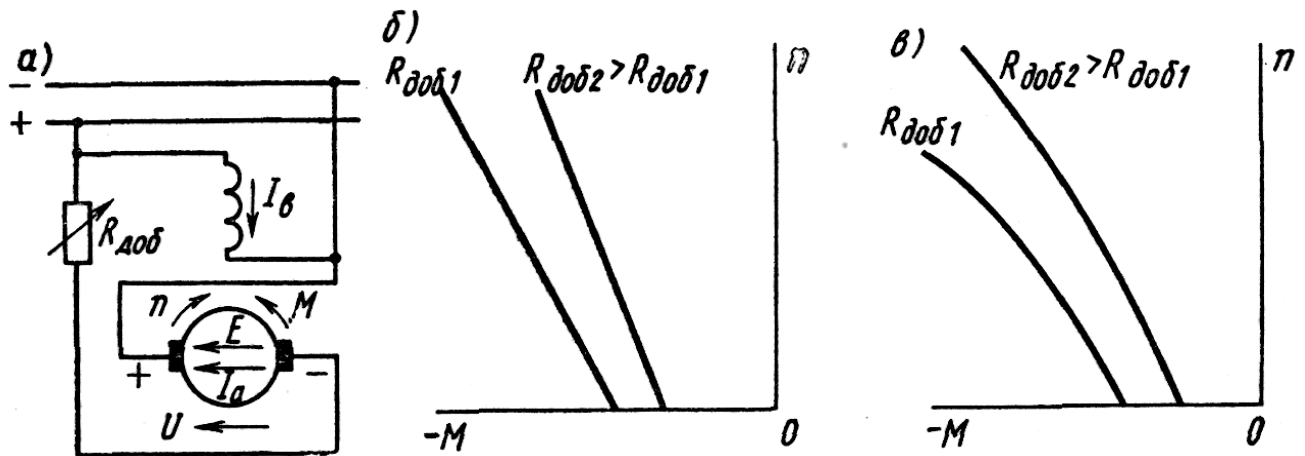


Рис. 80.6. Схема і механічні характеристики двигунів у режимі електромагнітного гальмування

Щоб обмежити значення струму в цьому режимі, у коло обмотки якоря вводять додатковий опір $R_{доб}$. Регулювання струму

$$I_a = \frac{E_a + U}{R_{a\Sigma} + R_{доб}}$$

тобто гальмівного моменту M , здійснюють шляхом зміни опору $R_{доб}$ або ЕРС E_a (струму збудження I_3). Механічні характеристики в цьому режимі для двигунів з паралельним і послідовним збудженням показані на рис. 80.6, б і в.

З енергетичної точки зору електромагнітне гальмування є найбільш не вигідним, оскільки машина споживає як механічну, так і електричну енергію, що гасяться в обмотці якоря і у включеному в її коло реостаті. Однак при цьому способі можна одержувати великі гальмівні моменти при низьких частотах обертання і навіть при $n = 0$, оскільки в цьому випадку струм

$$I_a = \frac{U}{R_{a\Sigma} + R_{доб}}$$

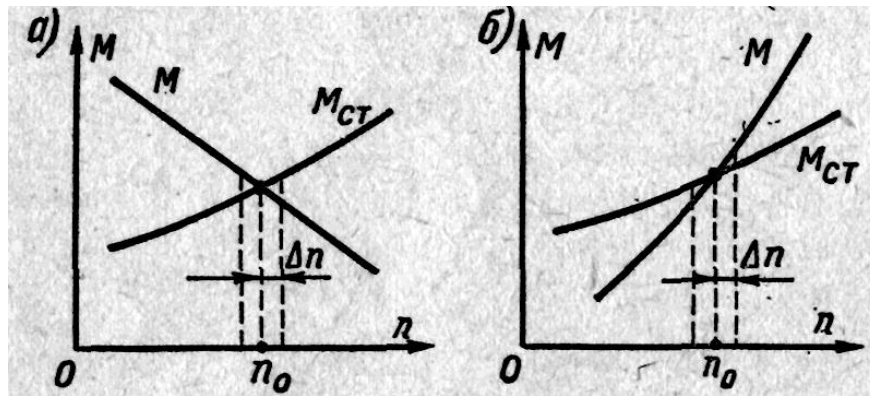


Рис. 76.6. стійкий (а) і нестійкий (б) режими роботи двигуна

Якщо залежності $M=f(n)$ і $M_{cm}=f(n)$ мають вигляд, зображений на рис. 76.6,а, то при випадковому збільшенні n у результаті збурювання на Δn ; гальмівний момент M_{cm} стане більшим рушійного M ($M_{cm} > M$) і тому двигун буде загальмовуватися, що змусить ротор повернутися до вихідної швидкості n_0 .

