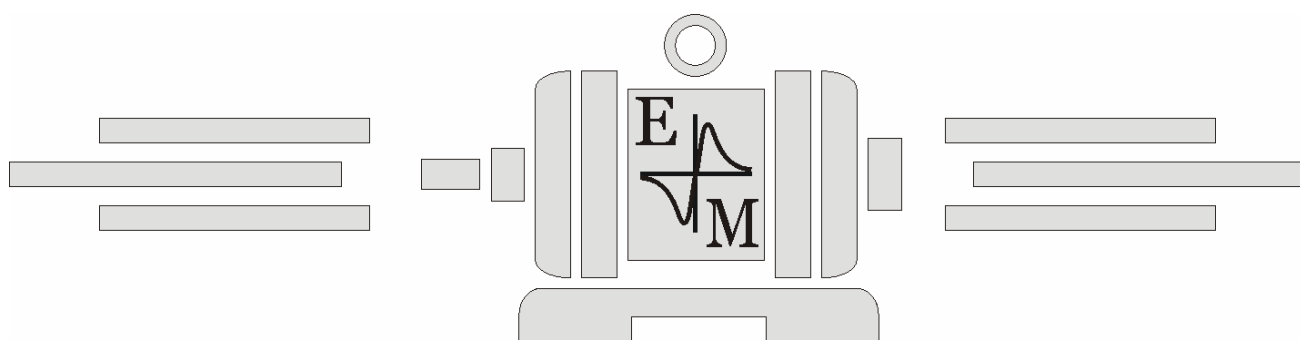


Г.Г.ПІВНЯК, Ф.П.ШКРАБЕЦЬ, В.П.ДОВГАНЬ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ



Г.Г.ПІВНЯК, Ф.П.ШКРАБЕЦЬ, В.П.ДОВГАНЬ

ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ

Допущено Міністерством освіти і науки
України як навчальний посібник
для студентів спеціальностей з
напрямку "ЕЛЕКТРОТЕХНІКА"

*Дніпропетровськ,
Національний гірничий
університет,
2003*

Вступ

В.1. Електричні машини, їх призначення та класифікація

В сьогочасній техніці при виробництві і використанні електричної енергії виникає необхідність в перетворенні механічної енергії в електричну, електричної енергії в механічну, а також в перетворенні електричної енергії змінного струму з одними параметрами в електричну енергію змінного струму з другими параметрами або електричну енергію одного роду струму в електричну енергію другого роду струму. Таке перетворення виконується при допомозі електричних машин.

Електрична машина як перетворювач енергії являється одним із основних елементів кожної установки. Вона наводить широке використання на електричних станціях, в промислових установках, на транспорті, в авіації, системах автоматичного управління та регулювання, провідному зв'язку та в ряді інших випадків.

При виробництві електроенергії на електричних станціях енергію палива, води або вітру перетворюють при допомозі паро-, тепло-, гідро- або вітро двигунів в механічну енергію обертання, а останню – в енергію електричного струму. На атомних електричних станціях внутрішньоядерну енергію за допомогою теплової також перетворюється в механічну, а потім в електричну енергію. В деяких випадках, наприклад в магнітогідродинамічних установках, частина теплової енергії безпосередньо перетворюється в електричну.

Перетворення механічної енергії в електричну виконується при допомозі електричних машин, що називається *генераторами* електричного струму.

Використання електричної енергії в багатьох випадках зв'язано з перетворенням її в механічну енергію обертального або зворотно-поступального руху (привід різного роду машин та механізмів). Це перетворення виконується при допомозі електричних машин, що називаються *електричними двигунами* або *електродвигунами*.

В сучасних електричних установках раціональне використання електричної енергії часто буває зв'язане не тільки з її перетворенням в механічну енергію, але й з необхідністю перетворення одного роду електричного струму в другий, наприклад змінного струму низької напруги в струм високої напруги, змінного струму – в постійний, трифазного – в двофазний та ін. Такі перетворення виконуються при допомозі електричних машин, що називаються *перетворювачами електричного струму* або *електромашинними перетворювачами*.

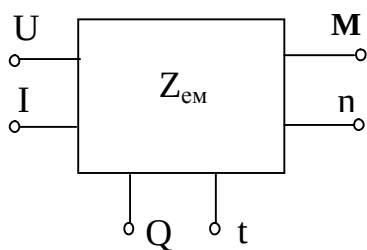
Особливо широке використання в сучасній техніці одержали перетворювачі змінного струму однієї напруги в змінний струм другої напруги тієї ж частоти, що називаються *трансформаторами*.

В залежності від роду струму електричної установки електричні машини (генератори, двигуни, перетворювачі) можуть бути розраховані для роботи на змінному або постійному струмі. В відповідності до цього вони діляться на *машини змінного і машини постійного струму*.

Задачею курсу електричних машин є вивчення принципів роботи, будови та властивостей різного виду електричних машин, методів їх розрахунку, а також розгляд основних форм їх конструктивного виконання.

В.2. Перетворення енергії в електричних машинах

Електромеханічне перетворення енергії супроводжується обов'язковим перетворенням електричної або механічної енергії в теплову. Перетворення енергії в тепло в електричних машинах прийнято називати втратами, так як теплова енергія при експлуатації електричних машин, як правило, не використовується в практичних цілях. В електричних машинах великої потужності в тепло перетворюється одиниці або навіть долі відсотків енергії, що підводиться до електричних виводів або валу машини. В машинах малої потужності в тепло може перетворюватись велика частина енергії, що підводиться до машини, тому ККД машини малої потужності невеликий.



Для загального уявлення про роботу машини як перетворювача енергії її можна представити у вигляді шестиполюсника (рис. В.1), у якого є два електричних виводи U, I , два механічні виводи M, n і два теплових Q, t . Електричні виводи зв'язані з електричною потужністю і характеризуються напругою U і струмом I ; механічні зв'язані з механічною потужністю і характеризуються моментом на валу машини M та частотою її обертання n ; теплові виводи зв'язані з втратами енергії, що виникають в процесі перетворення, і характеризуються теплом Q , що виділяється при цьому, та температурою деталей електричної машини t . Внутрішній опір машини в самому загальному випадку можна охарактеризувати опором Z_{em} .

Робота електричної машини може відбуватися в двох основних режимах: сталому і динамічному або ж перехідному режимі. В **сталому** режимі всі вхідні величини на виводах шестиполюсника, що представляє електричну, і опір самої машини незмінні в часі. В **динамічному** режимі обов'язково змінюється одна, декілька або всі вхідні величини і параметри машини. В зв'язку з цим аналіз роботи машини в динамічних режимах значно складніший ніж в сталих.

При роботі електричної машини **генератором** механічна енергія підводиться до вала, тобто до механічних виводів M, n (рис. В.1), а електрична енергія знімається з виводів U, I . При роботі **двигуном** енергія подається на електричні виводи, а знімається з механічних. Крім режиму двигуна і генератора електричні машини можуть працювати також в гальмовім і трансформаторнім режимах.

Трансформаторний режим характерний для асинхронних машин з фазним ротором. Він виникає при загальмованому (нерухомому) роторі і підключеній обмотці статора до мережі. Перетворення електричної енергії в механічну не відбувається, так як частота обертання ротора дорівнює нулю. Електрична енергія, що підводиться до обмотки статора, перетворюється в електричну енергію, яка знімається з роторної обмотки. В цьому випадку механічні виводи шестиполюсника, що розглядається, повинні бути замінені на електричні.

Спеціально розраховані електричні машини можуть довгий час працювати в трансформаторному режимі. При різних положеннях фазного ротора такої машини осі фаз обмотки ротора міняють своє положення відносно обмотки статора, що визиває зміну амплітуди і фази напруги на обмотці ротора. Цей принцип регулювання використовується в індукційних регуляторах та фазорегуляторах, які одержали розповсюдження в різних схемах регулювання, наприклад, в дослідних установках великої потужності.

В **режимі гальма** напрямок обертання ротора протилежний напрямку обертання поля. При цьому машина отримує як електричну енергію зі сторони електричних виводів, так і механічну енергію зі сторони механічних виводів шестиполюсника (рис. В.1). Вся енергія, що споживається, перетворюється в теплову і витрачається всередині машини на нагрів його деталей, а також розсіюється в навколишній простір. Режими гальмування – самі важкі з точки зору нагріву деталей електричної машини, через це більшість електричних машин розраховується лише на короточасну роботу в режимах гальма.

Розрізняють два види електричного гальмування: динамічне та рекупера- тивне. При **динамічному** гальмуванні, що використовується, наприклад, в дви- гунах постійного струму, якір машини відключається від мережі і включається на резистор при включеній обмотці збудження. Машина працює як генератор постійного струму, споживаючи механічну енергію обертових частин, генеру- ючи при цьому електричну енергію, яка витрачається на нагрів резистора.

При **рекуперативному** гальмуванні двигун також переходить в генерато- рний режим і енергія, що генерується, віддається в мережу. Рекуперативне гальмування характерне для асинхронних двигунів, наприклад, для двигунів при- вodu ліфтів, в яких шляхом переключення під час роботи машини статорної об- мотки на більше число полюсів зменшується частота обертання поля. Ротор по інерції деякий час продовжує обертатись з колишньою частотою, більшою, чим частота обертання поля після переключення числа полюсів обмотки. В цей час машина працює в генераторнім режимі і віддає електричну енергію в мережу, споживаючи кінетичну енергію рухомих частин приводного механізму. При зменшенні частоти обертання ротора до частоти нижчої, чим синхронна, маши- на знову переходить в режим двигуна і працює з частотою обертання, що від- повідає новому числу полюсів обмотки статора.

Для синхронних машин важливим являється режим синхронного компен- сатора, при якому активна електрична потужність, що отримується із мережі, витрачається тільки на втрати всередині машини, а синхронна машина генерує або використовує із мережі реактивну потужність. В режимі компенсатора мо- жуть працювати всі синхронні машини. Для практичного використання вигото- вляють спеціальний тип машин – синхронні компенсатори, в яких генерація чи використання реактивної потужності відбувається з найменшими втратами ак- тивної енергії.

По характеру навантаження і частоті обертання ротора розрізняють також режими навантаження, холостого ходу і короткого замикання.

При **холостому ході** навантаження на валу в режимі двигуна або елект- рична потужність на виводах в генераторному режимі дорівнює нулю. В режи-

мі, близькому до холостого ходу, працюють багато електричних машин, в тому числі і цілий клас індикаторних машин, до яких відносяться тахогенератори, обертові трансформатори, сельсини та ін.

В режимі **короткого замикання** генераторів опір навантаження дорівнює нулю, а в режимі короткого замикання двигунів частота їх обертання дорівнює нулю. Режим короткого замикання характерний для початкового моменту пуску двигунів із нерухомого стану. При включенні обмотки статора на номінальну напругу струм двигуна досягає великих значень. Через це довготривалий режим короткого замикання небезпечний для машин, не розрахованих на роботу в таких умовах. Коротке замикання двигунів і генераторів, що проводиться при пониженій напрузі, використовується при дослідженнях електричних машин для визначення ряду їх параметрів.

Трансформатори

Трансформатори широко застосовуються в системах передачі й розподілу електроенергії. Відомо, що передача електроенергії на далекі відстані здійснюється при високій напрузі (до 500 кВ та більше), завдяки чому значно зменшуються електричні втрати в лінії електропередачі. Одержати таку високу напругу в генераторі неможливо, тому електроенергія після генератора подається на підвищувальний трансформатор, у якому напруга збільшується до необхідного значення. Ця напруга повинна бути тим вища, чим більша довжина лінії електропередачі та чим більша потужність, яка передається по цій лінії. Наприклад, при передачі електроенергії потужністю 10^6 кВт на відстань 1000 км необхідна напруга 500 кВ. У місцях розподілу електроенергії між споживачами встановлюють понижуючі трансформатори, що знижують напругу до необхідного значення. І нарешті, у місцях споживання електроенергії напругу ще раз знижують за допомогою трансформаторів до 220, 380 або 660 В. При такій напрузі електроенергія подається безпосередньо споживачам – на робочі місця підприємств та в житлові приміщення. Таким чином, електроенергія змінного струму в процесі передачі від електростанції до споживачів піддається три-, а іноді і чотириразовому трансформуванню. Крім цього основного застосування трансформатори використовуються в різних електроустановках (нагрівальних, зварювальних і т.п.), пристроях автоматики, зв'язку й т.д.

Глава I. Робочий процес трансформатора

1.1 Принцип роботи трансформатора, основні визначення

Трансформатором називається статичний пристрій, що має дві або декілька індуктивно зв'язаних обмотки, та призначений для перетворення однієї чи декількох систем змінного струму з одними параметрами (струм, напруга й ін.) в іншу або декілька інших систем змінного струму з іншими параметрами.

З цього визначення випливає, що робота трансформатора основана на електромагнітній взаємодії двох або декількох нерухомих у просторі контурів.

Розглянемо, наприклад, два нерухомих у просторі контури (рис. 1.1), з яких перший підключений до джерела напруги, а інший, в загальному випадку, може бути розімкнутий, замкнений на опір або замкнений накоротко.

Якщо до контура I прикладена змінна напруга u_1 , то в цьому контурі буде протікати струм i_1 . Цей струм створює пульсуюче в часі магнітне поле. Це поле індукуює у контурі II ЕРС $\mathcal{E}$, оскільки цей контур замкнений, по ньому буде протікати струм i_2 .

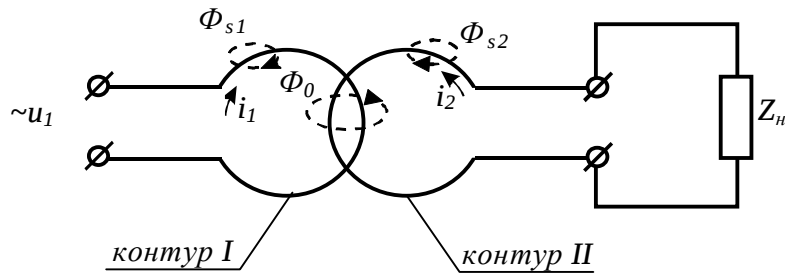


Рис. 1.1 Електрична схема найпростішого трансформатора

Струми i_1 і i_2 спільно утворюють пульсуюче в часі магнітне поле, яке доцільно представити у вигляді наступних магнітних потоків:

1) потоку Φ_0 – який в однаковій мірі зчеплений з контурами I і II.

Цей потік індукє відповідно в контурі I ЕРС e_1 і в контурі II ЕРС e_2 .

2) потоку Φ_{s1} – магнітні силові лінії якого зчеплені тільки з контуром I.

Цей потік індукє в контурі I ЕРС розсіювання e_{s1} .

3) потоку Φ_{s2} – магнітні силові лінії якого зчеплені тільки з контуром II.

Цей потік індукє в контурі II ЕРС e_{s2} .

Представлення магнітного поля у вигляді окремих потоків у розглянутому вище найпростішому трансформаторі умовно, оскільки фактично існує єдине магнітне поле. Однак, розглянутий вище підхід, тобто поділ поля на окремі потоки, дозволяє більш наочно розглянути фізичні процеси, що відбуваються в трансформаторі.

Перетворення однієї системи змінного струму і напруги в іншу систему в трансформаторі відбувається за рахунок ЕРС e_1 і e_2 , тому в трансформаторі доцільно підсилювати магнітний потік Φ_0 , який називається **основним магнітним потоком**, при одночасному ослабленні (зменшенні) Φ_{s1} і Φ_{s2} , які називаються **потоками розсіювання**.

Ця обставина призвела до того, що всі сучасні трансформатори головним чином виконуються зі сталевим сердечником.

Схематично це виглядає у такий спосіб (рис.1.2).

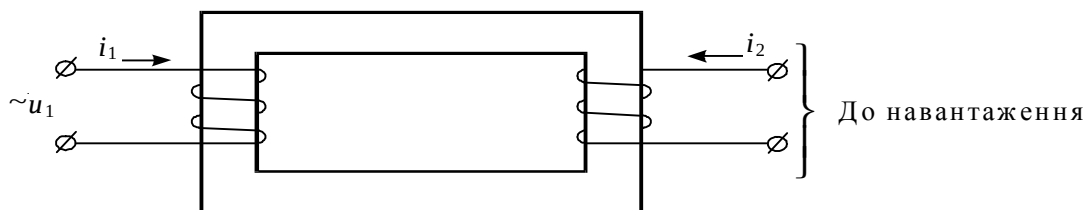


Рис. 1.2 Електромагнітна схема трансформатора

Область застосування трансформаторів надзвичайно широка. Цим пояснюється різноманітність їхньої конструкції.

По числу фаз трансформатори поділяють на однофазні та багатофазні (трифазні).

По числу фазних обмоток розрізняють: двохобмоткові та багатообмоткові.

Найпростішим трансформатором є однофазний двохобмотковий трансформатор (рис. 1.2).

В трансформаторі розрізняють одну або кілька первинних обмоток та одну або кілька вторинних обмоток.

До первинних обмоток підводиться енергія, вторинні обмотки підключають до навантаження.

По співвідношенню первинних та вторинних напруг розрізняють:

- $U_1 > U_2$ – знижувальний трансформатор;
- $U_1 < U_2$ – підвищувальний трансформатор.

В двохобмотковому трансформаторі розрізняють обмотку вищої напруги (ВН) та обмотку нижчої напруги (НН). В триобмотковому трансформаторі розрізняють також обмотку середньої напруги (СН).

По способу охолодження трансформатори поділяються на:

- сухі (з повітряним охолодженням);
- масляні (поміщають в бак із трансформаторним маслом).

1.2 Типи трансформаторів, номінальні дані

Як указувалося раніше, область застосування трансформаторів надзвичайно широка. Цим пояснюється різноманітність їхньої конструкції.

Якщо взяти за основу спільність конструктивного виконання, то можна виділити наступні типи трансформаторів:

- 1) силові трансформатори – (для перетворення електричної енергії в енергосистемах та живлення потужних споживачів);
- 2) силові трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням;
- 3) силові трансформатори спеціального призначення (зварювальні, пічні та ін.);
- 4) трансформатори для статичних перетворювачів;
- 5) випробувальні трансформатори (для одержання високих та надвисоких напруг);
- 6) вимірювальні трансформатори (трансформатори струму та трансформатори напруги);
- 7) трансформатори радіотехнічних пристроїв та пристроїв автоматики.

В дійсному курсі основна увага приділяється вивченню силових трансформаторів.

Номінальний режим роботи трансформаторів характеризується наступними номінальними даними:

Номінальна потужність S_n (кВА) – повна потужність трансформатора.

Номінальна первинна напруга U_{1n} (кВ) – напруга, що підводиться до первинної обмотки.

Номінальна вторинна напруга U_{2n} (кВ) – напруга на затискачах вторин-

ної обмотки в режимі холостого ходу (х.х.) трансформатора (коли вторинна обмотка відключена від навантаження) при номінальній підведеній напрузі $U_{1н}$.

Первинні та вторинні напруги силових трансформаторів стандартизовані. Цей ряд наступний:

Первинні обм.	кВ	0,22	0,38	0,66	3	6	10	20	35
Вторинні обм.	кВ	0,23	0,4	0,69	3,15	6,3	10,5	22	38,5

Номінальний первинний і вторинний струми, відповідно

$I_{1н}$ і $I_{2н}$ [А] [кА] –

ці струми визначаються значенням S_n і номінальною напругою $U_{1н}$ і $U_{2н}$

$$I_{1н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{1н}}; \quad I_{2н} = \frac{S_n}{\sqrt{3}U_{2н}}. \quad (1.1)$$

Ці залежності дані для трифазних трансформаторів, причому враховано, що як U_n , так I_n представлені лінійними (а не фазними) величинами.

Номінальні дані трансформатора вказуються в паспорті трансформатора, який кріпиться на самому доступному місці трансформатора.

1.3 Будова та основні конструктивні елементи силових трансформаторів

Сучасні силові трансформатори у конструктивному відношенні можна розділити на ряд систем.

- Розрізняють:
- 1) магнітну систему;
 - 2) систему обмоток;
 - 3) систему охолодження;
 - 4) допоміжну систему, в яку включають пристрій регулювання напруги, а також контрольні та захисні пристрої.

В сухих трансформаторах допоміжна система, як правило, відсутня, тобто відсутні контрольні захисні пристрої, а систему охолодження не можна виділити як окремий конструктивний елемент.

Масляні трансформатори, як правило, містять усі перераховані вище системи.

Магнітна система (магнітопровід) служить для локалізації магнітного потоку в трансформаторі. Більшість типів магнітних систем можна чітко розділити на окремі конструктивні елементи, тобто розрізняють: **стержні** – це елементи магнітної системи, на яких розташовуються обмотки; **ярма** – частина магнітної системи без обмоток, що забезпечують замкнутість магнітопроводу.

По взаємному розташуванню стержнів і ярм розрізняють **плоскі** та **про-**

сторові магнітні системи.

Більшість сучасних силових трансформаторів, що серійно випускаються вітчизняною промисловістю, мають плоску магнітну систему.

Силові трансформатори по конструкції плоскої магнітної системи поділяються на наступні типи:

- 1) стержневі трансформатори;
- 2) броньові трансформатори;
- 3) бронестержньові трансформатори.

Схематично ці магнітні системи представлені на рис. 1.3.

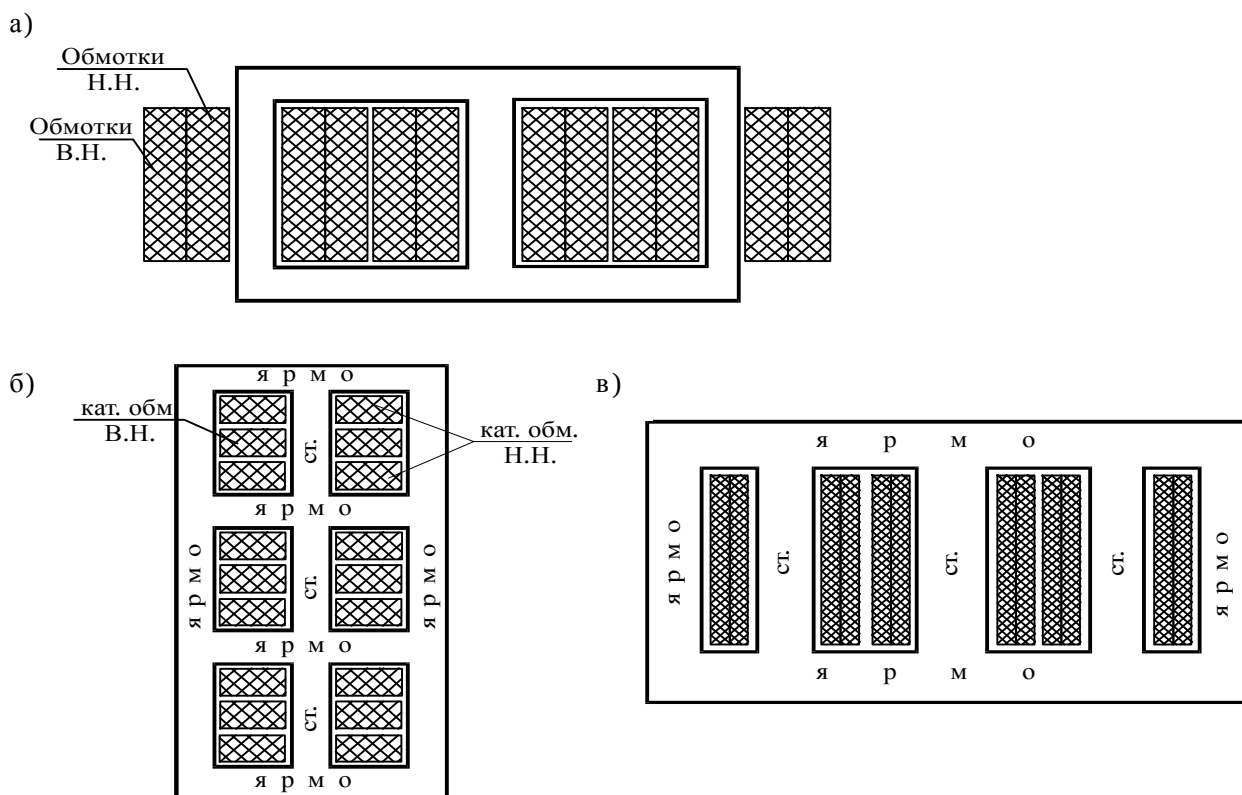


Рис.1.3 Магнітопроводи трифазних трансформаторів:

- а – трифазний стержневий трансформатор з концентричними обмотками;
б – трифазний броньовий трансформатор з переміжними обмотками;
у – трифазний бронестержньовий трансформатор з концентричними обмотками

Стержневий трансформатор не має бічних ярем.

Броньовий трансформатор має бічні ярма для кожного із стержнів.

Бронестержньовий трансформатор має бічні ярма тільки для крайніх стержнів.

Магнітна система силових трансформаторів набирається з листів електротехнічної сталі. Використовується холоднокатана текстурована сталь марок 3404, 3405...3408 з товщиною листів 0,35 або 0,3 мм. Після штампування листів наноситься межлистова ізоляція у вигляді лакового покриття або плівки окислів (оксидні та фосфатні плівки), що одержуються спеціальною термічною обробкою листів сталі.

Після зборки магнітопроводу, листи сталі пресуються і стягуються: в тра-

нсформаторах малої потужності – ярмовими балками; у трансформаторах великої потужності – бандажами із склострічки.

Стержні силових трансформаторів мають у поперечному перерізі форму східчастого багатокутника, вписаного в коло (рис. 1.4).

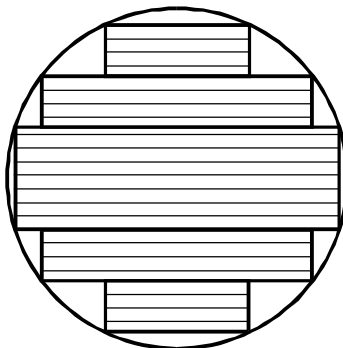


Рис. 1.4 Форма поперечного перетину стержня

Чим більше потужність та габарити трансформатора, тим більше ступіней в поперечному перерізі стержня.

В поперечному перетині ярма ступіней, як правило, менше. Форма поперечного перетину ярма має вигляд (рис. 1.5)

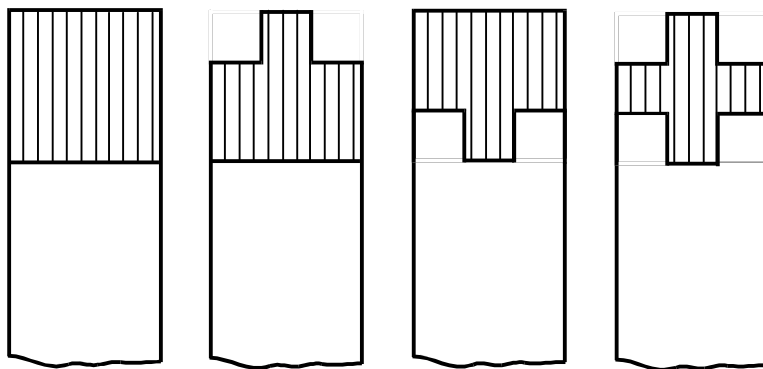


Рис. 1.5 Форми поперечного перетину ярма трансформаторів

При зборці магнітопроводів силових трансформаторів застосовується два способи з'єднання стержнів та ярем.

І спосіб – з'єднання “в перепліт” застосовується в трансформаторах малої потужності. При зборці магнітопровода конфігурація шарів листів сталі переміщуються (рис. 1.6)

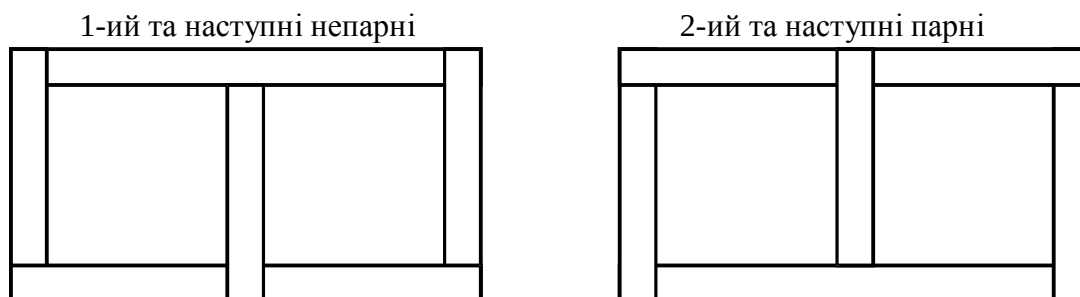


Рис. 1.6 Зборка магнітної системи “в перепліт”

При такому способі зборки магнітопроводу між стержнями і ярмом немає чітко вираженого повітряного зазору, що є достоїнством цього способу зборки.

II спосіб – з'єднання стержнів та ярмом у стик. Схему зборки можна представити у такий спосіб (рис. 1.7).

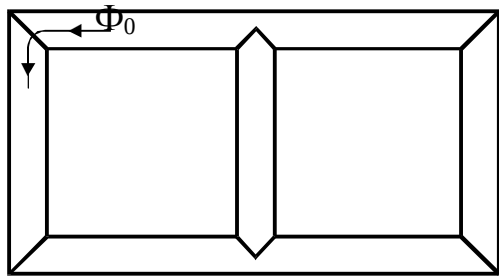


Рис. 1.7 Зборка магнітної системи «у стик»

Цей спосіб спрощує зборку магнітопроводу. Однак він має істотний недолік – між стержнями і ярмами має місце практично чисто виражений повітряний зазор. Це знижує механічну міцність магнітопроводу та збільшує магнітний опір на шляху проходження основного магнітного потоку.

Наявність косого стику між стержнем і ярмом пояснюється тим, що на даний час для магнітопроводів застосовується головним чином холоднокатана сталь, що має гарні магнітні властивості тільки в напрямку прокатки. Ці властивості різко погіршуються у напрямку поперечної прокатки.

Після зборки магнітопроводу пресують і закріплюють: стержні – 1) розклинюванням з обмоткою; 2) бандажами із склострічки; ярма кріпляться ярмовими балками з конструктивної сталі.

Система обмоток. В двохобмоткових трансформаторах розрізняють обмотки вищої напруги (ВН) та обмотки нижчої напруги (НН).

В триобмотковому трансформаторі є ще обмотка середньої напруги (СН).

По виконанню обмоток розрізняють:

- 1) концентричні обмотки;
- 2) переміжні обмотки.

На даний час в силових трансформаторах застосовують головним чином концентричні обмотки. По конструктивному виконанню цих обмоток розрізняють:

- а) багат шарові циліндричні обмотки;
- б) гвинтові обмотки;
- в) котушкові обмотки безперервного намотування.

Переміжні обмотки знаходять обмежене застосування. В цих обмотках котушки обмоток ВН та НН переміжуються.

В масляних трансформаторах від 25 до 200 тис. кВА за ДСТ передбачене виконання в обмотках ВН крім номінального ще чотирьох відгалужень на +5%; +2,5%; – 2,5%; – 5% від номінального.

Існує два способи регулювання напруги в силових трансформаторах:

1. Регулювання під напругою (система РПН). Застосовується в тих випадках, коли необхідно забезпечити безперебійне електропостачання споживачів.

2. Переключення без збудження (система ПБЗ). При цьому трансформатор відключається від мережі.

Кожна фаза обмоток ВН і НН має з'єднання з відповідним вводом.

Конструкція і габарити вводу залежать від класу напруги.

Система охолодження масляних трансформаторів. При роботі трансформатора в ньому мають місце втрати, що у виді тепла відводяться в навколишнє середовище. Чим більше потужність трансформатора, тим більше значення цих втрат, що приводить до необхідності ускладнювати систему охолодження трансформаторів.

В масляних трансформаторах система охолодження включає **бак** із трансформаторним маслом, куди занурюють трансформатор (виймальну частину) для охолодження та **розширювач**.

У трансформаторів потужністю до $\approx (25 - 40)$ кВА стінки бака гладкі.

У трансформаторів більшої потужності виникає необхідність у збільшенні зовнішньої поверхні бака. Тому в таких трансформаторах баки виконуються з ребрами або навісними радіаторами – охолоджувачами.

У трансформаторів до (10-16) тис. кВА застосовується природне масляне охолодження, тобто вільна циркуляція масла в баці, без застосування зовнішнього обдуву бака чи радіаторів.

У трансформаторів більшої потужності застосовується примусова циркуляція масла із зовнішнім обдувом.

На кришці бака встановлюється розширювач, що сполучається з баком.

При пуску трансформатора в експлуатацію масло заливають таким чином, щоб воно цілком заповнило бак та частково розширювач.

Призначення розширювача полягає в наступному:

1. Зменшується поверхня зіткнення масла з повітрям, оскільки при окислюванні трансформаторне масло втрачає свої ізоляційні властивості.

2. Компенсує температурне розширення масла у баці при нагріванні.

На даний час розроблені силові трансформатори у яких відсутній розширювач. В цьому випадку у верхній частині бака вільний від масла об'єм заповнюється азотом під надлишковим тиском (азотозаповненні трансформатори).

Допоміжна система включає пристрій регулювання напруги, а також контрольні та захисні пристрої.

Пристрій регулювання напруги являє собою перемикач, що встановлюється на кришці бака. Цей перемикач дозволяє регулювати вихідну напругу трансформатора без навантаження (система ПБЗ).

Силові трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням оснащені спеціальним пристроєм регулювання (система РПН).

Контрольні пристрої включають термометр або термосигналізатор, показчик рівня масла, що встановлюється на розширювачі.

Захисні пристрої включають вихлопну трубу на кришці бака, що у нормальному стані закрита склом або плівкою.

Газове реле – встановлюється на трубі, що сполучає розширювач з баком, і контролює надлишковий тиск газів в баці.

Захисні пристрої встановлюються для трансформаторів потужністю 630 кВА і більше.

1.4 Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів

а) схеми з'єднання обмоток

Силові трансформатори в більшості випадків виконуються як трифазні. Як первинна, так і вторинна обмотки таких трансформаторів можуть бути з'єднані одним з наступних трьох способів

- 1) зіркою;
- 2) трикутником;
- 3) зигзагом.

1. **З'єднання зіркою** – такий спосіб з'єднання, коли в одну точку з'єднуються початки або кінці фаз обмоток трансформатора. Зірка може мати нульовий провід (заземлену нейтраль).

Принципова схема цього способу з'єднання представлена на рис. 1.8.

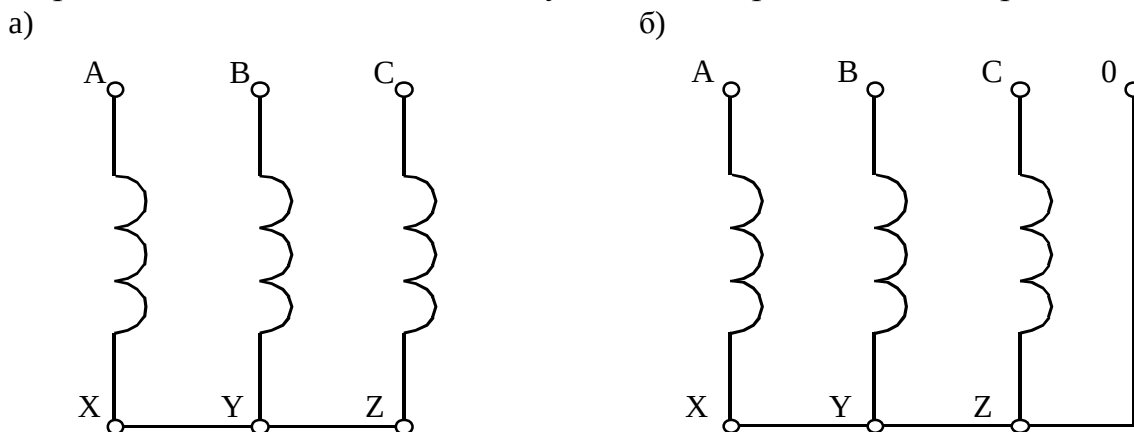


Рис. 1.8. Схеми з'єднання обмоток трансформатора:

- а – зірка з ізолюваною нейтраллю;
 б – зірка з нульовим проводом

З'єднання зіркою позначається:

- на кресленнях: Υ, Υ_N наявність нульового
- прописне: Y, Y_N проводу (нейтралі)

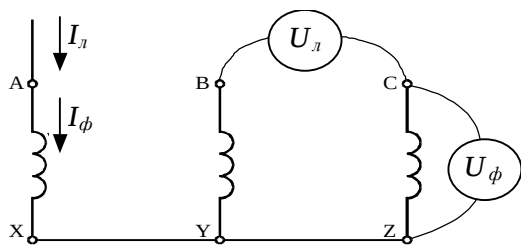


Рис. 1.9 Лінійні і фазні струми і напруги трансформатора

Якщо до трансформатора, фази якого з'єднані зіркою, підведена симетрична трифазна напруга (рис. 1.9), то лінійні та фазні струми і напруги знаходяться у відношенні:

$$I_l = I_\phi; \quad U_l = \sqrt{3}U_\phi$$

2. З'єднання трикутником – такий спосіб з'єднання коли початок кожної наступної фази з'єднується з кінцем попередньої фази (рис. 1.10, а). Можливий і інший спосіб з'єднання (рис. 1.10, б). Обидва способи рівноцінні, однак перевагу віддають першому способу.

3.

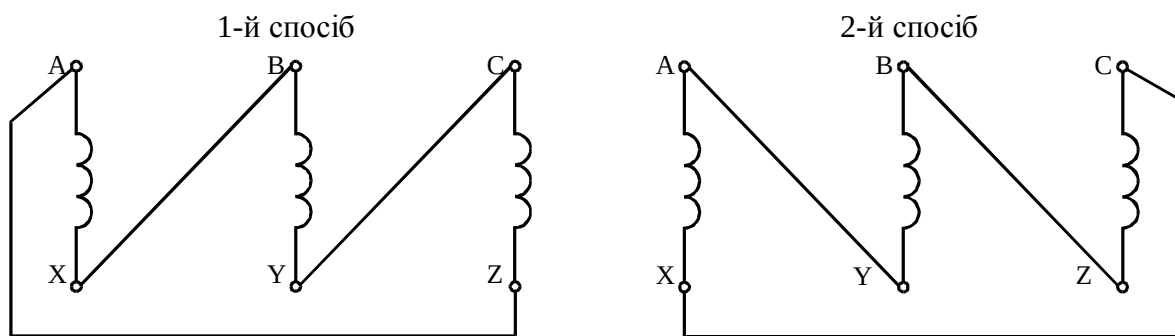


Рис. 1.10. Схеми з'єднання обмоток трансформатора:
а – прямий трикутник; б – зворотний трикутник

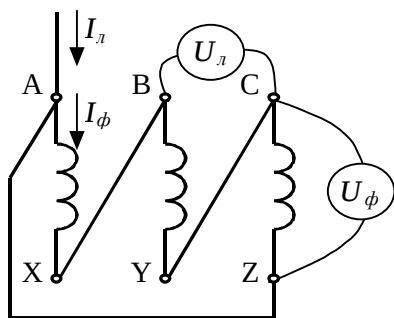


Рис. 1.11. Лінійні і фазні струми і напруги

З'єднання трикутником позначається:

- на кресленнях: Δ ;
- прописне: Д.

Якщо до трансформатора, фази якого з'єднані трикутником, підведена симетрична трифазна напруга, то лінійні та фазні струми і напруги (рис.1.11.) знаходяться у відношенні:

$$I_l = \sqrt{3}I_\phi; \quad U_l = U_\phi$$

3. З'єднання зигзаг – виконується, як правило, на стороні нижчої напруги. При цьому способі з'єднання кожна фаза обмотки поділяється на дві частини, як правило, з однаковим числом витків. Ці частини з'єднуються за наступною схемою (рис. 1.12).

Зигзаг може мати заземлену нейтраль. Цей спосіб з'єднання фаз позначається:

- на кресленнях: , ;
- прописне: Z, Z_н.

Якщо частини кожної з фаз мають однакове число витків, то фазна напру-

га при такому способі з'єднання утвориться в результаті вирахування векторів напруг окремих напівобмоток (відповідних).

З векторної діаграми (рис. 1.13) знаходимо, що діюче значення напруги U_ϕ через напруги напівобмоток, визначається у такий спосіб

$$U_\phi = \sqrt{3}U_{n.o}$$

Лінійні та фазні струми й напруги знаходяться в такому ж співвідношенні, як і для зірки.