Точно так само, якщо в результаті збурювання швидкість двигуна зменшиться на Δn , то буде $M_{cm} < M$, тому ротор стане прискорюватися і знову буде $n = n_0$. Таким чином, у розглянутому випадку робота стійка. Як впливає з рис. 76.6, а, при цьому

$$\frac{dM}{dn} < \frac{dM_{cm}}{dn},$$

що є ознакою, або критерієм, стійкості роботи двигуна.

При залежностях $M=f(n)$ і $M_{cm}=f(n)$ виду рис. 76.6, б робота нестійка. Дійсно, при збільшенні n від $n = n_0$ до $n = n_0 + \Delta n$ буде $M > M_{cm}$, виникне надлишок рушійного моменту, швидкість n почне наростати, причому надлишковий момент $M - M_{cm}$ збільшиться ще більше, n знову зросте і т.д. Якщо в результаті збурювання $n = n_0 - \Delta n$, то $M < M_{cm}$ і n буде безупинно зменшуватися. Тому робота в точці $M = M_{cm}$ і $n = n_0$ неможлива. У цьому випадку

$$\frac{dM}{dn} > \frac{dM_{cm}}{dn},$$

що є ознакою нестійкості роботи двигуна.

Виникнення нестійкості найбільш ймовірно при такій механічній характеристиці двигуна $M=f(n)$ або $n=f(M)$, коли M і n збільшуються або зменшуються одночасно (рис. 76.6, б).

СРС: зміна напрямку обертання якоря ДПС.

Лекція №7

Тема: «Паралельна робота двигунів постійного струму на спільний вал»

Схема електропривода із синхронними двигунами приведена на рис. 5.26.

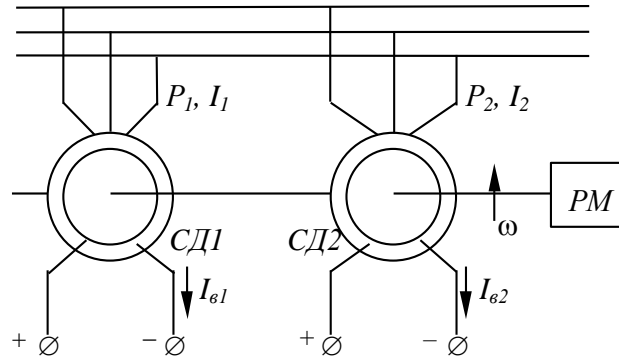


Рис. 5.26. Схема синхронного дводвигунного ЕП

Тому що вали двигунів жорстко зв'язані, то сумарний момент, що розвивається приводом, дорівнює сумі моментів двигунів:

$$M_{\Sigma} = M_1 + M_2 .$$

При цьому, якщо СД, що входять у систему дводвигунного ЕП, мають однакові паспортні дані і струми збудження $I_{e1} = I_{e2}$, то моменти їх будуть також однакові, а швидкість обертання приводу

$$\omega_{01} = \omega_{02} = \omega_0 = 2\pi f/p .$$

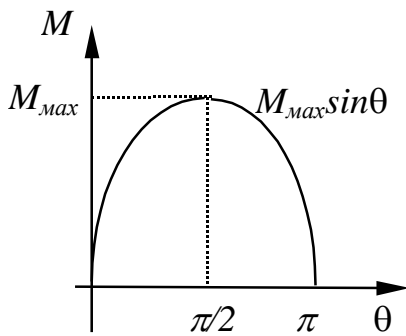


Рис. 5.27. Кутова характеристика синхронного двигуна

Сказане вище справедливо тільки за умови відсутності неузгодженості в кутових положеннях роторів машин.

Скориставшись кутовою характеристикою синхронного двигуна, що відбиває залежність моменту машини від кута вибігу ротора θ , приведеної на рис. 5.27, і її аналітичним виразом

$$M = k E U \sin\theta, \quad (5.29)$$

де $k = 3/ \omega_0 X_c$; X_c - індуктивний опір фази статора; ω_0 - синхронна швидкість СД, встановимо особливості роботи і розподіли навантажень у синхронному дводвигунному приводі.

Розподіл навантажень у дводвигунному ЕП при однакових струмах збудження

Моменти, що розвиваються двигунами, пропорційні струмам збудження обмоток роторів і для двох конструктивно однакових машин з однаковими струмами збудження рівні (рис. 5.28).

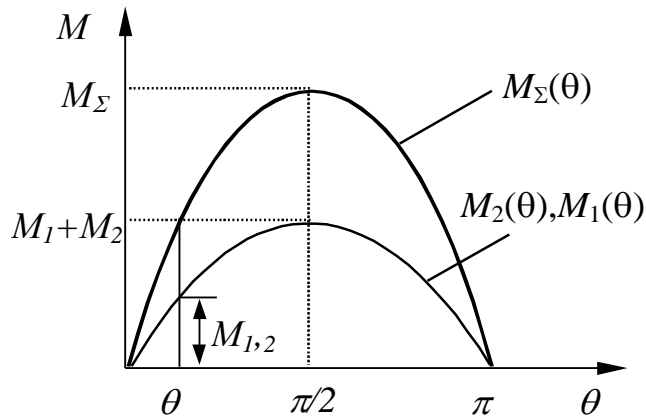


Рис. 5.28. Розподіл навантаження між двигунами для випадку, коли струми збудження однакові

Розподіл навантаження між двигунами при нерівності струмів збудження

Якщо струми збудження двигунів відрізняються ($I_{e1} \neq I_{e2}$), то характеристики двигунів і приводу будуть мати вигляд показаний на рис. 5.29.

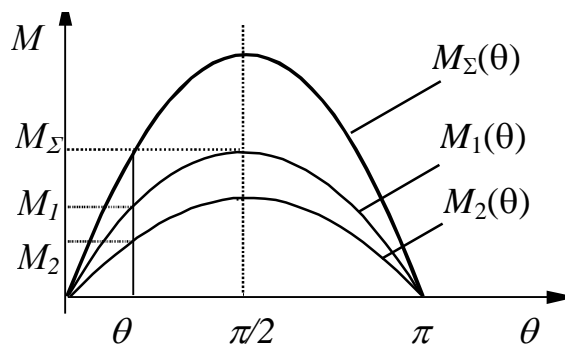


Рис. 5.29. Розподіл навантаження між двигунами при нерівності струмів збудження

З характеристик очевидно, що при відсутності неузгодженості в положенні роторів двигун із великим по величині струмом збудження розвиває більший момент ($M_1 > M_2$). При цьому сумарний момент приводу для тих самих кутів вибігу ротора декілька менше, ніж у випадку, рівності токів порушення. Це є істотним недоліком і потребує вживання заходів по його усуненню (вирівнювання навантажень) ще на стадії проектування дводвигунного синхронного ЕП.

Розподіл навантаження між двигунами при наявності кутової неузгодженості роторів

При наявності кутової неузгодженості роторів навантаження між двигунами розподіляється нерівномірно.

Тому що вали жорстко пов'язані, те
 при $\Delta\theta = 0$ - $M_\Sigma = M_1 + M_2 = 2M_1$
 при $\Delta\theta = \pi$ - $M_\Sigma = 0$,

тобто зі збільшенням кута неузгодженості навантаження не тільки розподіляється нерівномірно, але при визначених $\Delta\theta$ знижується момент, що розвивається електроприводом. Так, якщо є деякий кут неузгодженості $\Delta\theta$, те, як очевидно з графіка (рис. 5.30), може виявитися, що моменти на валах машин явно неоднакові.

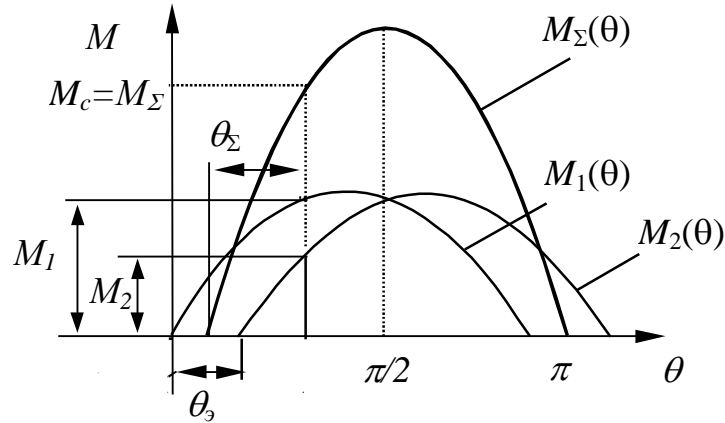


Рис. 5.30. Розподіл навантаження між двигунами при кутовій неузгодженості роторів

Як очевидно з рис.5.31, при визначених значеннях кута неузгодженості $\Delta\theta$ одна з машин може виявитися в генераторному режимі.