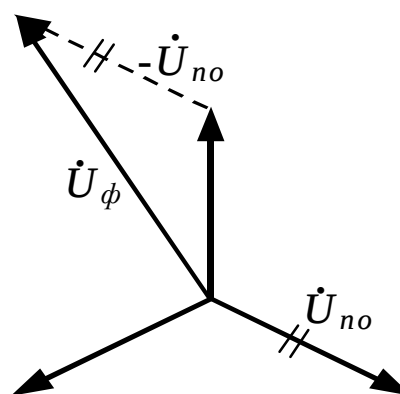
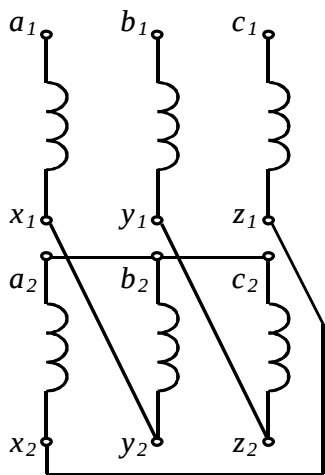


Рис. 1.12. Схема з'єднання обмоток зигзагом Рис. 1.13 Векторна діаграма для визначення фазних напруг

Схема з'єднання зигзаг знаходить застосування головним чином у трансформаторів, що використовуються для статичних перетворювачів.

б) групи з'єднання обмоток трансформаторів

У ряді випадків, зокрема, при включенні трансформаторів на паралельну роботу, на загальні шини включаються рівнопотенційні затискачі трансформаторів. При цьому необхідно знати не тільки схему з'єднання обмоток, але й групу з'єднання обмоток. Група з'єднання обмоток трансформатора визначається кутом зсуву по фазі “ a ” між лінійними напругами первинної та вторинної обмоток. Цей кут a , тобто група трансформатора залежить від наступних факторів:

- а) напрямку намотування первинної та вторинної обмоток;
- б) способу позначення (маркіровки) затискачів;
- в) способу з'єднання обмоток трифазних трансформаторів.

Вплив перших двох факторів на кут a установимо на прикладі однофазного двообмоткового трансформатора.

Нехай первинна та вторинна обмотки трансформатора намотані однако-вим способом (тобто в одну сторону) (рис. 1.14, а). В будь-який момент часу основний магнітний потік Φ_0 в однаковому ступені зчеплений як з первинною так і з вторинною обмотками. Отже, при однаковому напрямку намотування

первинної та вторинної обмоток, ЕРС цих обмоток, що індукується магнітним потоком

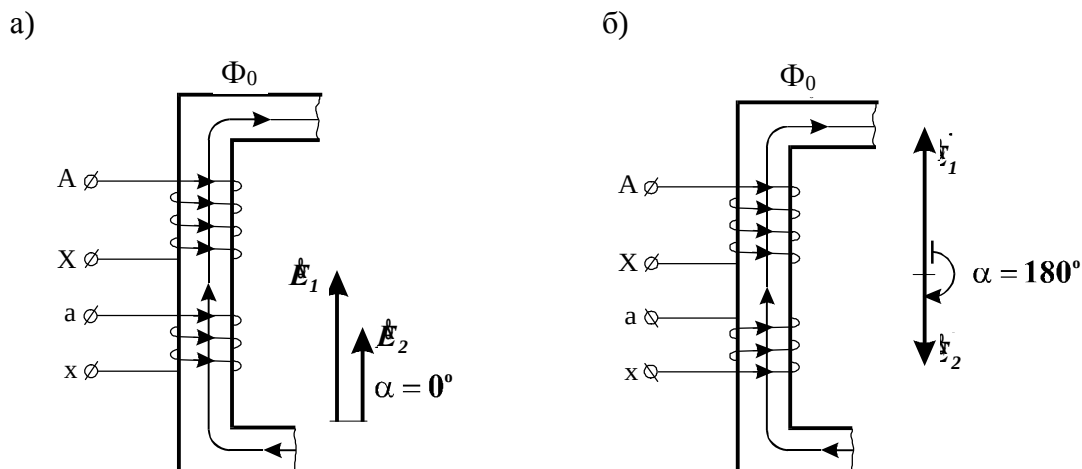


Рис. 1.14 Позначення виводів обмоток й групи з'єднання однофазних трансформаторів: а) – 1/1-0; б) 1/1-6.

Φ_0 , в будь-який момент часу спрямовані однаково стосовно початків та кінців обмоток (напрямок ЕРС зазначений на рисунку).

На векторній діаграмі вектори ЕРС $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ будуть збігатися по фазі, тобто $\alpha = 0$.

Змінимо напрямок намотування на вторинній обмотці на протилежний (рис. 1.14, б). В цьому випадку в будь-який момент часу ЕРС, що індукуються в первинній та вторинній обмотках, мають протилежні напрямки стосовно початків та кінців цих обмоток.

На векторній діаграмі вектори $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ спрямовані протилежно, тобто $\alpha = 180^\circ$.

Цей ефект, тобто $\alpha = 180^\circ$, можна одержати, якщо в схемі рис. 1.14, а змінити маркіровку затисків вторинної обмотки, тобто замість

$$a \rightarrow x$$

$$x \rightarrow a$$

При визначенні групи з'єднання обмоток трансформатора використовують, так званий, **годинниковий метод** підрахунку кута α (рис. 1.15).

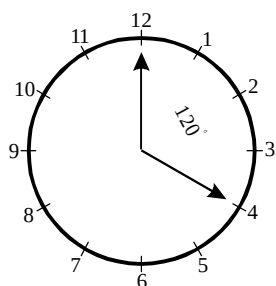


Рис. 1.15 Визначення групи з'єднання обмоток.

При цьому методі підрахунку за одиницю кута приймається кут 30° , тобто кут між двома сусідніми цифрами на годинниковому циферблаті: при визначенні групи трансформатора вектор первинної лінійної напруги умовно поєднують з великою стрілкою годинника, установленію на цифрі 12. Вектор вторинної лінійної напруги – з малою стрілкою годинника, зміщеною щодо великої стрілки на шуканий кут α .

Підрахунок кута α робиться від вектора

первинної лінійної напруги до вектора вторинної лінійної напруги по годинній стрілці. Для представленого на рис. 1.15 випадку трансформатор належить до $120^\circ/30^\circ = 4$ групи.

Установимо вплив третього фактора, тобто схеми з'єднання обмоток трифазного трансформатора на групу з'єднання обмоток.

Для цього розглянемо ряд прикладів.

Приклад 1. Первинні та вторинні обмотки трансформатора з'єднані зіркою. Напрямок намотування трансформатора однаковий, маркування затисків однакове. Отже, як верхні затискачі, так і нижні затискачі будуть однополярними (*) затискачами (рис. 1.16, а).

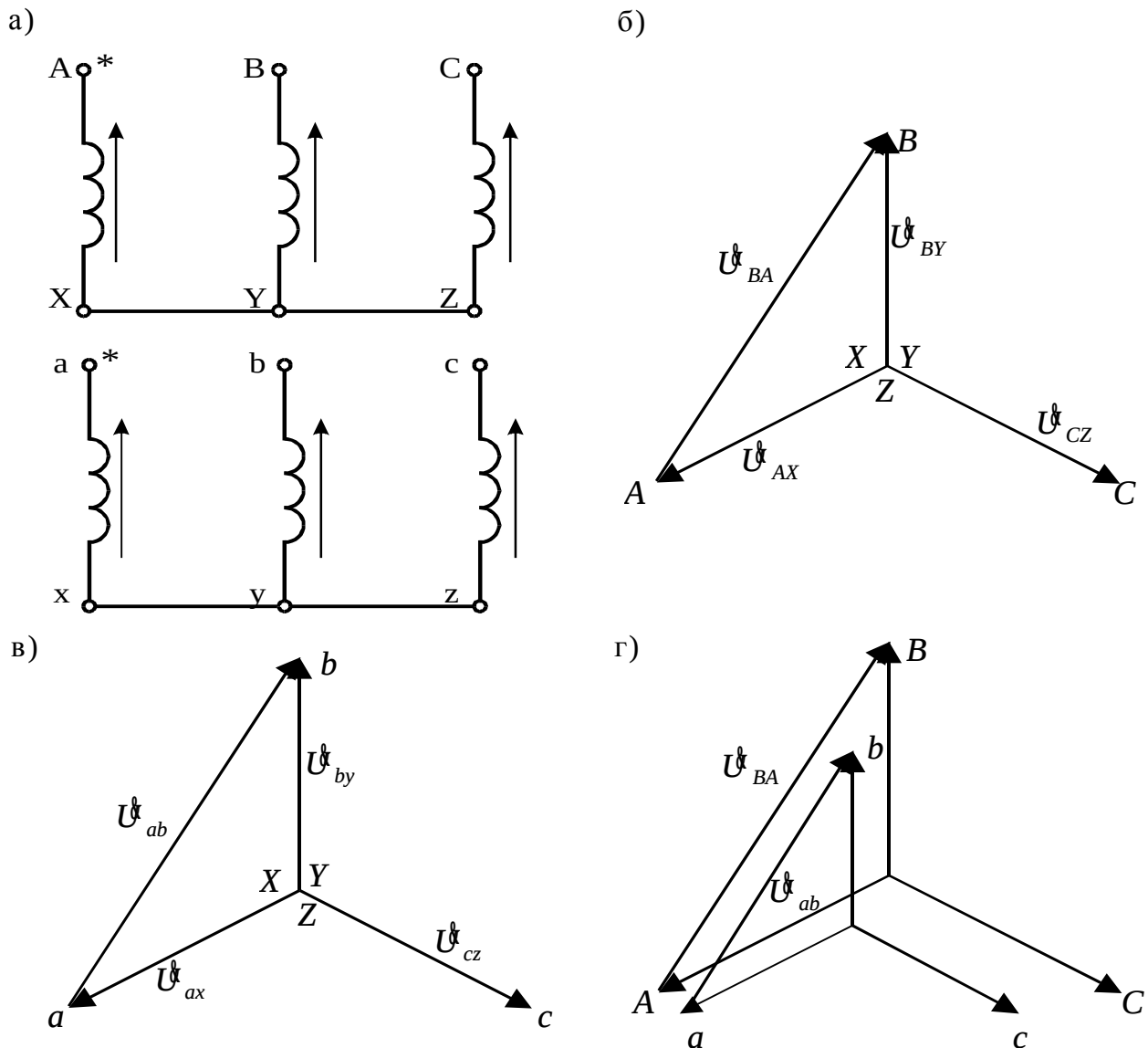


Рис. 1.16 Схеми з'єднання обмоток та векторні діаграми

Нехай до первинної обмотки трансформатора підведена трифазна симетрична синусоїдальна напруга. Цю напругу можна представити наступною зіркою векторів (рис. 1.16, б).

Якщо до первинної обмотки підведена напруга, в кожній фазі вторинної обмотки індукуються ЕРС, що визначають фазні та лінійні напруги вторинних обмоток. Маючи такого ж напрямку намотування, як і первинні, та таку ж маркіровку затисків, в будь-який момент

часу $\vec{U}_{ax}$ займе таке ж положення, як і $\vec{U}_{AX}$ (рис. 1.16, в)

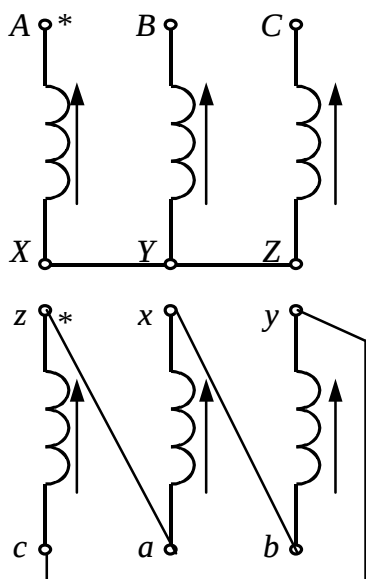
$$\vec{U}_{ax} \rightarrow \vec{U}_{AX}; \quad \vec{U}_{by} \rightarrow \vec{U}_{BY}; \quad \vec{U}_{cz} \rightarrow \vec{U}_{CZ};$$

Отже, вектори діаграми фазних напруг вторинної обмотки в будь-який момент часу займають таке саме положення, як і вектори діаграми фазних напруг первинної обмотки.

При визначенні групи розглянемо положення будь-яких однойменних векторів лінійної напруги первинної та вторинної обмоток. Щоб установити кут зсуву по фазі між лінійними векторами сполучимо їхні точки “А” та “а” векторів $\vec{U}_{BA}$ і $\vec{U}_{ba}$ (рис. 1.16, г). З векторної діаграми випливає, що трансформатор належить до групи У/У – 0 (тому що $\alpha = 0$)

Приклад 2. Змінімо в порівнянні з прикладом 1 схему з'єднань вторинної обмотки та її маркіровку (рис. 1.17, а). З векторної діаграми (рис. 1.17, б) випливає, що трансформатор належить до групи У/Д-11 (тому що $\alpha = 330^\circ$).

а)



б)

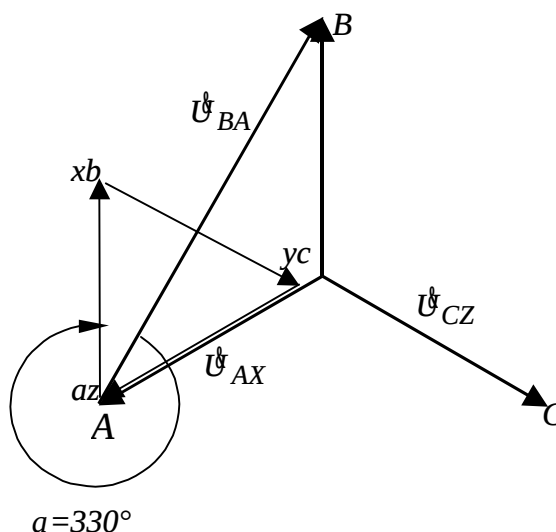


Рис. 1.17 Схеми з'єднання обмоток та векторні діаграми

З розглянутих вище прикладів випливає, що при з'єднанні обмоток трифазних трансформаторів способом У/У чи Д/Д – утворюються парні та 0-а групи (0, 2, 4, 6, 8, 10); при з'єднанні У/Д чи Д/У – утворюються непарні групи (1, 3, 5, 7, 9, 11).

В двообмоточних трансформаторах, що випускаються серійно вітчизняною промисловістю прийняті наступні групи з'єднання обмоток:

$$У/У_n - 0; \quad У/Д - 11; \quad Д/У_n - 11; \quad У_n/Д - 11$$

Триобмоточні масляні трансформатори випускаються з наступними групами з'єднання обмоток:

$$У_n/У_n/Д - 0 - 11; \quad У_n/Д/Д - 11 - 11.$$

1.5 Основні рівняння трансформатора

Роботу трансформатора в будь-якому режимі характеризують основні рівняння, до яких відносять рівняння МРС (магніторухливих сил) та рівняння рівноваги напруг для кіл первинної та вторинної обмоток.

Розглянемо ці рівняння на прикладі двохобмоткового однофазного трансформатора.

Ці рівняння справедливі для кожної фази трифазного трансформатора, якщо він навантажений симетричним навантаженням.

Принципова схема однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис. 1.18.

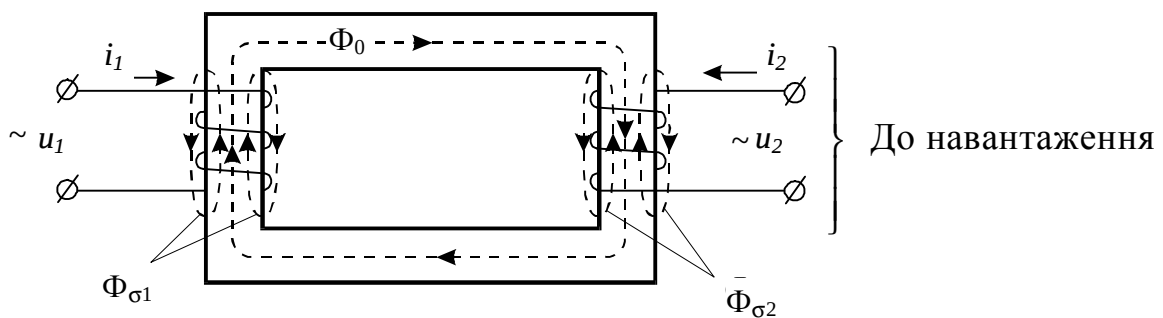


Рис. 1.18 Магнітні потоки в однофазному трансформаторі
 u_1, u_2 — миттєві значення напруг первинної та вторинної обмоток трансформатора;
 i_1, i_2 — миттєві значення струмів первинної та вторинної обмоток трансформатора.

Магнітне поле, як встановлено раніше, утворюється під дією магніторухливих сил (МРС) первинної $i_1 w_1$ та вторинної $i_2 w_2$ обмоток (де w_1 і w_2 — число послідовно з'єднаних витків первинної та вторинної обмоток).

За другим законом Кірхгофа для магнітного кола трансформатора справедливо наступне рівняння МРС

$$i_1 w_1 + i_2 w_2 = i_0 w_1, \quad (1.2)$$

де i_0 — намагнічувальний струм, що намагнічує, (струм х.х. трансформатора).

Магнітне поле трансформатора, як відзначалося, доцільно представити з наступних магнітних потоків:

Φ_0 — основний магнітний потік;

Φ_{s1} — магнітний потік розсіювання первинної обмотки;

Φ_{s2} — магнітний потік розсіювання вторинної обмотки.

Потік Φ_0 практично рівномірно розподіляється по перетину сердечника трансформатора та зчеплений в однаковій степені як з первинною, так і з вторинною обмотками. Він індукуює в цих обмотках ЕРС, миттєве значення яких визначається рівняннями 1.3 і 1.4:

$$e_1 = -w_1 \frac{d\Phi_{0t}}{dt} = -\frac{dY_{10}}{dt}; \quad (1.3)$$

$$e_2 = -w_2 \frac{d\Phi_{0t}}{dt} = -\frac{dY_{20}}{dt}, \quad (1.4)$$

де Φ_{0t} – миттєве значення основного магнітного потоку; Y_{10} , Y_{20} – потокозчеплення первинної та вторинної обмоток трансформатора, відповідно, з основним магнітним потоком.

Потоки розсіювання Φ_{s1} та Φ_{s2} індукують, відповідно, в первинній та вторинній обмотках ЕРС, миттєве значення яких визначається наступними виразами:

$$e_{s1} = -L_{s1} \frac{di_1}{dt}; \quad (1.5)$$

$$e_{s2} = -L_{s2} \frac{di_2}{dt}, \quad (1.6)$$

де L_{s1} і L_{s2} – індуктивності розсіювання первинної та вторинної обмоток, відповідні потокам розсіювання цих обмоток.

Потоки розсіювання можна вважати незалежними від значення струмів, що протікають по обмотках, оскільки магнітні силові лінії цих потоків проходять у значній мірі по повітрю.

З огляду на вищевикладене, запишемо рівняння рівноваги напруг для первинної та вторинної обмоток трансформатора по другому закону Кірхгофа.

Для первинної обмотки

$$u_1 + e_1 + e_{s1} = i_1 r_1,$$

або

$$u_1 = -e_1 - e_{s1} + i_1 r_1 = \frac{dY_{10}}{dt} + L_{s1} \frac{di_1}{dt} + i_1 r_1;$$

$$u_1 = \frac{dY_1}{dt} + i_1 r_1, \quad (1.7)$$

де Y_1 – повне потокозчеплення первинної обмотки як з потоком F_0 так і з потоком F_{s1} .

Для вторинної обмотки

$$e_2 + e_{s2} = i_2 r_2 + u_2,$$

або

$$0 = -e_2 - e_{s2} + i_2 r_2 + u_2 = \frac{dY_{20}}{dt} + L_{s2} \frac{di_2}{dt} + i_2 r_2 + u_2 = \frac{dY_2}{dt} + i_2 r_2 + u_2$$

$$u_2 = -\frac{dY_2}{dt} - i_2 r_2, \quad (1.8)$$

де Y_2 – повне потокозчеплення вторинної обмотки трансформатора як з потоком Φ_0 так і з потоком Φ_{s1} ; u_2 – миттєве значення спаду напруги на навантаженні.