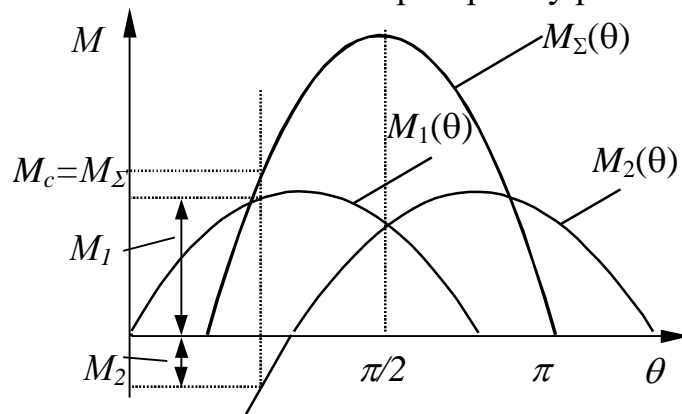


Рис. 5.31. Розподіл навантаження між двигунами при великих кутах неузгодженості роторів

Таким чином, для найбільше якісної роботи приводу неузгодженість між положеннями роторів машин повинно бути рівно нулю, чого, як правило, домагаються при налагодженні приводу.

Вирівнювання навантажень у синхронному дводвигунному ЕП можливо в замкнутих системах автоматичного регулювання (рис. 5.32).

У якості сигналу про величину навантаження двигуна використовують сигнал із датчиків активної потужності (**P1** і **P2**), встановлюваних у колах статорів машин. Процес вирівнювання здійснюють через кола збудження СД, впливаючи на їхні магнітні потоки. Для недовантаженого двигуна сигнал зворотнього зв'язку викликає збільшення струму збудження. Одночасно в двигуні, що має більший момент, струм збудження знижується.

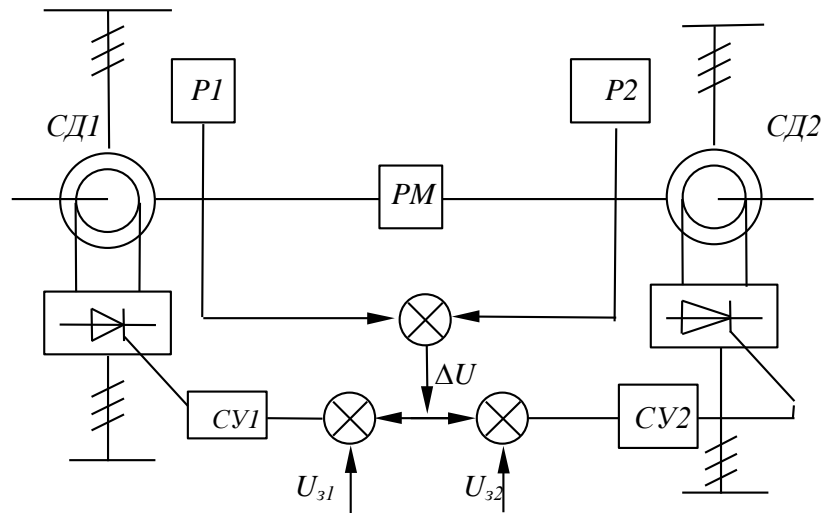


Рис. 5.32. Вирівнювання навантажень у синхронному дводвигунному ЕП

Можливі варіанти систем вирівнювання, із контролем активних складових статорних струмів. На відміну від розглянутого раніше варіанта, тут не можливе перевантаження одного з двигунів по струму статора.

Лекція №8

Тема: «Вентильні та універсальні колекторні двигуни»

Вентильний двигун

Принцип частотного регулювання із самосинхронізацією полягає в тому, що керування перетворювачем частоти здійснюється від системи датчиків положення ротора, унаслідок чого напруга подається на кожну фазу двигуна при кутах навантаження $\theta < 90^\circ$. При такому регулюванні автоматично забезпечуються умови усталеної роботи двигуна і його перевантажувальна здатність визначається тільки перевантажувальною здатністю перетворювача частоти.

Синхронні двигуни, регульовані шляхом зміни частоти із самосинхронізацією, називають вентильними двигунами; іноді їх називають безколекторними двигунами постійного струму. Однак перша назва є правильнішою, тому що ці двигуни можуть живитися від мережі як постійного, так і змінного струму.

При живленні вентильного двигуна від мережі постійного струму в перетворювачі частоти повинні застосовуватися тиристри з вузлами примусової комутації. У двигунах малої потужності припустиме застосування транзисторів. При живленні вентильного двигуна від тиристорного перетворювача частоти, заснованого на використанні автономного інвертора напруги (рис. 56.2, а), перетворювач підключений до джерела постійного струму і формує трифазну напругу частоти, що змінюється, що подається на фази А, В і С обмотки якоря двигуна. До кожної фази можна підвести позитивну (тиристорами $T1, T2$ і $T3$) і негативну (тиристорами $T4, T5$ і $T6$) напруги.

Якщо спочатку пропускати струм через фази А і В (відкриті тиристри $T1$ і $T5$), потім — через В і С (відкриті тиристри $T2$ і $T6$), потім – через фази С і А (відкриті тиристри $T3$ і $T4$) і інші в зазначеній послідовності, то в машині створюється обертове магнітне поле. При зміні частоти переключення тиристорів змінюється частота змінної напруги, що подається на фази обмотки якоря, а отже, і частота обертання ротора. Для замикання реактивного складового струму якоря в перетворювачі є діоди Д1–Д6, включені паралельно тиристорам, але в зворотному напрямку.

Комутація струму в тиристорному перетворювачі (переключення струму з однієї фази на іншу) вимагає застосування в ньому спеціальних комутуючих вузлів, тому що тиристор є не цілком керованим приладом. Для закриття тиристора, включеного в коло постійного струму, необхідно короткочасно подати на нього зворотну напругу визначеного значення. У розглянутому перетворювачі застосовані два вузли примусової (штучної) комутації - по одному для всіх тиристорів, що приєднуються відповідно до позитивного і негативного полюсів джерела постійного струму. Кожен вузол складається з контуру $L-C$ і допоміжних тиристорів.

Закриття тиристорів $T1$, $T2$ і $T3$, приєднаних до позитивного полюса, здійснюється контуром $L1—C1$. При відкритті допоміжного тиристора $T11$ конденсатор $C1$ заряджається через індуктивність $L1$ до подвійної напруги мережі і замикає тиристор $T11$. Потім відкриваються допоміжні тиристори $T12$, $T22$ або $T23$ і подають на тиристори $T1$, $T2$ або $T3$ зворотну (позитивну) напругу. При цьому відповідний тиристор запирається, а конденсатор $C1$ розряджається через навантаження. Аналогічно запираються тиристори $T4$, $T5$ і $T6$. Спочатку відкривається допоміжний тиристор $T12$ і через індуктивність $L2$ заряджає конденсатор $C2$. Потім відкриваються допоміжні тиристори $T24$, $T25$ або $T26$ і приєднуються аноди тиристорів $T4$, $T5$ або $T6$ до негативної обкладки конденсатора $C2$.

Напруга, подавана до якоря вентиляного двигуна від перетворювача частоти, є, так само як і при частотному регулюванні асинхронного двигуна, *несинусоїдальною*. Тому, щоб зменшити шкідливі впливи вищих гармонійні напруги, струму і потоку, двигун необхідно постачити могутньою демпферною обмоткою з малими активними й індуктивними опорами. У цьому випадку вищі гармонійні роблять на синхронний двигун порівняно невеликий вплив. При наявності такої обмотки режими роботи вентиляного двигуна можна розглядати з врахуванням тільки перших гармонік струму і напруги.

Режим роботи вентиляного двигуна залежить не тільки від сили струму збудження і співвідношення між напругою і частотою. Велике значення мають також моменти подачі напруги на фази двигуна і параметри перетворювача частоти.