Якщо живляча напруга u_1 змінюється по синусоїдальному закону $u = U_{1m} \sin \omega t$, то магнітний потік також змінюється синусоїдально, відстаючи по фазі на кут 90° :

$$F = \int \frac{u_1}{w_1} dt = \frac{U_{1m}}{w_1} \int \sin \omega t dt = -F_m \cos \omega t + c = F_m \left(\omega t - \frac{p}{2} \right). \quad (1.9)$$

Можна показати, що постійна інтегрування в сталому режимі $c = 0$.

Зв'язок між ЕРС та магнітним потоком визначається рівнянням

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

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

$$E_1 = \frac{E_{1m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_1 F_m. \quad (1.10)$$

Аналогічно

$$E_2 = \frac{E_{2m}}{\sqrt{2}} = 4,44 f w_2 F_m. \quad (1.11)$$

Як правило, в силових трансформаторах ЕРС, струми і напруги змінюються в часі по синусоїдальному закону. У цьому випадку основні рівняння трансформатора можна представити в комплексному виді

Рівняння МРС

$$\dot{F}_1 w_1 + \dot{F}_2 w_2 = \dot{F}_0 w_1. \quad (1.12)$$

Враховуючи, що

$$\dot{E}_{s1} = -j \dot{F}_1 x_1; \quad (1.13)$$

$$\dot{E}_{s2} = -j\dot{I}_2 x_2, \quad (1.14)$$

де $x_1 = 2p \cdot f L_{s1}$, $x_2 = 2p \cdot f L_{s2}$ – індуктивні опори первинної та вторинної обмоток трансформатора відповідно.

Тому можна записати:
для первинної обмотки

$$\dot{U}_1 + \dot{E}_1 + \dot{E}_{s1} = \dot{I}_1 r_1,$$

або

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 - \dot{E}_{s1} + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + j\dot{I}_1 x_1 + \dot{I}_1 r_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 (r_1 + jx_1) = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1$$

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1, \quad (1.15)$$

де $Z_1 = r_1 + jx_1$ – повний опір первинної обмотки;
для вторинної обмотки

$$\dot{E}_2 + \dot{E}_{s2} = I_2 r_2 + \dot{U}_2;$$

$$\dot{E}_2 = -\dot{E}_{s2} + I_2 r_2 + \dot{U}_2 = j\dot{I}_2 x_2 + \dot{I}_2 r_2 + \dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{U}_2$$

$$\dot{E}_2 = \dot{I}_2 Z_2 + \dot{U}_2, \quad (1.16)$$

де $Z_2 = r_2 + jx_2$ – повний опір вторинної обмотки;

$$\dot{U}_2 = \dot{I}_2 Z_n,$$

де Z_n – повний опір навантаження.

Перетворення первинної ЕРС трансформатора у вторинну характеризується коефіцієнтом трансформації

$$k = \frac{e_1}{e_2} = \frac{-w_1 \frac{dF_{ot}}{dt}}{-w_2 \frac{dF_{ot}}{dt}} = \frac{w_1}{w_2}. \quad (1.17)$$

Для силових трансформаторів приймають, що

$$k > 1,$$

тобто

$$k = \frac{w_{\text{вн}}}{w_{\text{вн}}} . \quad (1.18)$$

1.6 Приведений трансформатор та схема заміщення приведеного трансформатора

Як правило, у трансформатора $w_1 \neq w_2$, отже діючі значення ЕРС

$$E_1 \neq E_2$$

Це створює певні труднощі при побудові векторних діаграм у різних режимах роботи трансформатора, тому що вектори E_1 і E_2 необхідно представляти різними довжинами. Щоб уникнути цих незручностей параметри вторинної обмотки трансформатора приводять до числа витків первинної обмотки.

Приведеною вторинною обмоткою трансформатора називають таку умовну обмотку, що має те ж число витків, що і первинна обмотка. При цьому енергетичні співвідношення в трансформаторі повинні залишатися незмінними.

Приведені параметри вторинної обмотки трансформатора через дійсні величини визначаються у такий спосіб.

Приведена ЕРС вторинної обмотки

$$E'_2 = E_2 \frac{w_1}{w_2} = E_2 k = E_1 . \quad (1.19)$$

Приведений струм вторинної обмотки I'_2 знаходять за умови, що повна потужність вторинної обмотки залишається незмінною

$$\begin{aligned} I'_2 E'_2 &= I_2 E_2 ; \\ I'_2 &= \frac{I_2 E_2}{E'_2} = \frac{I_2 E_2}{k E_2} = \frac{I_2}{k} . \end{aligned} \quad (1.20)$$

Приведений активний опір вторинної обмотки r'_2 визначають за умови, що електричні втрати в обмотці не залежать від її приведення, тобто

$$\begin{aligned} (I'_2)^2 r'_2 &= I_2^2 r_2 , \\ r'_2 &= r_2 \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 = r_2 k^2 . \end{aligned} \quad (1.21)$$

Приведений індуктивний опір x'_2 знаходиться аналогічно

$$x'_2 = x_2 k^2. \quad (1.22)$$

З урахуванням приведених співвідношень, основні рівняння приведенного трансформатора запишуться у такий спосіб.

Рівняння МРС

$$\dot{\Phi}_1 w_1 + \dot{\Phi}'_2 w_1 = \dot{\Phi}'_0 w_1;$$

$$\dot{\Phi}_1 + \dot{\Phi}'_2 = \dot{\Phi}_0. \quad (1.23)$$

Рівняння напруг

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{\Phi}_1 Z_1; \quad (1.24)$$

$$\dot{E}'_2 = \dot{\Phi}'_2 Z'_2 + \dot{U}'_2, \quad (1.25)$$

де $\dot{U}'_2 = \dot{\Phi}'_2 Z'_n$

При аналізі режимів роботи трансформатора представляє певні труднощі той факт, що первинна та вторинна обмотки трансформатора зв'язані електромагнітно. Тому доцільно одержати схему заміщення трансформатора, в якій всі елементи зв'язані електрично. Представимо спочатку реальний однофазний трансформатор у такий спосіб (рис. 1.19).

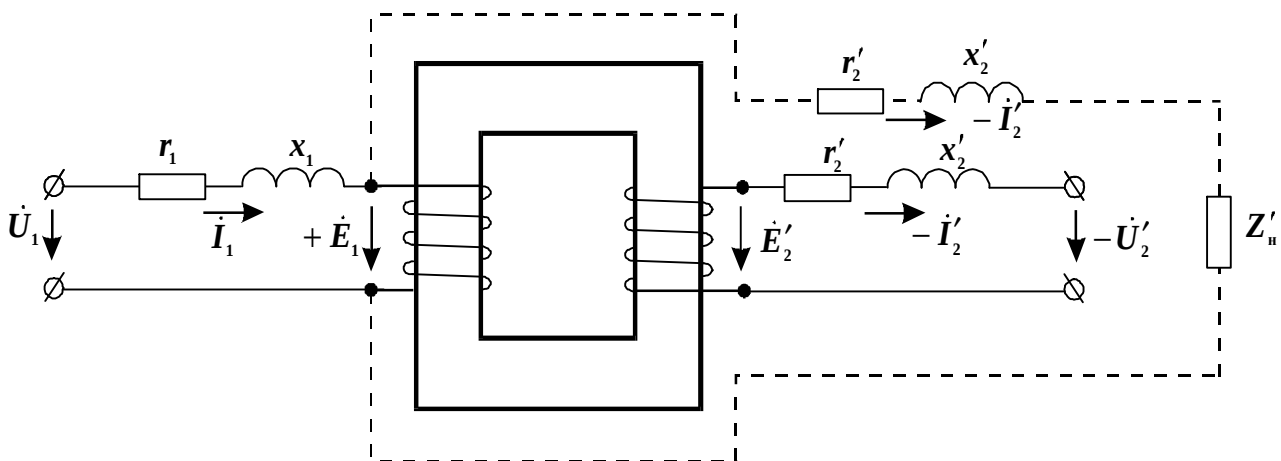


Рис. 1.19 До обґрунтування електричної схеми заміщення приведенного трансформатора

Використаємо основне рівняння трансформатора, враховуючи що

$$-\dot{E}_1 = \dot{\Phi}_0 Z_m, \quad (1.26)$$

де $Z_m = r_m + jx_m$ – опір кола намагнічування;

$$\dot{U}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_n, \quad (1.27)$$

де $Z_n = r'_n + jx'_n$ – приведений опір навантаження.

З рівняння МРС приведенного трансформатора випливає

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0,$$

або

$$\dot{I}_1 = -\dot{I}'_2 + \dot{I}_0. \quad (1.28)$$

Оскільки

$$\dot{I}'_2 = \frac{\dot{E}'_2}{Z'_2 + Z'_n} = \frac{\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_n}, \quad (1.29)$$

що випливає з рівняння для вторинної обмотки трансформатора

$$\dot{E}'_2 = \dot{I}'_2 Z'_2 + \dot{U}'_2.$$

$$\dot{I}_0 = \frac{-\dot{E}_1}{Z_m}. \quad (1.30)$$

З урахуванням приведеного виразу для струмів можна записати

$$\dot{I}'_1 = \frac{-\dot{E}_1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{-\dot{E}_1}{Z_m} = -\dot{E}_1 \left(\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m} \right).$$

Звідси

$$-\dot{E}_1 = \frac{\dot{I}'_1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_n} + \frac{1}{Z_m}}. \quad (1.31)$$

Підставляючи це значення в рівняння рівноваги напруг для первинної обмотки трансформатора одержимо

$$\dot{U}_1 = \frac{\dot{I}_1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_H} + \frac{1}{Z_m}} + \dot{I}_1 Z_1 = \dot{I}_1 \left(Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_H} + \frac{1}{Z_m}} \right) = \dot{I}_1 Z_e, \quad (1.32)$$

де $Z_e = Z_1 + \frac{1}{\frac{1}{Z'_2 + Z'_H} + \frac{1}{Z_m}}$ – еквівалентний опір схеми заміщення трансформатора

З цього виразу випливає, що схему заміщення однофазного двообмоточного трансформатора можна представити електричним колом

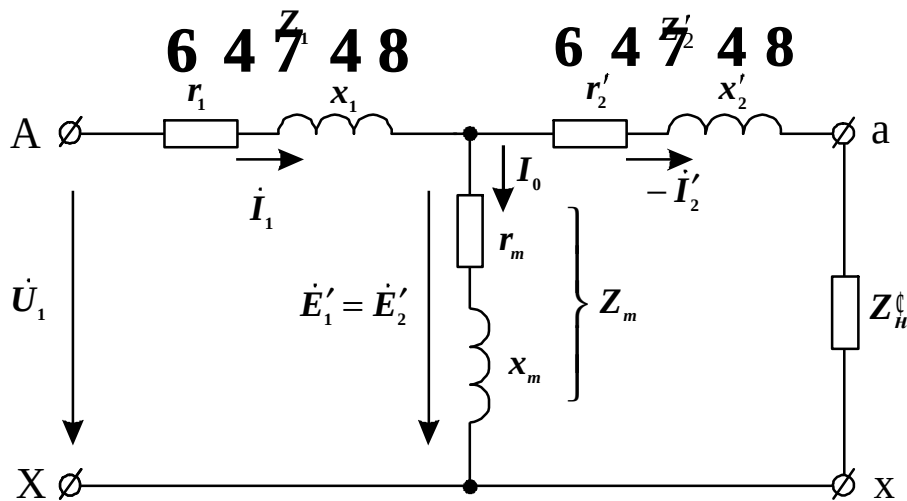


Рис. 1.20. Схема заміщення приведенного трансформатора

Наявність опорів r_m і x_m в схемі заміщення фізично пояснюється у такий спосіб:

- r_m – опір, що відповідає активним втратам в сталі сердечника трансформатора;
- $x_m = \omega M$ – опір взаємодуктивності (оскільки Φ_0 в однаковій степені зчеплений як з первинною, так і з вторинною обмотками).

При розрахунках і моделюванні режимів роботи трансформатора ця схема заміщення зручна тим, що в ній всі елементи зв'язані електрично. Вона справедлива також для кожної фази трифазного трансформатора, якщо цей трансформатор навантажений по фазах рівномірно.

Контрольні запитання

1. При якій напрузі доцільно: а) передавати; б) споживати електричну енергію?
2. Вкажіть одне з найважливіших достоїнств кіл перемінного струму в порівнянні з колами постійного струму.
3. Який принцип роботи трансформатора?
4. Чому трансформатори не працюють від мережі постійного струму?
5. З яких частин складається активна частина трансформатора? Які їхні призначення та конструкція?
6. Як по зовнішніх ознаках відрізнити в трансформаторі обмотку ВН від обмотки НН?
7. Яке призначення трансформаторного масла?
8. Як визначити номінальні струми та номінальну вторинну напругу трансформатора?
9. Що таке група з'єднання обмоток трансформатора та як вона позначається?
10. Які групи з'єднання передбачені ДСТ?
11. Як з основної групи з'єднання можна одержати похідну?
12. Як зміниться відношення лінійних напруг трансформатора, якщо нульову групу з'єднання змінити на 11-ту?
13. Що таке приведений трансформатор?
14. Що таке рівняння електричної рівноваги з боку первинної обмотки?
15. Що таке рівняння електричної рівноваги з боку вторинної обмотки?

Глава 2. Холостий хід і коротке замикання трансформатора

2.1 Фізичні умови роботи трансформатора в режимі холостого ходу, основні співвідношення і схема заміщення

Холостим ходом (х.х.) трансформатора називають такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підведена визначеної величини змінна напруга (як правило, номінальна), а вторинна обмотка розімкнута ($I_2 = 0$).

Фізичні умови роботи трансформатора в цьому режимі розглянемо на прикладі однофазного двохобмоткового трансформатора (рис.2.1).

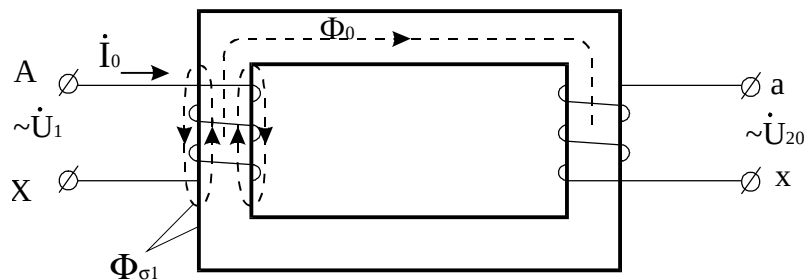


Рис. 2.1 Однофазний двохобмотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки трансформатора підвести синусоїдальну напругу U_1 , при розімкнутій вторинній обмотці, то трансформатор буде споживати з мережі струм I_0 . Під дією МРС первинної обмотки $F_1 = I_0 w_1$ в трансформаторі утвориться магнітне поле, яке представляємо потоками: Φ_0 – основний магнітний потік; Φ_{s1} – магнітний потік розсіювання первинної обмотки.

Потік Φ_0 індукуює у первинній обмотці ЕРС E_1 , у вторинній обмотці – E_2 .

Φ_{s1} – індукуює у первинній обмотці ЕРС E_{s1} .

Враховуючи ЕРС, що діють в контурах первинної і вторинної обмоток, а також схему включення трансформатора при холостому ході, запишемо основні рівняння рівноваги напруг для первинної і вторинної обмоток у комплексній формі, тобто за умови, що ЕРС, струм і напруги змінюються по синусоїдальному закону

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_0 Z_1 ; \quad (2.1)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{U}_{20} , \quad (2.2)$$

де U_{20} – вихідна напруга режиму холостого ходу трансформатора.

Для приведеної вторинної обмотки трансформатора

$$\dot{E}_2' = \dot{U}_{20}' .$$

Струм холостого ходу трансформатора I_0 має дві складові:

I_{0a} – активна складова струму холостого ходу, що співпадає по напрямку з вектором напруги U_1 ;

I_{0m} – реактивна (намагнічуюча) складова, ампервитки якої йдуть на створення основного магнітного потоку, співпадає по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 .

Струм холостого ходу через складові

$$I_0 = \sqrt{I_{0a}^2 + I_{0m}^2} . \quad (2.3)$$

Так як $I_{0m} \gg I_{0a}$, то в силових трансформаторах часто приймають

$$I_{0m} = I_0 ; \quad \frac{I_{0a}^2}{I_0^2} \leq 0,1$$

При наявності насичення магнітних кіл трансформатора, крива зміни струму холостого ходу в часі містить крім основної також вищі гармонійні непарного порядку: 3, 5, 7, ...

Фазові співвідношення між ЕРС, струмами і напругами встановлюємо шляхом побудови векторної діаграми.

При побудові векторної діаграми враховуємо знання фізичних процесів, режиму холостого ходу (при цьому враховуємо: параметри вторинної обмотки трансформатора приведені до первинної обмотки; тільки першу гармонійну струму холостого ходу).

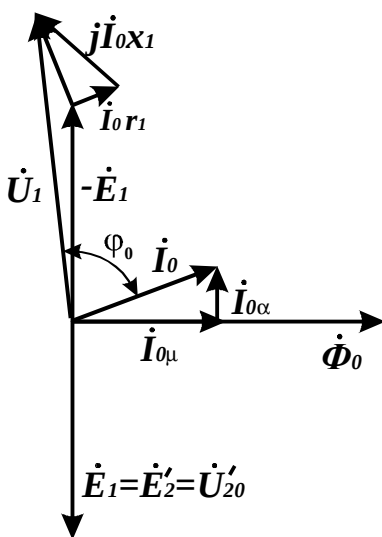


Рис. 2.2 Векторна діаграма трансформатора в режимі холостого ходу

При побудові векторної діаграми (рис.2.2) спочатку відкладаємо вектор основного магнітного потоку Φ_0 . Намагнічуюча складова струму холостого ходу I_{0m} збігається по напрямку з вектором магнітного потоку Φ_0 ЕРС E_1 і E_2 , що індукуються в первинній і вторинній обмотках основним магнітним потоком, відстають від нього по фазі на кут 90° . Відповідно до рівняння рівноваги напруг для вторинної обмотки $E'_2 = U'_{20}$, тобто ЕРС дорівнює вихідній напрузі трансформатора в режимі холостого ходу. Якщо до первинної обмотки трансформатора підведена номінальна напруга U_{1n} , то на виході трансформатора установлюється також номінальна напруга (за номінальну вихідну напругу приймається напруга режиму холостого ходу).

Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора підведеної напруги U_1 , шляхом підсумовування векторів відповідно до рівняння на-

пруг для кола первинної обмотки (2.1).

Таким чином, в результаті побудови векторної діаграми визначаємо фазові співвідношення між напругою, ЕРС і струмом в режимі холостого ходу трансформатора.

Схему заміщення трансформатора для режиму холостого ходу одержуємо з розглянутої вище загальної схеми заміщення з огляду на те, що в режимі холостого ходу вторинне коло обмотки трансформатора розімкнуте і струм по ній не протікає. Схема заміщення трансформатора для режиму холостого ходу буде представлена колом (рис.2.3).

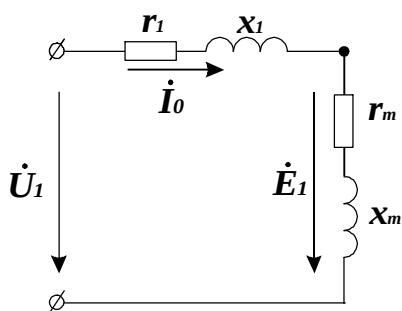


Рис. 2.3 Схема заміщення трансформатора в режимі холостого ходу

Відповідно до схеми заміщення, трансформатор в режимі холостого ходу має наступні параметри:

$r_0 = r_1 + r_m$ – активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$x_0 = x_1 + x_m$ – індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу.

Для силових трансформаторів справедливо, що $r_m \gg r_1$ і $x_m \gg x_1$, отже, для цих трансформаторів можна прийняти, що $r_0 \gg r_m$ і $x_0 \gg x_m$.

2.2 Дослід холостого ходу трансформатора

Випробування трансформатора в режимі холостого ходу має на меті:

- визначити параметри схеми заміщення трансформатора;
- визначити коефіцієнт трансформації трансформатора.

Принципова схема досліду холостого ходу для однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис.2.4.