У перетворювачі частоти, заснованому на використанні інвертора напруги (рис. 5б.2, *a*), значення вихідної напруги майже не залежить від режиму роботи двигуна, тому регулювання необхідно вести при сталості кута Θ . Це можна здійснити, визначаючи за допомогою якого-небудь датчика положення осі полюсів ротора (а отже, і напрямок вектора E_0) і регулюючи подачу керуючих імпульсів на тиристори перетворювача так, щоб вихідна напруга перетворювача подавалася на відповідні фази двигуна з деяким кутом випередження $\beta_0 \approx \theta$ (кут регулювання) відносно положення вектора E_0 для даної фази. Можна також визначати вісь результуючого магнітного потоку і подавати живлення на відповідну фазу з необхідним кутом β_0 . Обидва методи мають свої переваги і недоліки, обумовлені в основному особливостями застосовуваних датчиків і керуючих пристроїв.

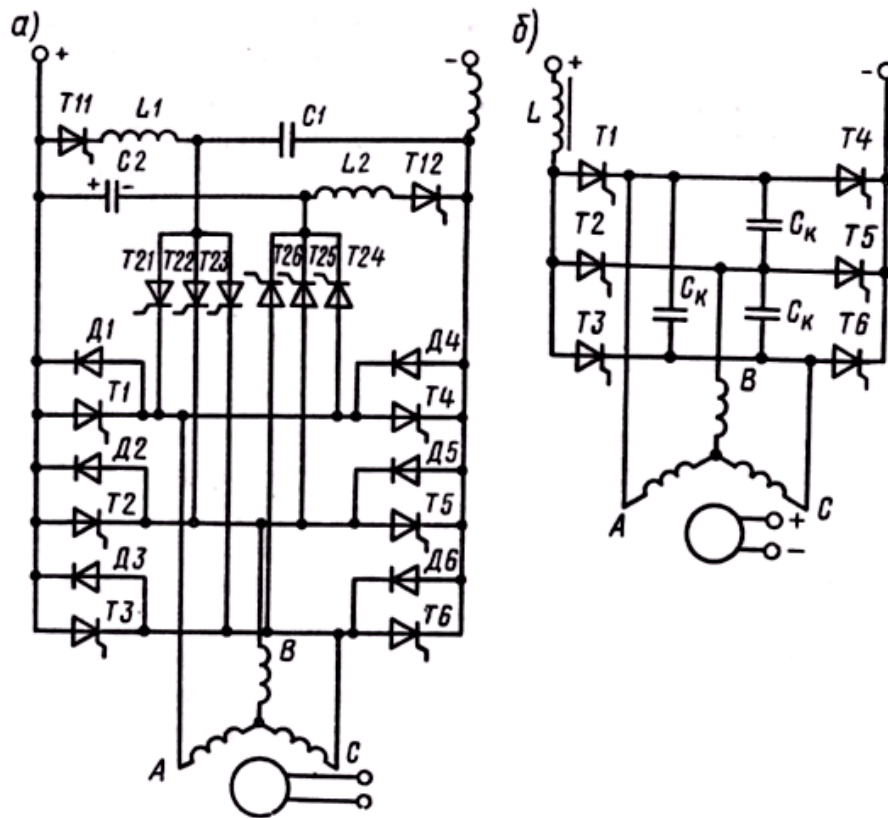


Рис. 56.2. Схеми живлення вентильного двигуна від тиристорного перетворювача частоти з інвертором напруги (а) і струму (б)