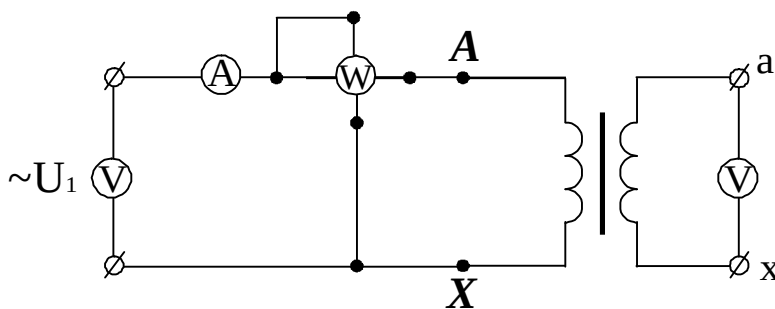


Рис. 2.4 Схема досвіду холостого ходу трансформатора

Вимірюють:

U_1 – підведена до трансформатора напруга;

I_0 – струм холостого ходу трансформатора;

P_0 – активна потужність, яку споживає трансформатор в режимі холостого ходу;

U_{20} – вихідна напруга трансформатора в режимі холостого ходу.

Розраховують:

а) параметри холостого ходу:

$Z_0 = \frac{U_1}{I_0}$ – повний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$r_0 = \frac{P_0}{I_0^2}$ – активний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

$x_0 = \sqrt{Z_0^2 - r_0^2}$ – індуктивний опір трансформатора в режимі холостого ходу;

б) коефіцієнт трансформації трансформатора

$$K = \frac{E_1}{E_2} \approx \frac{U_1}{U_{20}} ; \quad (2.4)$$

в) коефіцієнт потужності холостого ходу трансформатора

$$\cos j_0 = \frac{P_0}{U_1 I_0} . \quad (2.5)$$

При визначенні коефіцієнта трансформації має місце похибка, оскільки U_1 відрізняється від E_1 на величину $I_0 Z_1$.

Однак ця похибка невелика, оскільки в силових трансформаторах струм холостого ходу I_0 складає $I_0 = (3 \div 8) \% I_{1н}$.

Як правило, струм холостого ходу виражають у відсотках від номінального струму первинної обмотки

$$i_0 = \frac{I_0}{I_{1н}} \cdot 100 \% . \quad (2.6)$$

Для трифазного трансформатора за показаннями трьох амперметрів і вольтметрів визначаються середні значення лінійного струму $I_{ол}$ і лінійної напруги $U_{1л}$, а за показаннями ватметрів – потужність холостого ходу трьох фаз $P_0 = P\ell + P\ell\ell$. Фізичний зміст мають тільки значення опорів. Тому необхідно прийняти до уваги схему з'єднання обмоток. У випадку з'єднання первинних обмоток зіркою

$$z_0 = \frac{U_{1л}}{\sqrt{3} I_{ол}} ; \quad r_0 = \frac{P_0}{3 I_{ол}^2} ; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2} , \quad (2.7)$$

а при з'єднанні їх трикутником

$$z_0 = \frac{\sqrt{3}U_{1л}}{I_{0л}}; \quad r_0 = \frac{P_0}{I_{0л}^2}; \quad x_0 = \sqrt{z_0^2 - r_0^2}. \quad (2.8)$$

Коефіцієнт потужності холостого ходу

$$\cos j_0 = \frac{P_0}{\sqrt{3}U_{1л} I_{0л}}. \quad (2.9)$$

З аналізу схеми заміщення трансформатора (див. рис.1.23) при $I_{\ell_2} = 0$ випливає, що параметри холостого ходу z_0 , r_0 , x_0 являють собою суми наступних опорів:

$$z_0 = |Z_1 + Z_m|; \quad r_0 = r_1 + r_m; \quad x_0 = x_1 + x_m \quad (2.10)$$

В силових трансформаторах опори r_1 і x_1 в десятки і сотні разів менші опорів r_m і x_m . Тому з великою точністю можна вважати, що параметри холостого ходу дорівнюють параметрам намагнічуючого кола:

$$z_0 \approx Z_m; \quad r_0 \approx r_m; \quad x_0 \approx x_m. \quad (2.11)$$

Так як корисна потужність при роботі трансформатора в режимі холостого ходу дорівнює нулю, то потужність на вході трансформатора в цьому режимі витрачається на магнітні втрати в магнітопроводі P_m (втрати на перемагнічування магнітопровода і вихрові струми) і електричні втрати $I_0^2 r_1$ (втрати на нагрівання обмотки) однієї лише первинної обмотки. Однак через невелике значення струму I_0 електричними втратами $I_0^2 r_1$ можна зневажити і вважати, що вся потужність холостого ходу являє собою потужність магнітних втрат в сталі магнітопровода. Тому магнітні втрати в трансформаторі прийнято називати втратами холостого ходу.

Ці втрати не залежать від навантаження. Вони пропорційні квадрату магнітної індукції (B^2), тому що частота в мережі постійна.

Примітка: Для трифазних трансформаторів параметри схеми заміщення визначаються для однієї фази.

2.3 Особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів

Конструкція магнітопровода трифазних трансформаторів впливає на режим холостого ходу. В цьому зв'язку розрізняють трифазні трансформатори:

- а) зі зв'язаною магнітною системою;
- б) з незалежною магнітною, чи майже незалежною магнітною системою.

Прикладом трансформатора зі зв'язаною магнітною системою є трифазний стержневий трансформатор. Його магнітна система представлена на рис. 2.5.

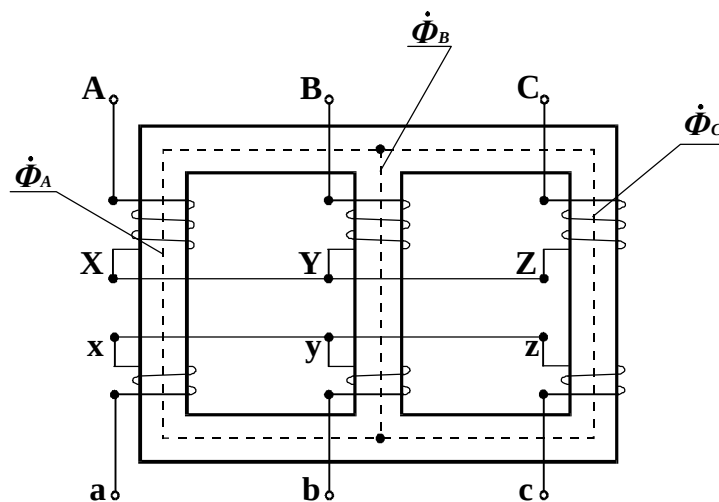


Рис. 2.5 Магнітна система трифазного стержневого трансформатора

Якщо до такого трансформатора підвести трифазну систему синусоїдальної напруги, то вектори фазних напруг утворять симетричну систему $\vec{U}_A, \vec{U}_B, \vec{U}_C$.

Магнітні потоки кожної з фаз при цьому також утворять симетричну систему Φ_A, Φ_B, Φ_C .

Однак шлях, по якому проходять потоки кожної з фаз в трифазному стержневому трансформаторі не однаковий: для фаз *A* і *C* – вони однакові і більше, ніж для фази *B* (див. рис. 2.5)

Використовуючи закон Ома для магнітного кола

$$\Phi = \frac{F}{R_m}, \quad (2.12)$$

приходимо до висновку, що оскільки

$$R_{mA} = R_{mC} > R_{mB},$$

то при однаковому значенні магнітних потоків повинна виконуватися умова

$$F_A = F_C > F_B,$$

тут F – магніторушійна сила обмоток трансформатора; R_m – магнітний опір магнітопроводу.

Тому в режимі холостого ходу для трифазного стержневого трансформатора спостерігається несиметрія струмів холостого ходу.

$$I_{0A} = I_{0C} > I_{0B}.$$

При переході до навантажувального режиму роботи несиметрія струмів по фазах практично не спостерігається, оскільки намагнічуючий струм складає кілька відсотків від номінального струму.

Прикладом трансформатора з незалежною магнітною системою є трифазний трансформатор, що складається з трьох однофазних трансформаторів, так звана трифазна **трансформаторна група**.

Принципова схема цього трансформатора представлена на рис.2.6.

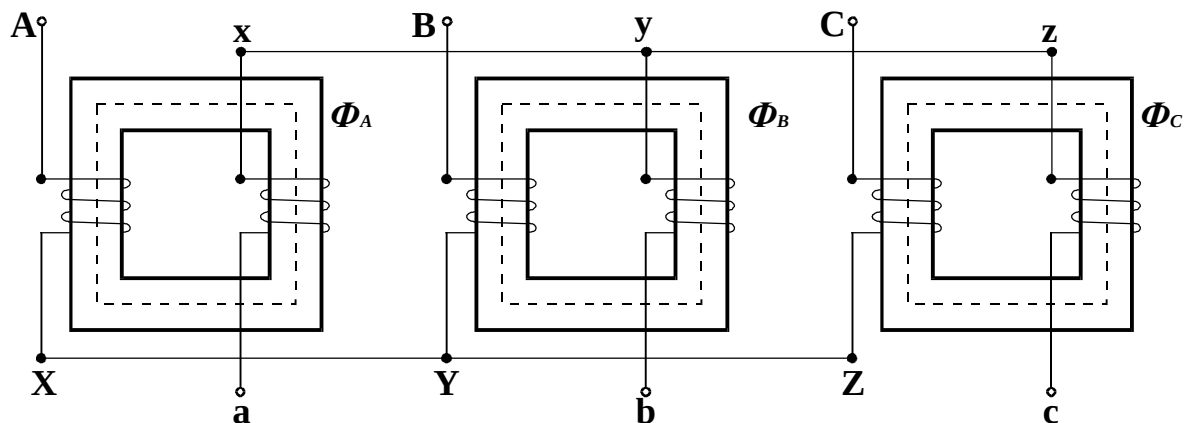


Рис. 2.6 Трифазна трансформаторна група

Контури проходження магнітних потоків для кожної з фаз у такому трансформаторі однакові, тому несиметрії струмів холостого ходу не спостерігається.

Прикладом трансформатора з майже незалежною магнітною системою є броньовий трансформатор (1.3, б). У цього трансформатора несиметрія струму холостого ходу по фазах незначна.

2.4 Фізичні умови роботи трансформатора при короткому замиканні, основні співвідношення і векторна діаграма

Коротким замиканням (к.з.) трансформатора називається такий режим його роботи, коли до первинної обмотки підводиться визначеної величини перемінна напруга, а вторинна обмотка замкнута накоротко.

Розрізняють два види (режими) короткого замикання:

1. Раптове коротке замикання, яке має місце в умовах експлуатації трансформатора, тобто коли до трансформатора підводиться номінальна напруга. Це аварійний режим, оскільки за дуже короткий проміжок часу струми в обмотках можуть перевищити в десятки разів номінальні струми. При цьому порушується тепловий режим трансформатора і між обмотками діють значні динамічні зусилля. Цей режим тим небезпечніший, чим більша потужність і габарити трансформатора. Трансформатори мають максимальний струмовий захист від раптових коротких замикань.

2. Випробування трансформатора в режимі короткого замикання, тобто коли до трансформатора підводиться знижена напруга $U_{1к}$ такого значення, щоб струми в обмотках трансформатора були номінальними. Цю напругу називають **номінальною напругою короткого замикання** трансформатора. Її виражають у відсотках від номінального $U_{1н}$ і вказують в паспорті трансформатора

$$U_k \% = \frac{U_{1к}}{U_{1н}} \cdot 100 \% . \quad (2.13)$$

В силових трансформаторах напруга к.з. складає $(2...10)\% U_{1н}$.

Розглянемо фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання на прикладі схеми однофазного двохомоткового трансформатора (рис.2.7), коли до первинної обмотки підведена знижена напруга $U_{1к}$.

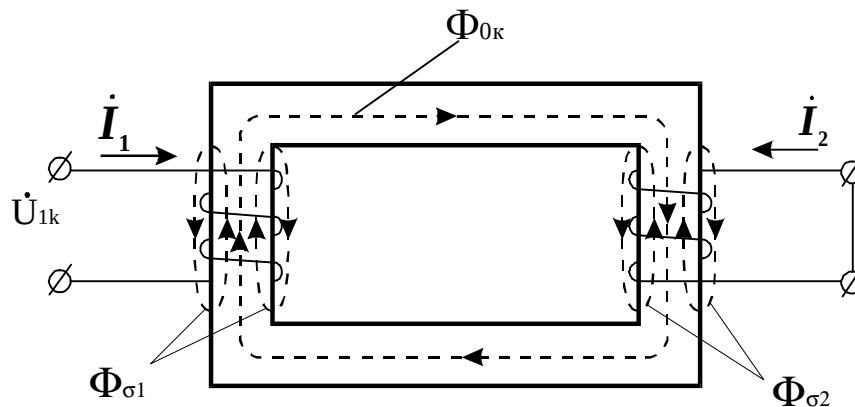


Рис. 2.7 Однофазний двохомотковий трансформатор

Якщо до первинної обмотки підведена змінна напруга $U_{1к}$, а вторинна обмотка замкнута накоротко, то по обмотках будуть протікати струми I_1 і I_2 .

Під дією МРС первинної $I_1 w_1$ і вторинної $I_2 w_2$ обмоток в трансформаторі створюється магнітне поле, яке доцільно представити у виді магнітних потоків: $\Phi_{0к}$ – основний магнітний потік при короткому замиканні; Φ_{s1} і Φ_{s2} – потоки розсіювання первинної і вторинної обмоток.

Потік $\Phi_{0к}$ індукує в первинній обмотці ЕРС $E_{1к}$, у вторинній – $E_{2к}$.

Φ_{s1} – індукує в первинній обмотці E_{s1} ;

Φ_{s2} – індукує у вторинній обмотці E_{s2} .

Такі фізичні умови роботи трансформатора в режимі короткого замикання.

Якщо до трансформатора підведене знижена синусоїдальна напруга, то магнітний потік $\Phi_{0к}$ незначний і насичення магнітної системи не настає, тому ЕРС і струми в трансформаторі змінюються по синусоїдальному закону.

З урахуванням схеми включення обмоток при короткому замиканні, рів-

новаги напруг для контурів первинної і вторинної обмоток запишуться у виді

$$\dot{U}_{1\kappa} = -\dot{E}_{1\kappa} + \dot{I}_1 Z_1; \quad (2.14)$$

$$\dot{E}'_{2\kappa} = \dot{I}_1 Z'_2 + \dot{U}'_2, \quad (2.15)$$

де $\dot{U}'_2 = 0$.

Рівняння МРС для режиму короткого замикання запишемо з урахуванням наступної обставини: оскільки при номінальній підведеній напрузі, струм холостого ходу складає $(3 \div 8)\%$ від номінального струму $I_{1н}$, то при зниженій напрузі струм холостого ходу дуже малий і ним можна знехтувати. Отже в цьому випадку можна записати

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = 0; \quad \text{або} \quad \dot{I}_1 = -\dot{I}'_2. \quad (2.16)$$

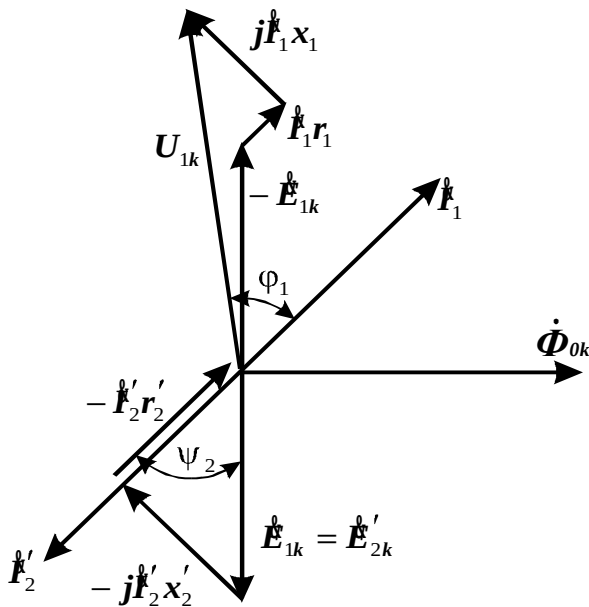


Рис. 2.8 Векторна діаграма трансформатора в режимі короткого замикання

Використовуючи розглянуті основні рівняння і знання фізичних процесів, установимо фазові співвідношення між ЕРС, напругами і струмами в режимі короткого замикання шляхом побудови векторних діаграм (рис.2.8).

Відкладаємо вектор $\dot{\Phi}_{ок}$. ЕРС $\dot{E}_{1\kappa}$ і $\dot{E}'_{2\kappa}$ відстають від $\dot{\Phi}_{ок}$ на кут $\pi/2$. Струм вторинної обмотки $\dot{I}'_2$, що циркулює по замкнутому контурі, зустрічає на своєму шляху опори r'_2 і x'_2 . Отже, цей струм буде відстаючим стосовно ЕРС $\dot{E}'_2$

$$y_2 = \arctg \frac{x'_2}{r'_2}. \quad (2.17)$$

Згідно рівняння МРС (2.16) відкладаємо вектор струму первинної обмотки рівний по величині і протилежний вектору $\dot{I}'_2$. Згідно рівняння напруг для вторинної обмотки $\dot{E}'_{2\kappa} = \dot{I}_1 Z'_2$ (2.15), підсумуємо вектори спаду напруги $\dot{I}'_2 r'_2$ і $j\dot{I}'_2 x'_2$. Завершуємо побудову векторної діаграми визначенням вектора $\dot{U}_{1\kappa}$, відповідно до рівняння (2.14) для контуру первинної обмотки.

Отримана векторна діаграма режиму короткого замикання має головним чином теоретичне значення з тієї причини, що в трансформаторі дуже складно одержати роздільно значення опорів x_1 і x'_2 , тобто в досвіді короткого замикання одержують суму опорів $x_1 + x'_2 = x_k$.

2.5 Схема заміщення трансформатора при короткому замиканні і трикутник короткого замикання

Перетворимо основні рівняння режиму короткого замикання трансформатора

$$\mathcal{U}_{1k} = -\mathcal{E}_{1k} + \mathcal{I}_1 Z_1; \quad \mathcal{E}'_{2k} = \mathcal{I}'_1 Z'_2; \quad \mathcal{I}_1 = -\mathcal{I}'_2,$$

з врахуванням того, що $\mathcal{E}_{1k} = \mathcal{E}'_{2k}$, у такий спосіб

$$\begin{aligned} \mathcal{U}_{1k} &= -\mathcal{I}'_2 Z'_2 + \mathcal{I}_1 Z_1 = \mathcal{I}'_1 Z'_2 + \mathcal{I}_1 Z_1 = \mathcal{I}_1 (r'_2 + jx'_2) + \mathcal{I}_1 (r'_1 + jx'_1) = \\ &= \mathcal{I}_1 (r_1 + r'_2) + \mathcal{I}_1 j(x_1 + x'_2) = \mathcal{I}_1 r_k + j\mathcal{I}_1 x_k = \mathcal{I}_1 Z_k, \end{aligned} \quad (2.18)$$

де $r_k = r_1 + r'_2$ – активний опір режиму короткого замикання трансформатора;
 $x_k = x_1 + x'_2$ – реактивний опір режиму короткого замикання трансформатора.

З отриманого рівняння (2.18) випливає

$$\mathcal{I}_1 = \frac{\mathcal{U}_{1k}}{Z_k} = \frac{\mathcal{U}_{1k}}{Z_1 + Z'_2}. \quad (2.19)$$

Це рівняння для струму говорить про те, що схему заміщення трансформатора в режимі короткого замикання можна представити електричним колом із двох послідовно з'єднаних опорів Z_1 і Z'_2 (рис.2.9).

Відповідно до основного рівняння (2.18) режиму к.з. трансформатора, векторна діаграма цього режиму наведена на рис.2.10.

Представлений на векторній діаграмі прямокутний трикутник ABC називається **трикутником короткого замикання трансформатора** (рис.2.11).