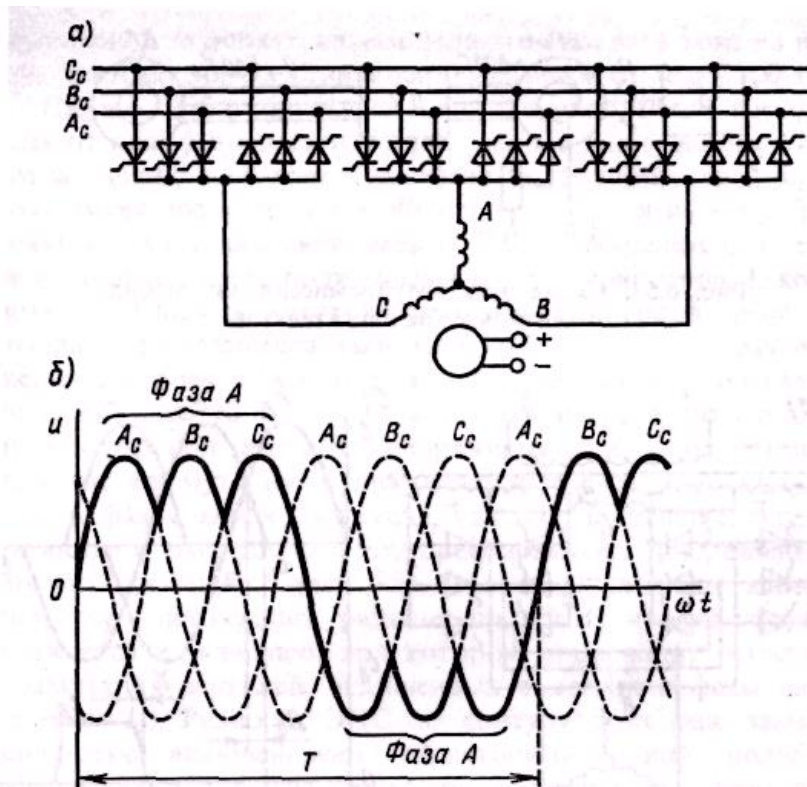


Рис. 56.3. Схема живлення вентильного двигуна від перетворювача частоти з безпосереднім зв'язком (а) і форма кривій вихідної напруги перетворювача (б)

При необхідності живлення вентильного двигуна від мережі трифазного струму можна застосовувати *перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком*, тобто без проміжного випрямляча (рис. 56.3, а). Перевагою таких перетворювачів є відсутність вузлів примусової комутації, тому що тиристори перестають проводити струм після зміни напрямку напруги у відповідній фазі A_c , B_c , C_c джерела трифазного струму. Однак досить гарне наближення форми вихідної напруги до синусоїди і чітке припинення струму (у необхідний момент) можна одержати тільки в тому випадку, якщо джерело трифазного струму має частоту в 2-3 рази більшу, ніж вихідна частота перетворювача (рис. 56.3, б).

Універсальний колекторний двигун працює як від мережі постійного струму, так і від мережі змінного струму.

Можливість роботи колекторного двигуна послідовного збудження від мережі змінного струму пояснюється тим, що при зміні полярності підведеної напруги змінюються напрямки струмів в обмотці якоря і в обмотці збудження. При цьому зміна полярності полюсів статора практично співпадає з зміною напрямку струму в обмотці якоря. В результаті напрямок електромагнітного обертового моменту не змінюється:

$$M = c_m I_a \Phi = c_m (-I_a)(-\Phi). \quad (1.2.35)$$

В якості універсального використовують двигун послідовного збудження, у якого струм якоря i і струмом збудження, що забезпечує майже одночасну зміну напрямку струму в обмотці якоря I_a і магнітного потоку збудження Φ при переході від позитивного напівперіода напруги мережі до негативного.

Якщо двигун ввімкнуті до мережі синусоїдального струму, то струм якоря i_a і магнітний потік Φ будуть змінюватись за синусоїдальним законом:

$$i = I_{\text{max}} \sin \omega t; \quad \Phi = \Phi_{\text{max}} \sin(\omega t - \delta), \quad (1.2.36)$$

де δ – кут зсуву фаз між струмом збудження і магнітним потоком, обумовлений магнітними втратами в двигуні.

Графік результуючого моменту $M = f(t)$ (рис.1.2.10,в) отриманий додаванням графіків, його складових:

$$M = M_{\text{пост}} + (-M_{\text{зм}}). \quad (1.2.38)$$

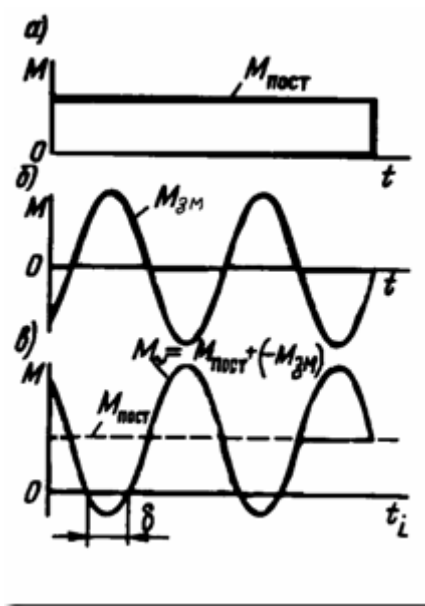


Рис.1.2.11.Графіки електромагнітного моменту і його складових при роботі колекторного двигуна від мережі змінного струму

Таким чином, результуючий електромагнітний момент при роботі двигуна від мережі змінного струму пульсує. Невеликі ділянки графіку $M = f(t)$ з негативним гальмуючим значенням моменту обумовлені фазовим зсувом δ між магнітним потоком і струмом в обмотці збудження. Чим менші магнітні втрати в магнітній системі двигуна, тим менший негативний момент.