Цей трикутник має катети:

$CB = \mathcal{I}_1 r_1 + \mathcal{I}_1 r'_2 = \mathcal{I}_1 r_k = \mathcal{U}_{ka}$ – активна складова напруги короткого замикання трансформатора;

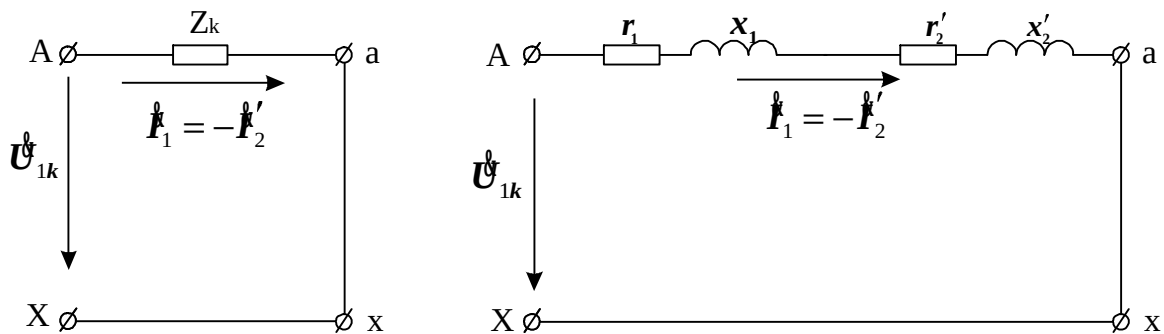


Рис. 2.9 Схеми заміщення трансформатора в режимі короткого замикання

$AB = I_1 x_1 + I_1 x_2' = I_1 x_k = U_{kp}$ – реактивна складова напруги короткого замикання трансформатора.

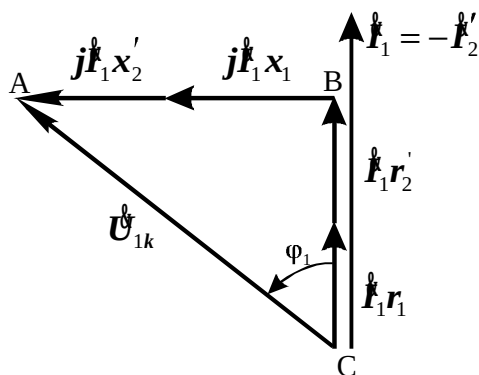


Рис. 2.10 Спрощена векторна діаграма трансформатора в режимі к.з.

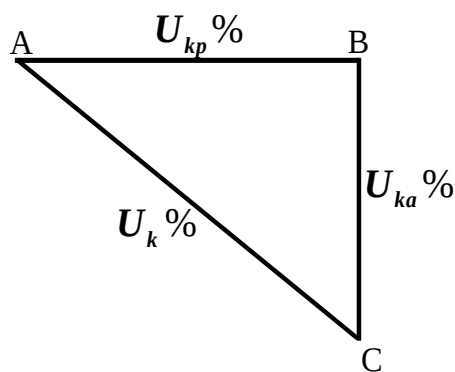


Рис. 2.11 Трикутник короткого замикання.

Трикутник короткого замикання, як буде встановлено далі, використовується при розрахунках навантажувального режиму трансформатора. При цьому він, як правило, будується для значення струму $I = I_n$ і представляється не у виді векторів, а у виді прямокутного трикутника зі сторонами

$$U_{ka} \% = \frac{U_{1ka}}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{I_{1n} r_k}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (2.20)$$

$$U_{kp} \% = \frac{U_{1kp}}{U_{1n}} \cdot 100\% = \frac{I_{1n} x_k}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (2.21)$$

$$U_k \% = \frac{U_{1k}}{U_{1n}} \cdot 100\% \quad (2.22)$$

Трикутник на рис. 2.11 називається основним трикутником короткого замикання.

2.6 Дослід короткого замикання трансформатора

Дослідження трансформатора в режимі короткого замикання має за мету:

- розрахувати параметри короткого замикання трансформатора;
- розрахувати основний трикутник короткого замикання.

Схема досліду короткого замикання для однофазного двохобмоткового трансформатора представлена на рис.2.12.

До трансформатора підводиться знижена напруга такого значення, щоб струм у первинній обмотці був номінальним.

Вимірюють: U_{1k} – напруга, що підводиться; I_{1k} – струм короткого замикання; P_k – потужність, яку споживає трансформатор при короткому замиканні.

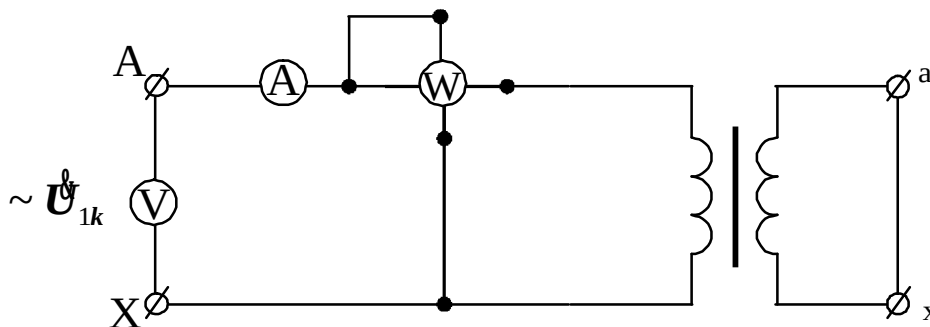


Рис. 2.12 Схема досліду короткого замикання трансформатора

Розраховують:

- повний опір трансформатора в режимі короткого замикання

$$Z_k = \frac{U_{1k}}{I_{1k}}; \quad (2.23)$$

- активний опір трансформатора в режимі короткого замикання

$$r_k = \frac{P_k}{I_{1k}^2}; \quad (2.24)$$

- індуктивний опір трансформатора в режимі короткого замикання:

$$x_k = \sqrt{Z_k^2 - r_k^2} = \sqrt{\left(\frac{U_{1k}}{I_{1k}}\right)^2 - \left(\frac{P_k}{I_{1k}^2}\right)^2}. \quad (2.25)$$

Опір r_k приводять до температури 75° (робочої температури трансформатора).

Сторони трикутника короткого замикання розраховують по залежностях:

$$U_{ka} \% = \frac{I_{1k} r_k}{U_{1H}} \cdot 100\%;$$

$$U_{kp} \% = \frac{I_{1H} x_K}{U_{1H}} \cdot 100 \% ;$$

$$U_K \% = \frac{U_{1K}}{U_{1H}} \cdot 100 \% .$$

У випадку трифазного трансформатора за показаннями приладів визначаються середні значення лінійної напруги $U_{K.L}$, лінійного струму $I_{K.L}$ і потужності короткого замикання трьох фаз P_K . При з'єднанні первинної обмотки зіркою параметри короткого замикання на фазу будуть наступні:

$$z_K = \frac{U_{K.L}}{\sqrt{3}I_{K.L}} ; r_K = \frac{P_K}{3I_{K.L}^2} ; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} , \quad (2.26)$$

а при з'єднанні первинної обмотки трикутником:

$$z_K = \frac{\sqrt{3}U_{K.L}}{I_{K.L}} ; r_K = \frac{P_K}{I_{K.L}^2} ; x_K = \sqrt{z_K^2 - r_K^2} . \quad (2.27)$$

Коефіцієнт потужності при короткому замиканні визначається по формулам, аналогічним (2.5) і (2.9).

Відповідно до схеми заміщення приведенного трансформатора рис.1.20, опір короткого замикання

$$Z_K = Z_1 + \frac{Z_m Z'_2}{Z_m + Z'_2} . \quad (2.28)$$

Так як Z_m у сотні разів більше $Z_{\ell 2}$, то в знаменнику (2.28) можна знехтувати $Z_{\ell 2}$ у порівнянні з Z_m . Тому з великою точністю можна записати:

$$Z_K = Z_1 + Z'_2 ; r_K = r_1 + r'_2 ; x_K = x_1 + x'_2 . \quad (2.29)$$

Ці співвідношення відповідають спрощеній схемі заміщення рис.1.29 при замкнутих накоротко вторинних затисках ($U_{\ell 2} = 0$).

Тому що x і x_K визначаються потоками, що замикаються по повітрю, то їх значення, а також значення z_K не залежить від U_K і I_K .

Величина ЕРС E_{1K} у досліді короткого замикання при $I_K = I_H$ в 15-30 разів менша U_{1H} . При цьому магнітні втрати в 225-900 разів менші, ніж у випадку U_1

$= U_{1n}$, і дуже малі. Тому потужність короткого замикання P_k з великою точністю представляють собою потужність електричних втрат в обмотках, включаючи додаткові втрати в стінках бака і кріпильних деталях від потоків розсіювання трансформатора.

Контрольні питання

1. Які фізичні процеси відбуваються в трансформаторі, що працює в режимі холостого ходу?
2. Чи буде змінюватися струм холостого ходу і як, при збільшенні або зменшенні площі перерізу стержнів магнітопровода?
3. Чи зміниться основний магнітний потік і струм холостого ходу, якщо трансформатор включити в мережу з частотою що вище або нижче від номінальної?
4. Які фізичні процеси відбуваються в трансформаторі, що працює в режимі короткого замикання?
5. Які розрізняють види короткого замикання?
6. До якої обмотки доцільно підводити напругу при досвіді холостого ходу і короткого замикання? Пояснити чому.
7. На що витрачається активна потужність, яку споживає трансформатор при досвідах холостого ходу і короткого замикання?
8. Чим визначається несиметрія струмів холостого ходу в трифазному трансформаторі?
9. Як дослідним шляхом визначити напругу короткого замикання?
10. Що являє собою трикутник короткого замикання?

Глава 3. Навантажувальний режим роботи трансформатора

3.1 Фізичні умови роботи трансформатора під навантаженням, основні рівняння і векторні діаграми

Холостий хід і коротке замикання є граничними режимами роботи трансформатора:

$$\text{при х.х.} \quad Z_H = \infty; \quad \text{при к.з.} \quad Z_H = 0.$$

У навантажувальному режимі роботи трансформатора
 $0 < Z_H < \infty$.

У загальному випадку навантаження трансформатора може бути:

$$\left. \begin{array}{l} Z_H = R_H - \text{активне;} \\ Z_H = X_{LH} - \text{індуктивне;} \\ Z_H = X_{CH} - \text{ємнісне;} \end{array} \right\} \begin{array}{l} Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_{LH}^2} \\ Z_H = \sqrt{R_H^2 + X_{CH}^2} \end{array} \text{змішане}$$

Для вивчення фізичних умов роботи трансформатора під навантаженням, скористаємося принциповою схемою однофазного двохобмоткового трансформатора (рис. 3.1).

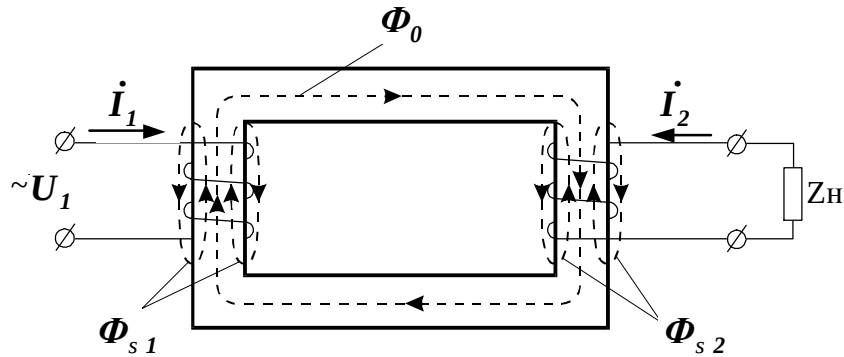


Рис. 3.1 Однофазний двохобмотковий трансформатор

Приймаємо умову, що до первинної обмотки підведена синусоїдальна напруга $\dot{U}_1$. Якщо вторинна обмотка трансформатора замкнута на деякий опір навантаження Z_H , то по первинній і вторинній обмотках будуть протікати струми $\dot{I}_1$ і $\dot{I}_2$. Під дією МРС первинної $I_1 w_1$ і вторинної $I_2 w_2$ обмоток в трансформаторі утвориться магнітне поле, що, як відзначалося, представляється потоками Φ_0 , Φ_{s1} , Φ_{s2} .

Потік Φ_0 індукуює в первинній обмотці ЕРС E_1 , і у вторинній обмотці E_2 .

Потік Φ_{s1} індукуює в первинній обмотці ЕРС E_{s1} .

Потік Φ_{s2} індукуює у вторинній обмотці ЕРС E_{s2} .

Оскільки до трансформатора підведене синусоїдальна напруга, то ЕРС напруги і струми також змінюються по синусоїдальному закону. Тому основні рівняння цього режиму доцільно записати в комплексній формі.

Рівняння напруг для приведенного трансформатора

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \quad (3.1)$$

$$\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'. \quad (3.2)$$

Рівняння МРС

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2' = \dot{I}_0. \quad (3.3)$$

Як відзначалося, ці рівняння справедливі не тільки для однофазного трансформатора, але також для кожної фази трифазного трансформатора при симетричному навантаженні.

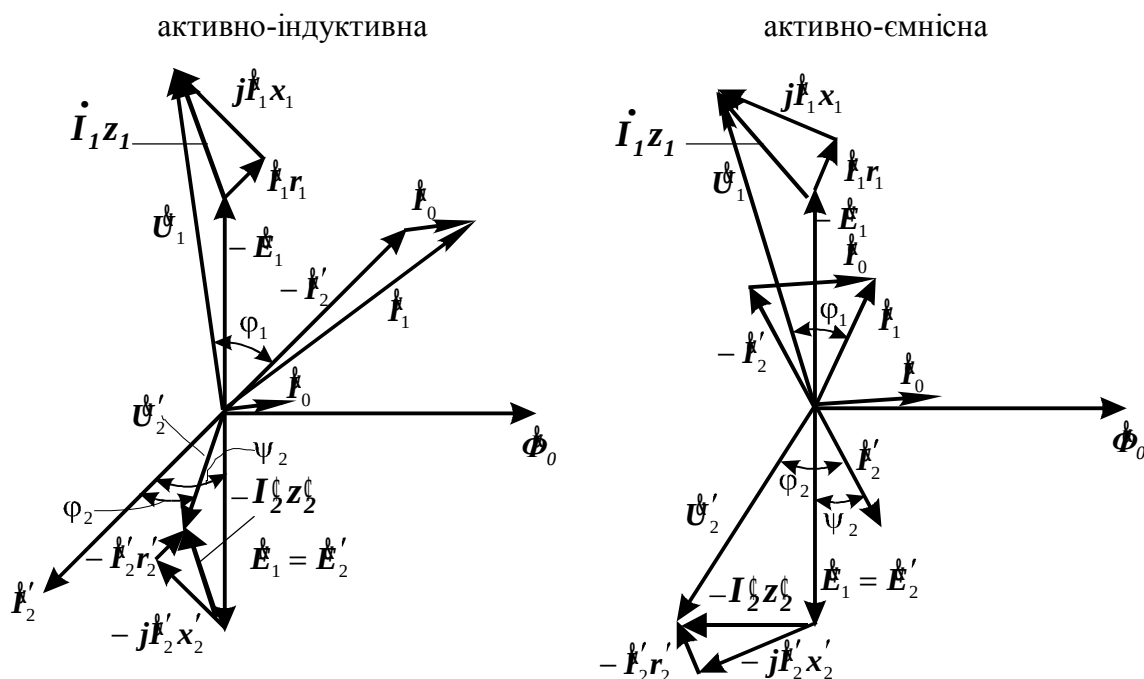


Рис. 3.2 Векторні діаграми трансформатора при активно-індуктивних (а) і активно-ємнісних (б) навантаженнях

Розглянемо фазові співвідношення між E , U і I шляхом побудови векторних діаграм для режимів активно-індуктивного й активно-ємнісного навантажень трансформатора.

Відкладаємо вектор магнітного потоку Φ_0 . Вектори ЕРС $\dot{E}_1$ і $\dot{E}_2'$ відстають по фазі від Φ_0 на кут $\pi/2$. При активно-індуктивному навантаженні струм $\dot{I}_2'$ відстає по фазі від $\dot{E}_2'$ на кут ψ_2 . При активно-ємнісному навантаженні струм $\dot{I}_2'$ випереджає $\dot{E}_2'$ на кут ψ_2 .

Використовуючи рівняння МРС знаходимо вектор струму $\dot{I}_1$. При цьому рівняння використовується у виді $\dot{I}_1 = -\dot{I}_2' + \dot{I}_0$

Використовуючи рівняння $\dot{U}_2' = \dot{E}_2' - \dot{I}_2' Z_2'$ знаходимо вектор напруги $\dot{U}_2'$.

Використовуючи рівняння $\mathcal{U}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{I}_1 Z_1$ знаходимо вектор напруги $\mathcal{U}_1$.

Розглянуті векторні діаграми мають головним чином теоретичне значення, оскільки вони цілком враховують усі фактори від яких залежать фазові співвідношення між ЕРС, напругами і струмами.

Практичного значення ці векторні діаграми не мають з тієї причини, що в трансформаторі не представляється можливим одержати роздільно значення індуктивних опорів x_1 і x'_2 , тобто з досвіду короткого замикання можна визначити тільки їхню суму $x_k = x_1 + x'_2$.

3.2 Спрощена схема заміщення і спрощені векторні діаграми трансформатора, що працює під навантаженням

При практичних розрахунках навантажувальних режимів роботи силових трансформаторів як правило, нехтують намагнічуючим струмом, оскільки він складає $(3 \div 8)\%$ від номінального струму $I_{1н}$. У цьому випадку основні рівняння трансформатора для навантажувального режиму роботи приймають наступний вид :

$$\mathcal{U}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{I}_1 Z_1 \quad (3.4)$$

$$\mathcal{U}'_2 = \mathcal{E}'_2 - \mathcal{I}'_2 Z'_2 \quad (3.5)$$

$$\mathcal{I}_1 = -\mathcal{I}'_2 \quad (3.6)$$

З огляду на те, що $\mathcal{E}_1 = \mathcal{E}'_2$, виконаємо наступні перетворення

$$\begin{aligned} \mathcal{U}_1 &= -\mathcal{I}'_2 Z'_2 - \mathcal{U}'_2 + \mathcal{I}_1 Z_1 = \mathcal{I}_1 Z'_2 - \mathcal{U}'_2 + \mathcal{I}_1 Z_1 = \\ &= \mathcal{I}_1 (Z_1 + Z'_2) - \mathcal{U}'_2 = \mathcal{I}_1 Z_k - \mathcal{U}'_2 \end{aligned} \quad (3.7)$$

З отриманого рівняння випливає, що первинна напруга $\mathcal{U}_1$ відрізняється від вторинної напруги $(-\mathcal{U}'_2)$ на величину спаду напруги $\mathcal{I}_1 Z_k$, що являє собою трикутник короткого замикання трансформатора. При прийнятому допущенні схема заміщення трансформатора в навантажувальному режимі представлена на рис.3.3.

Приведена схема заміщення (рис. 3.3) справедлива для однофазного двохобмоткового трансформатора. Однак вона також справедлива для кожної фази трифазного трансформатора при симетричному навантаженні.

Відповідно до зроблених перетворень основних рівнянь, векторна діаграма навантажувального режиму роботи представлена на рис. 3.4 (при побудові векторної діаграми вважаємо заданими $\mathcal{U}_1$, $\mathcal{I}_1$, j_1).

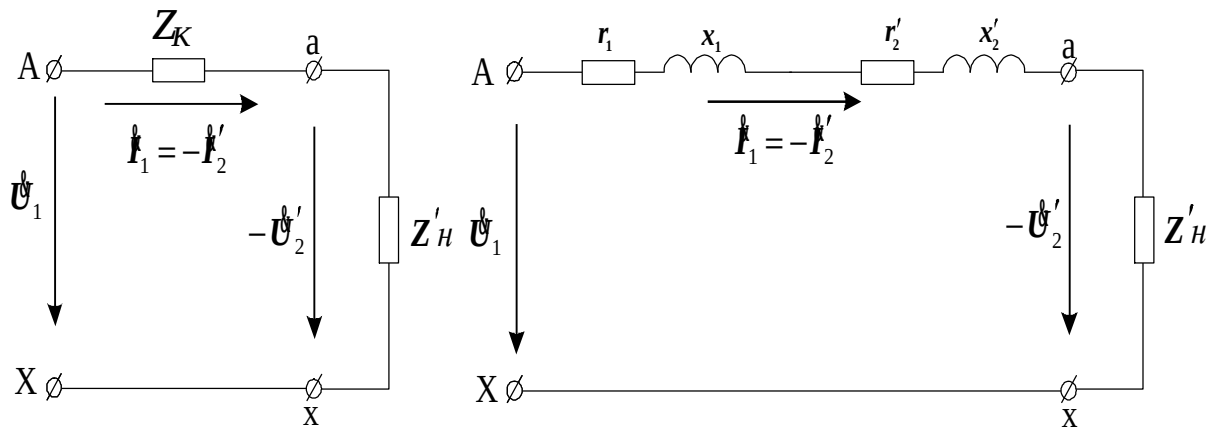
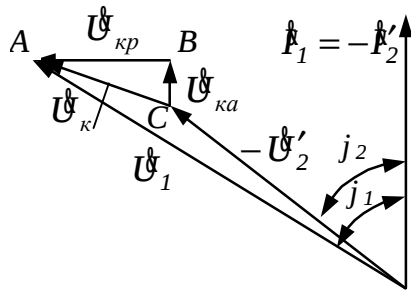


Рис. 3.3 Спрощені схеми заміщення трансформатора, що працює під навантаженням.