Пульсації електромагнітного моменту практично не порушують роботу

двигуна. Пояснюється це тим, що при значній частоті пульсацій електромагнітного моменту ($f_m = 2f_1$) і більшому моменті інерції якоря обертання останнього є рівномірним.

При роботі універсального колекторного двигуна від мережі змінного струму перемагнічуванню підлягає вся магнітна система двигуна, включаючи станину і полюси. Це приводить до збільшення магнітних втрат, для зменшення яких станину і полюса статора доводиться робити шихтованими (див. рис.1.1.6,б).

Коефіцієнт корисної дії універсального двигуна при його роботі від мережі змінного струму більш низький, ніж при його роботі від мережі постійного струму. Другий недолік універсального двигуна — важкі умови комутації, що викликають інтенсивне іскріння на колекторі при вмиканні двигуна в мережу змінного струму. Цей недолік пояснюється наявністю трансформаторного зв'язку між обмотками збудження і якоря, що веде до наведення в комутуючих секціях трансформаторної ЕРС, яка погіршує процес комутації в двигуні.

Універсальні колекторні двигуни проектують таким чином, щоб отримати приблизно однакові частоти обертання при номінальному навантаженні як при живленні від мережі постійного, так і змінного струму.

Досягається це тим, що обмотка збудження двигуна виконана з розгалудженнями: при роботі двигуна від мережі постійного струму обмотка використовується повністю, а при роботі від мережі змінного струму — частково (рис.1.2.12,б). Але при навантаженнях, що відрізняються від номінальних, характеристики двигуна при його роботі від мережі постійного і змінного струму не співпадають через вплив індуктивних опорів обмоток якоря і збудження при живленні від мережі змінного струму. На рис.1.2.12,б приведені робочі характеристики універсального колекторного двигуна (пунктирними лініями при роботі двигуна від мережі змінного струму і суцільними — при роботі від мережі постійного струму). При однакових навантаженнях струм в обмотці якоря двигуна при його роботі від мережі змінного струму більший, ніж при роботі від мережі постійного струму, що пояснюється наявністю реактивної складової струму.

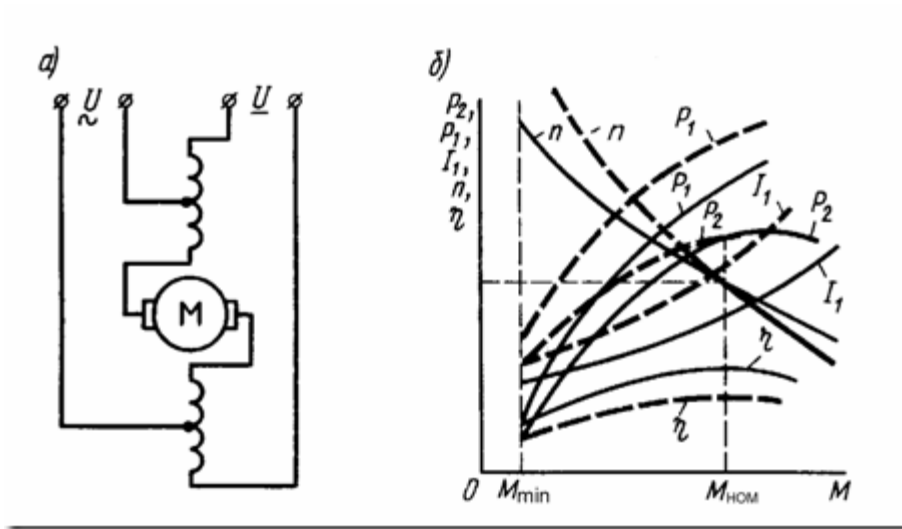


Рис.1.2.12. Принципова схема (а) і робочі характеристики (б)

універсального колекторного двигуна

Частота обертання універсальних двигунів регулюється так, як і в двигунах постійного струму послідовного збудження.

Наявність щітковоколекторного вузла являється причиною ряду недоліків універсальних колекторних двигунів, особливо при їх роботі на змінному струмі. Але ці двигуни в порівнянні з асинхронними і синхронними при частоті напруги живлення $f_1 = 50$ Гц дозволяють отримати частоту обертання до 10000 об/хв і більше.