а.

(R-L) – навантаження



б.

(R-C) – навантаження

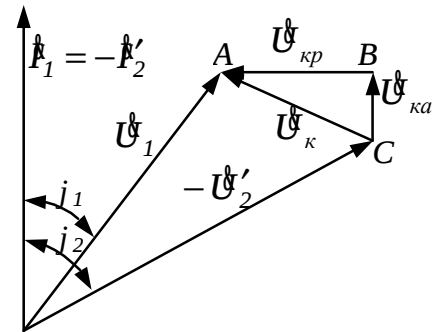


Рис. 3.4 Спрощені векторні діаграми трансформатора при змішаному активно-індуктивному (а) і активно-ємнісному (б) навантаженнях

Приведені векторні діаграми називають спрощеними векторними діаграмами трансформатора, що працює під навантаженням. В результаті побудови діаграми знаходимо вектор вихідної напруги ($-U'_2$).

3.3 Залежність вихідної напруги трансформатора від роду навантаження

Проаналізуємо, яким чином змінюється вихідна напруга трансформатора, якщо при незмінному струмі, змінився рід навантаження. Тобто спочатку було (R-L) навантаження, а потім (R-C).

Цей аналіз зручно зробити шляхом побудови поєднаної векторної діаграми для (R-L) і (R-C) навантажень.

Як впливає з приведеної векторної діаграми (рис. 3.5), при переході від (R-L) - навантаження до (R-C) - навантаження при незмінному значенні струму в обмотках, вихідна напруга трансформатора збільшується.

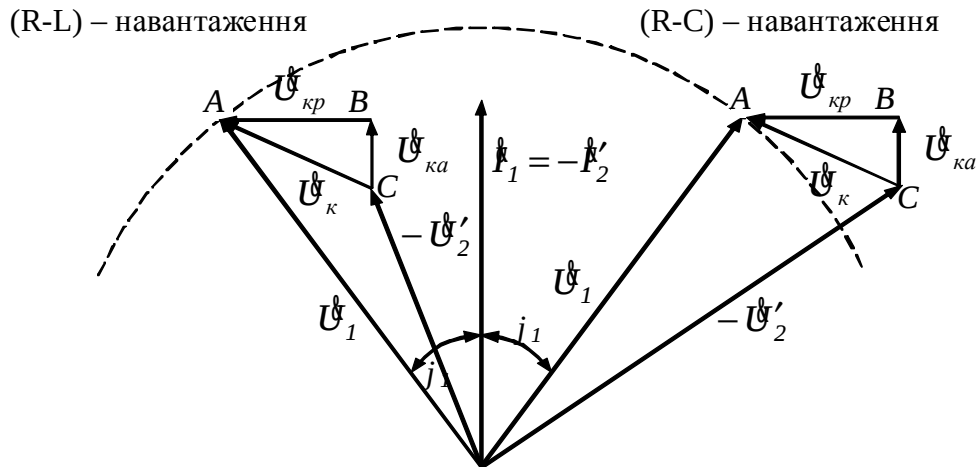


Рис. 3.5 Поєднана векторна діаграма для активно-індуктивного і активно-ємнісного навантаження.

3.4 Зміна вихідної напруги трансформатора

Більш характерним є випадок, коли рід навантаження не змінюється, тобто $\cos j_2 = \text{const}$, а змінюється величина навантаження, тобто струм вторинної обмотки трансформатора I_2 . З рівняння напруг для вторинного контуру, яке представляємо у виді $U_2 = E_2 - I_2 Z_2$, випливає, що при зміні навантаження при $E_2 = \text{const}$, вихідна напруга U_2 змінюється, так як змінюється спад напруги $I_2 Z_2$.

Залежність вихідної напруги трансформатора U_2 від струму навантаження I_2 при $\cos j_2 = \text{const}$ називається зовнішньою характеристикою трансформатора

$$U_2 = f(I_2) \text{ при } \cos j_2 = \text{const}.$$

Якщо розглянути ряд значень коефіцієнта потужності $\cos j_2$, то можна одержати сімейство зовнішніх характеристик $U_2 = f(I_2)$ (рис.3.6).

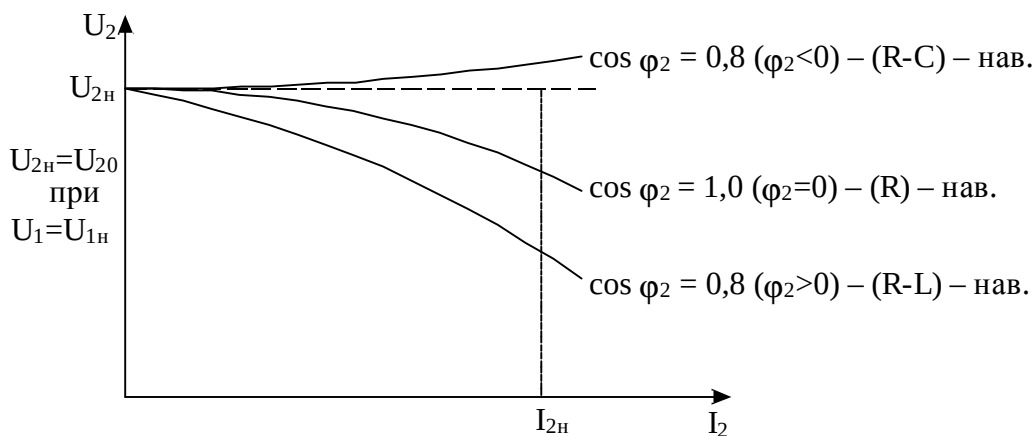


Рис. 3.6 Зовнішні характеристики трансформатора при різного роду навантаженнях

При збільшенні активного чи активно-індуктивного навантаження, вихідна напруга трансформатора зменшується, оскільки збільшується спад напруги $- \dot{I}_2 Z_2 = - \dot{I}_2 (r_2 + jx_2)$.

При збільшенні активно-ємнісного навантаження вихідна напруга трансформатора трохи збільшується за рахунок складової $- j \dot{I}_2 x_2$, що має місце при випереджальному струмі.

Відповідно до зовнішніх характеристик, зміна навантаження трансформатора приводить до зміни вихідної напруги.

Під зміною вихідної напруги трансформатора розуміють виражене у відсотках від номінальної напруги зміна напруги на вторинній обмотці при переході від режиму холостого ходу до режиму номінального навантаження, що характеризується номінальним значенням струму, тобто $I_2 = I_{2н}$.

Цю зміну напруги легко розрахувати, якщо відома відповідна зовнішня характеристика трансформатора.

$$DU\% = \frac{U_{2н} - U_2}{U_{2н}} \cdot 100 \quad \% \quad (3.8)$$

В ряді випадків, зокрема при проектуванні трансформатора, виникає необхідність у визначенні $DU\%$, однак необхідна зовнішня характеристика відсутня. В цих випадках $DU\%$ оцінюють по розрахунковій залежності

$$DU\% = U_{ка} \cos j_2 + U_{кр} \sin j_2 \quad (3.9)$$

Ця залежність визначає зміну вихідної напруги трансформатора при номінальному навантаженні.

Якщо навантаження відрізняється від номінального, то її можна характеризувати коефіцієнтом навантаження

$$k_{нг} = \frac{S_2}{S_n},$$

де S_2 – розрахункова потужність трансформатора; S_n – номінальна потужність трансформатора.

Тоді

$$DU\% = k_{нг} (U_{ка} \% \cos j_2 + U_{кр} \% \sin j_2) \quad (3.10)$$

Залежність $DU\% = f(k_{нг})$ при $\cos j_2 = const$ також являє собою зовнішню характеристику трансформатора (рис. 3.6).

3.5 Втрати і коефіцієнт корисної дії трансформатора

В процесі перетворення підведеної до трансформатора потужності P_1 в потужність P_2 , що корисно віддається, у трансформаторі мають місце втрати потужності.

Втрати в трансформаторі залежать від його режиму роботи. Тому розглянемо характеристики цих втрат в режимах холостого ходу, короткого замикання і навантажувальному режимі.

В режимі холостого ходу вторинна обмотка трансформатора розімкнута. Трансформатор споживає з мережі активну потужність P_0 , що представляє суму наступних втрат:

- електричні втрати в первинній обмотці трансформатора від струму холостого ходу;
- магнітні втрати в сталі магнітопроводу і в конструктивних деталях трансформатора.

З огляду на те, що в силових трансформаторах струм холостого ходу складає $I_0 = (3 \div 8)\% I_{1н}$, електричні втрати в первинній обмотці трансформатора малі, тому ними, як правило, нехтують. Вважають, що потужність, яка споживається з мережі P_0 в цьому режимі витрачається тільки на покриття магнітних втрат P_m .

Ці втрати поділяють на:

- 1) основні (О);
- 2) додаткові (Д).

Основні магнітні втрати $P_{м.0}$ являють собою втрати на гістерезис і вихрові струми в сталі магнітопроводу трансформатора.

Додаткові магнітні втрати – це втрати в конструктивних деталях трансформатора: баці, ярмових балках і т.д., а також втрати в місцях стиків між стержнями і ярмом. Ці втрати не піддаються точному обліку, тому для силових трансформаторів вважають, що вони складають $(15 \div 20)\%$ від $P_{м.0}$.

Таким чином, для режиму холостого ходу трансформатора можна записати, що

$$P_0 = (1,15 \div 1,2)P_{м.0}$$

В режимі короткого замикання трансформатора вторинна обмотка замкнута накоротко, а до первинної обмотки підводиться знижена напруга.

Оскільки основний магнітний потік, що проходить по магнітопроводу трансформатора в цьому режимі малий, то магнітними втратами можна знехтувати. Тому в режимі короткого замикання враховуються тільки електричні втрати, тобто втрати в первинній і вторинній обмотках трансформатора.

Ці втрати також поділяють на:

- 1) основні (О);
- 2) додаткові (Д).

Основні електричні втрати в обмотках відповідають активним опорам r_{10} і r_{20} обмоток постійному струму.

Тому можна записати

$$P_{eo} = I_1^2 r_{10} + I_2^2 r_{20} \quad (3.11)$$

Додаткові втрати в обмотках трансформатора – це втрати у відводах, а також втрати в провідниках обмоток від вихрових струмів. Ці втрати також не піддаються точному обліку. Тому їх враховують збільшенням активного опору обмоток до значень

$$r_1 = r_{10} k_{Д1} ; \quad r_2 = r_{20} k_{Д2} ,$$

де $k_{Д1}$ і $k_{Д2}$ – коефіцієнти додаткових втрат в обмотках трансформатора.

Для силових трансформаторів існують таблиці цих коефіцієнтів.

Електричні втрати в обмотках трансформатора (за умови, що знехтуємо струмом I_0) можна виразити залежністю

$$P_e = I_1^2 r_1 + I_2^2 r_2 = I_1^2 r_1 + (I_2')^2 r_2' = I_1^2 (r_1 + r_2') = I_1^2 r_k \quad (3.12)$$

Таким чином, оскільки потужність, що споживається трансформатором в режимі короткого замикання P_k витрачається на електричні втрати в обмотках, то можна записати

$$P_{кн} = P_e = I_{1н}^2 r_k , \quad (3.13)$$

тому що при к.з. $I_1 = I_{1н}$.

В навантажувальному режимі вторинна обмотка трансформатора замкнута на деякий опір навантаження. При цьому втрати потужності в трансформаторі складаються з електричних і магнітних втрат. Ці втрати залежать від значення навантаження трансформатора.

Магнітні втрати пропорційні квадрату індукції в магнітопроводі B_0^2 (при $f_1 = const$) трансформатора. Отже можна вважати, що вони пропорційні E_1^2 ($E_1 = 4,44 w_1 f_1 F_0 = 4,44 w_1 f B_0 S$). З рівняння напруг для первинної обмотки трансформатора $\mathcal{U}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{I}_1 Z_1$ видно, що ЕРС $\mathcal{E}_1$ відрізняється від підведеної напруги $\mathcal{U}_1$ на величину $\mathcal{I}_1 Z_1$. В номінальному режимі роботи трансформатора ця величина на порядок нижче підведеної напруги $\mathcal{U}_1$. Тому з достатнім ступенем точності можна вважати, що при зміні навантаження трансформатора

$$E_1 \approx U_1 = \text{const.}$$

Таким чином, магнітні втрати в трансформаторі можна вважати незалежними від значення навантаження. Тому їх називають **постійними втратами трансформатора**. Магнітні втрати трансформатора в режимі навантаження можна виразити як

$$P_0 = (1,15 \div 1,2) P_{\text{мг.0}} = P_0 = \text{const.}$$

Значення потужності холостого ходу P_0 для силових трансформаторів лімітується ДСТ.

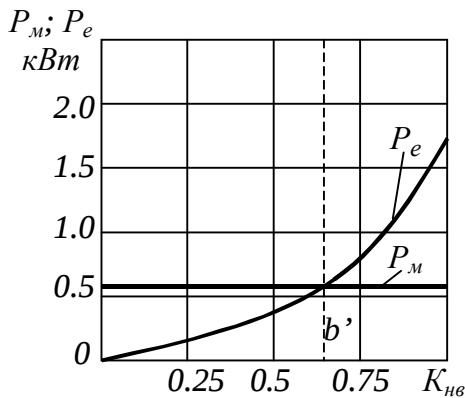


Рис. 3.7. Залежність втрат трансформатора від його навантаження

Електричні втрати P_e пропорційні квадрату струму, що протікає по обмотках. Тому ці втрати виражають через потужність короткого замикання у такий спосіб:

$$P_e = k_{\text{нв}}^2 P_{\text{кн}}, \quad (3.14)$$

де $P_{\text{кн}}$ - потужність, що споживається трансформатором в режимі короткого замикання за умови, що $I_1 = I_{1\text{н}}$.

Залежності втрат трансформатора від його навантаження показані на рис. 3.7.

Рівень $P_{\text{кн}}$ для силових трансформаторів лімітується ДСТ-ом.

Таким чином, активна потужність P_1 , що надходить з мережі в первинну обмотку трансформатора, частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e1} . Змінний магнітний потік викликає в магнітопроводі і конструктивних деталях магнітні втрати P_m . Потужність, що залишилася після цього, називається електромагнітною потужністю:

$$P_{em} = P_1 - P_{e1} - P_m,$$

яка передається у вторинну обмотку, де частково витрачається на електричні втрати в цій обмотці P_{e2} . Активна потужність, що надходить в навантаження трансформатора

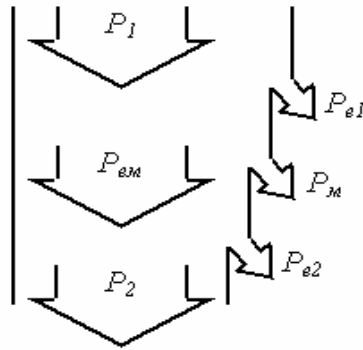


Рис. 3.8. Енергетична діаграма трансформатора

$$P_2 = P_1 - \sum P,$$

де $\sum P = P_{e1} + P_m + P_{e2}$ – сумарні втрати в трансформаторі. Усі види втрат, що супроводжують робочий процес трансформатора, показані на енергетичній діаграмі (рис. 3.8).

Коефіцієнт корисної дії (ККД) силових трансформаторів визначається загальною залежністю

$$h = \frac{P_2}{P_1},$$

де P_2 – активна потужність трансформатора, що віддається корисно; P_1 – споживана активна потужність трансформатора.

Визначити ККД трансформатора прямим виміром цих потужностей неможливо, оскільки ККД силових трансформаторів дуже високий і досягає в трансформаторах великої потужності до 99 %. При цьому велику роль грає похибка вимірів.

ККД трансформаторів, як правило, визначають непрямим методом, при якому потужність P_1 виражають через P_2 і втрати, тобто

$$P_1 = P_2 + P_m + P_e.$$

З огляду на те можна, що

$$h = \frac{P_2}{P_2 + P_m + P_e} = 1 - \frac{P_m + P_e}{P_2 + P_m + P_e}$$

З огляду на те, що

$$P_2 = k_{нв} S_n \cos \varphi_2;$$

$$P_m = P_0;$$

$$P_e = k_{нв}^2 P_{кн}$$

одержимо наступну розрахункову залежність для ККД силових трансформаторів

$$h = 1 - \frac{P_0 + k_{нв}^2 P_{кн}}{k_{нв}^2 S_n \cos j_2 + P_0 + k_{нв}^2 P_{кн}}. \quad (3.15)$$

Помноживши рівняння 3.15 на 100, одержимо ККД у відсотках.

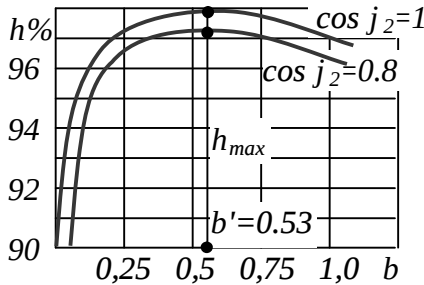


Рис. 3.9 Графік залежності ККД трансформатора від навантаження

Якщо в залежності 3.15 при $\cos j_2 = \text{const}$ задати ряд значень $k_{нв} = 0; 0,25; 0,5; 0,75; 1,0; 1,25$, то одержимо залежність $h = f(k_{нв})$ (рис.3.9). Як правило силові трансформатори мають максимальну ККД при навантаженні менше номінальної.

Це не випадково. Досвід експлуатації силових трансформаторів показав, що велику частину часу вони працюють з деяким недовантаженням, а меншу частину часу при номінальному навантаженні. Тому економічно вигідно мати максималь-

ний ККД при $k_{нв} < 1$. Щоб визначити значення $k_{нв}$ при який $h = h_{\text{max}}$, необхідно вирішити похідну $\frac{dh}{dk_{нв}} = 0$. Рішення цієї похідної дає результат $h = h_{\text{max}}$, коли

$P_0 = k_{нв}^2 P_{кн}$, тобто коли постійні втрати в трансформаторі дорівнюють змінним втратам. Звідси знаходимо значення $k_{нв}$ при якому ККД буде максимальним

$$k_{нв} = \sqrt{\frac{P_0}{P_{кн}}} \quad (3.16)$$

При побудові трансформаторів можна змінювати співвідношення між втратами в міді і стали, тобто співвідношення між масами міді і сталі.

Силові масляні трансформатори розраховуються таким чином, щоб

$$P_0 : P_{кн} \approx (1:4) \div (1:6). \quad (3.17)$$

Тому ККД має максимум при навантаженні 0,5-0,7 номінального (рис. 3.9).

3.6 Регулювання напруги трансформаторів

Спад напруги в трансформаторі і живильній мережі, коливання навантажень споживачів викликають коливання вторинної напруги трансформатора. Тому виникає необхідність регулювання напруги трансформаторів, що можна здійснити шляхом зміни коефіцієнта трансформації $k = w_1/w_2$, шляхом зміни числа витків первинної чи вторинної обмоток трансформатора. Для цієї мети

обмотка виконується з відгалуженнями, а регулювання напруги виконується з допомогою відповідного перемикаючого пристрою.

Перемикання відгалужень обмотки може виконуватися при відключенні трансформатора від мережі, або без відключення - під навантаженням. При першому способі перемикаючий пристрій простіший і дешевший, однак перемикання пов'язане з перервою енергопостачання споживачів і не може виконуватися часто. Тому цей спосіб застосовується головним чином для корекції вторинної напруги мережі понижуючих трансформаторів в залежності від рівня первинної напруги на даній ділянці мережі, а також при сезонних змінах напруги мережі в зв'язку із сезонною зміною навантаження. Переключення під навантаженням вимагає більш складного і дорогого перемикаючого пристрою і використовується в потужних трансформаторах при необхідності частого або безперервного регулювання напруги. Застосування трансформаторів з регулюванням напруги під навантаженням усе більш поширюється.

Трансформатори з перемиканням числа витків у відключеному стані (система перемикання без збудження (ПДВ)) виготовляються, відповідно до ДСТ 401-41, з регулюванням напруги щодо номінального на $\pm 5\%$ (силові трансформатори малої і середньої потужності) або на $\pm 2,5\%$ і $\pm 5\%$ (трансформатори великої потужності). У першому випадку трансформатор має три ступеня, а в другому п'ять ступеней напруги. Відгалуження доцільно виконувати на тій стороні, напруга на якій в процесі експлуатації піддається змінам. В трансформаторах, що експлуатуються при незмінній первинній напрузі $U_1 = \text{const}$ варіюють число витків w_2 у вторинній обмотці, тому що при збереженні $w_1 = \text{const}$ магнітний потік трансформатора, магнітні втрати і намагнічуючий струм залежать від відношення U_1/w_1 і залишаються майже постійними.

В трансформаторах, що експлуатуються при постійному навантаженні ($I_2 = \text{const}$) і первинній напрузі, що змінюється ($U_1 = \text{var}$), краще змінювати число витків у первинній обмотці так, щоб відношення U_1/w_1 підтримувалося приблизно постійним. При цьому магнітний потік трансформатора $\Phi = \frac{U}{w}$ при роботі

на різних ступенях (відгалуженнях) міняється мало. Як правило це сторона вищої напруги. Виконання відгалужень на стороні вищої напруги має також ту перевагу, що при цьому через велику кількість витків добір (2,5% і 5%) кількості витків може бути зроблений з великою точністю. Крім того, струм на стороні вищої напруги менше і перемикач виходить більш компактним.

Ділянки обмотки, що переключаються, між відгалуженнями, доцільно розташовувати у вікні трансформатора по висоті обмотки в середній її частині, щоб розподіл частин обмотки, навантажених струмом, було стосовно ярем при роботі на різних відгалуженнях по можливості симетричним. У протилежному випадку магнітне поле розсіювання сильно спотворюється, що приводить до збільшення індуктивних опорів розсіювання і до різкого збільшення зусиль, що

діють на обмотки при коротких замиканнях. З іншого боку, відгалуження краще виконувати з боку заземленої нейтралі (нульової точки) обмотки, тому що ізоляція перемикача при цьому полегшується.

На рис. 3.10 показані найбільш характерні схеми виконання обмоток з відгалуженнями. Схема рис. 3.10, а застосовується у випадку багатопарової циліндричної обмотки, і відгалуження розташовуються в верхньому шарі циліндричної обмотки. В схемі рис. 3.10, б обмотки виконуються з двох частин, намотаних у різні сторони, щоб ЕРС і МДС обмоток склалися, а не віднімалися.

В схемах рис. 3.10, а і б застосовується загальний перемикач для трьох фаз (рис. 3.11, а), а в схемах рис. 3.10, в и г кожна фаза має свій перемикач (рис. 3.11, б), тому що в цьому випадку між відгалуженнями різних фаз існує напруга $U \gg 0,5U_n$. Перемикачі розташовуються всередині бака трансформатора, а кінці осей перемикачів виводяться на кришку бака.

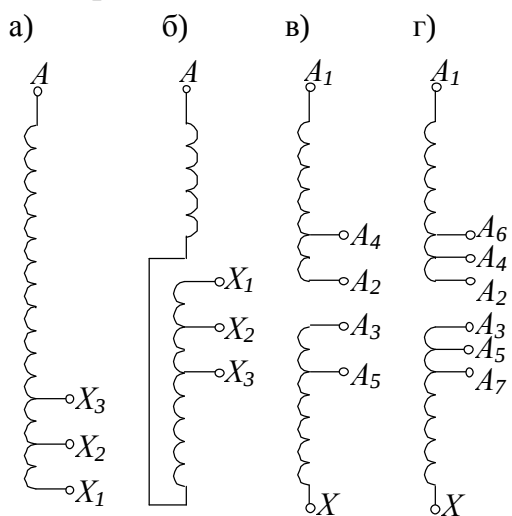


Рис. 3.10. Схеми обмоток з відгалуженнями для регулювання напруги

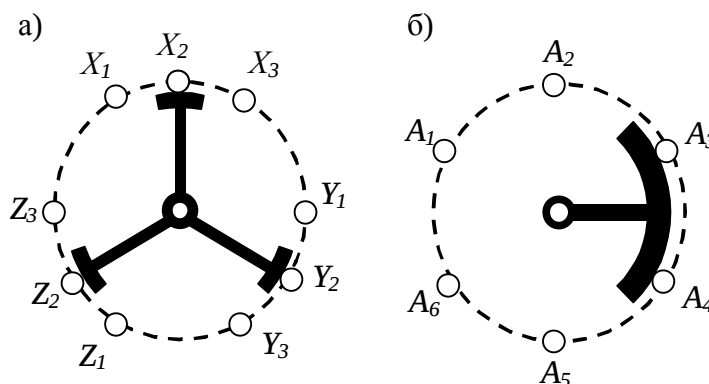


Рис. 3.11. Схеми перемикачів для регулювання напруги

Трансформатори з регулюванням напруги під навантаженням (РПН), як правило, розраховані для регулювання напруги в межах $\pm 10\%$ через 1%. У цих трансформаторах перехід з однієї ступені на іншу повинний відбуватися без розриву кола струму. Тому в проміжному положенні включені два сусідніх відгалуження обмотки і частина обмотки між ними виявляється замкнутою накоротко. Для обмеження струму короткого замикання застосовуються струмообмежуючі реактивні або активні опори.

На рис. 3.12 приведена схема перемикання з струмообмежуючим реактором P і показано п'ять послідовних позицій при переході з відгалуження X_1 (позиція а) на відгалуження X_2 (позиція д). У кожній із двох віток схеми перемикача є контактори (K_1, K_2) для вимикання струму з даної вітки перед її перемиканням і рухливі контакти перемикача (Π_1, Π_2), що розраховані для перемикання віток без струму.

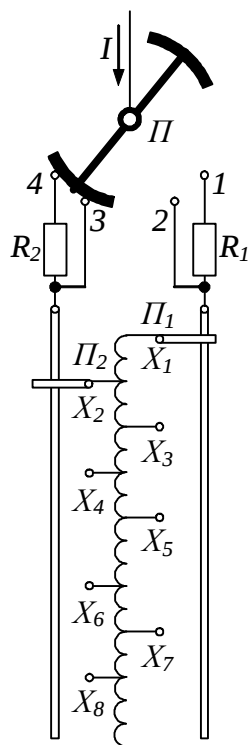


Рис. 3.13. Схема регулювання напруги під навантаженням з використанням активних струмообмежуючих резисторів

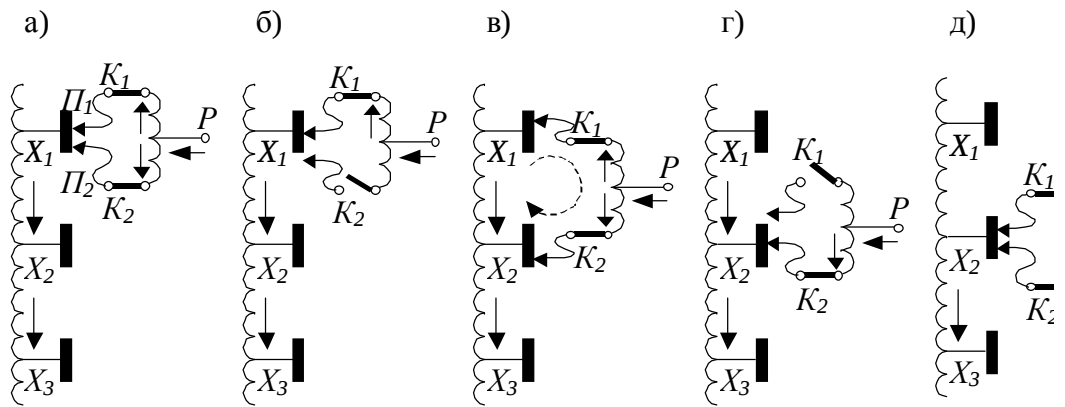


Рис. 3.12 Схеми регулювання напруги під навантаженням з використанням струмообмежуючого реактора

У нормальному робочому положенні (позиції *а* і *д*) струми двох віток схеми обтікають дві половини обмотки реактора в різних напрямках. Тому потік у сердечнику реактора практично відсутній і індуктивний опір реактора малий. Навпаки, струм короткого замикання ступені, що виникає при проміжному положенні перемикача і показаний на рис. 3.12, *в* переривчастою лінією, обтікає всю обмотку реактора в однаковому напрямку, при цьому сердечник реактора намагнічується й опір реактора стосовно цього струму великий.

Реактор *P* і перемикач *П* містяться всередині бака трансформатора, а контактори *K* – у спеціальному додатковому баці, що монтується на бічній стінці бака трансформатора. При такому пристрої масло в баці трансформатора захищено від забруднення, викликуваного роботою контакторів при розриві ними ланцюга струму.

Найбільше поширення для регулювання напруги під навантаженням одержав **перемикаючий пристрій з струмообмежувачами резисторами**, схема якого для однієї фази показана на рис. 3.13. Перемикання під навантаженням виконується за допомогою швидкодіючого перемикача *П* і двох перемикачів *П*₁, *П*₂. Швидкодіючий перемикач *П* разом з струмообмежувачими резисторами *R*₁ і *R*₂ встановлюється в окремому баці, заповненому маслом. Він розраховується на струм, що з'являється при замиканні сусідніх відгалужень. Перемикачі *П*₁ і *П*₂ можуть переводитися з одного відгалуження на інше при відсутності струму в їхньому колі. На рис. 3.13 показане положення перемикачів *П* і *П*₁, при якому трансформатор працює на відгалуженні *X*₂. Для переходу на відгалуження *X*₁ попередньо на це відгалуження переводять перемикач *П*₁, а потім перемикач *П* під дією відповідного механізму швидко перекидається в положення, в якому він приєднується до контактів 1 і 2. Послідовність розмикання контактів 3 і 4 і замикання контактів 1 і 2 при цьому розраховано так, що коло робочого струму

I не розривається. Швидко, за соті долі секунди, перемикання необхідне для того, щоб резистори R_1 і R_2 не перегрілись.

Контрольні питання

1. Які фізичні процеси відбуваються в трансформаторі, що працює під навантаженням?
2. Рід навантаження трансформатора?
3. Чому із збільшенням струму навантаження трансформатора збільшується струм в його первинній обмотці?
4. Що називають зовнішньою характеристикою трансформатора і як її одержати?
5. Залежність зміни вихідної напруги трансформатора від величини і роду навантаження?
6. Електрична схема заміщення трансформатора, фізичний зміст її параметрів і дослідне їх визначення.
7. Пояснити порядок побудови векторної діаграми трансформатора при різного роду навантаженнях.
8. При яких умовах і чому вторинна напруга трансформатора стає більше ЕРС?
9. Регулювання напруги зміною числа витків вторинної обмотки.
10. Регулювання напруги зміною магнітного потоку?
11. Фізичні процеси при зміні числа витків первинної (вторинної) обмотки трансформатора.
12. Електричні схеми переключення регулювальних відпайок в трансформаторах з ПБЗ; діапазон зміни напруги.
13. Електрична схема переключення регулювальних відпайок в трансформаторах із РПН і принцип їхньої роботи з індуктивним струмообмежуючим опором.
14. Що називають ККД трансформатора?

Глава 4. Несиметричні режими трансформаторів

4.1 Умови роботи трансформаторів при несиметричних навантаженнях

При експлуатації силових трансформаторів вони знаходяться в найкращих умовах, коли кожна фаза знаходиться в однакових умовах, тобто має місце симетричний режим роботи.

Симетричний режим роботи 3-х фазного трансформатора має місце при виконанні наступних умов:

- до трансформатора підведена трифазна симетрична напруга живлення від мережі;
- навантаження по фазах розподілено рівномірно, тобто $Z_{нв.а} = Z_{нв.б} = Z_{нв.с}$, це значить, що опір навантаження фаз однаковий по модулю і аргументу ($Z_n = Ze^{jj}$)

При симетричному режимі роботи трансформатора магнітні потоки фаз утворюють симетричну систему. Отже, основні рівняння для однієї з фаз трансформатора будуть справедливі і для інших фаз. Однак в умовах експлуатації силових трансформаторів можливі несиметричні режими. Для трифазних трансформаторів це має місце в наступних випадках:

- до трансформатора підведена несиметрична напруга живлення від мережі;
- навантаження по фазах розподілене нерівномірно.

Якщо перший випадок зустрічається рідко, тобто з лінії електропередачі (ЛЕП) до трансформатора, як правило, підводиться симетрична синусоїдальна напруга, то другий випадок зустрічається частіше, тобто навантаження по фазах силового трансформатора не завжди розподілене рівномірно.

Причини нерівномірного навантаження силових трансформаторів наступні:

- а) включення потужних однофазних споживачів;
- б) нерівномірний розподіл освітлювального навантаження по фазах;
- в) при аварійних режимах в мережі, зв'язаних із трансформатором, тобто одно- і двофазних коротких замиканнях.

В несиметричних режимах спостерігається ряд явищ, що негативно позначаються на роботі силового трансформатора:

- має місце нерівномірне токове навантаження по фазах, тобто одні фази можуть бути перевантажені, інші недовантажені;
- можливе порушення теплового режиму трансформатора, оскільки токове навантаження окремих фаз може перевищувати номінальну;
- спостерігається несиметрія фазних напруг первинної і вторинної обмоток, в результаті чого напруги окремих фаз може перевищити номінальне.

4.2 Метод аналізу несиметричних режимів трансформатора

Основним методом аналізу несиметричних режимів трансформаторів і інших машин змінного струму є **метод симетричних складових**. Метод симетричних складових заснований на тім, що будь-яку несиметричну систему трифазних струмів і напруг можна розкласти на три симетричні системи: прямої, зворотної і нульової послідовності фаз. З іншого боку, якщо системи струмів або напруг є складовими несиметричної системи, то цю несиметричну систему можна одержати підсумовуванням відповідних векторів симетричної системи (рис. 4.1).

Отримане підсумовування векторів струмів симетричних систем з метою одержати вектори струмів несиметричної системи записуються у такий спосіб

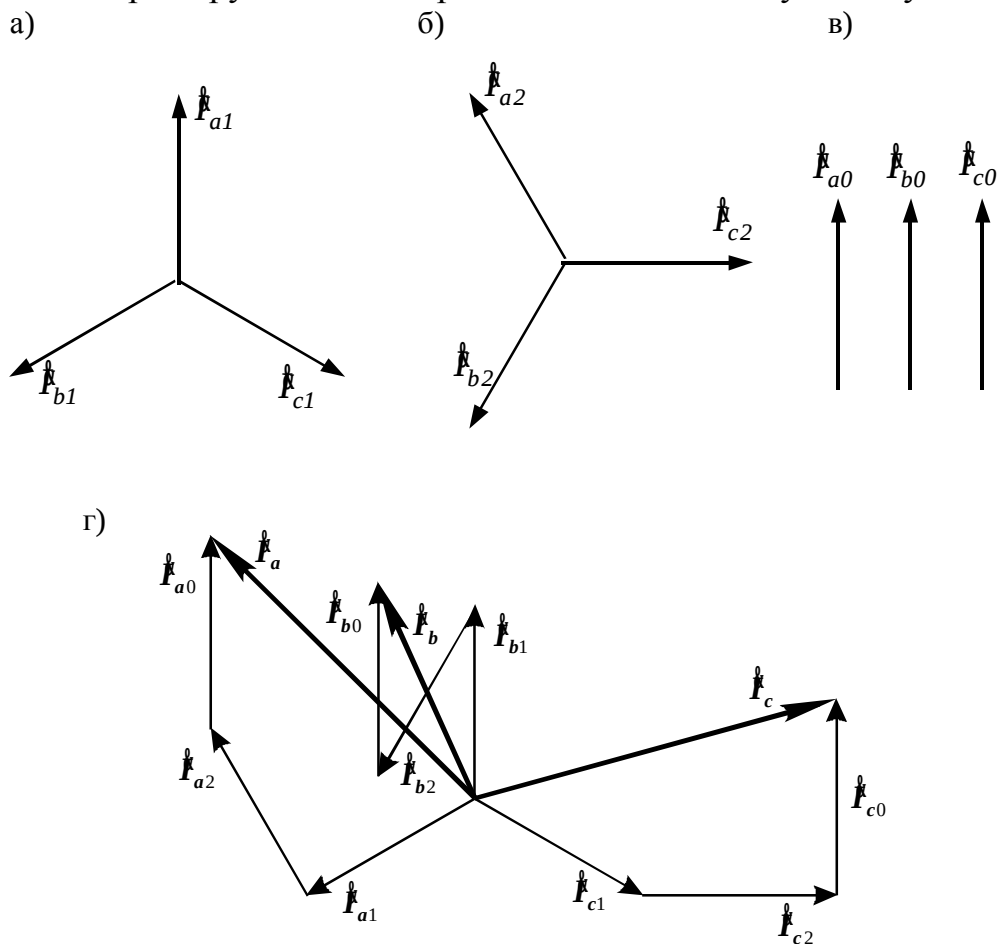


Рис. 4.1 Симетричні складові прямої (а), зворотної (б), нульової (в) систем струму і їхнє підсумовування (г)

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_b &= \dot{I}_{b1} + \dot{I}_{b2} + \dot{I}_{b0} \\ \dot{I}_c &= \dot{I}_{c1} + \dot{I}_{c2} + \dot{I}_{c0} \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

Ці рівняння можна перетворити, якщо ввести в розгляд оператор повороту « a », тобто множник, який означає, що вихідний вектор симетричної системи необхідно повернути проти часової стрілки до сполучення з даним вектором

$$(a = e^{j\frac{2}{3}p}, a^2 = e^{j\frac{4}{3}p}, 1 + a + a^2 = 0)$$

Приймаючи за вихідний вектор, вектор струму фази “ A ”, для кожної із симетричних систем можна записати:

для прямої системи

$$\dot{I}_{e1} = a^2 \dot{I}_{a1}; \quad \dot{I}_{c1} = a \dot{I}_{a1},$$

для зворотної системи

$$\dot{I}_{e2} = a \dot{I}_{a2}; \quad \dot{I}_{c2} = a^2 \dot{I}_{a2},$$

для нульової системи

$$\dot{I}_{ao} = \dot{I}_{eo} = \dot{I}_{co}.$$

Таким чином, рівняння 4.1 можна представити

$$\left. \begin{aligned} \dot{I}_a &= \dot{I}_{a1} + \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_e &= a^2 \dot{I}_{a1} + a \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} \\ \dot{I}_c &= a \dot{I}_{a1} + a^2 \dot{I}_{a2} + \dot{I}_{a0} \end{aligned} \right\} \quad (4.2)$$

Підсумовуючи в отриманих рівняннях вектори струмів несиметричної системи одержимо

$$\dot{I}_a + \dot{I}_e + \dot{I}_c = 3\dot{I}_{ao} \quad (4.3)$$

Тобто, при наявності струмів нульової послідовності в трансформаторі, сума струмів по фазах у будь-який момент часу не дорівнює нулю (тоді як у симетричній системі $\dot{I}_a + \dot{I}_e + \dot{I}_c = 0$).

Застосування методу симетричних складових можливо, якщо прийняти наступні умови, що визначають використання методу накладення:

- 1). магнітна проникність сталі магнітопровода $m_{cm} = const$ і не залежить від значення струмів, що протікають в обмотках;
- 2). параметри вторинної обмотки приведені до числа витків первинної обмотки.

3). нехтують намагнічуючим струмом трансформатора, тобто $I_0 = 0$.

Якщо розглядати різні схеми з'єднання фаз трифазних трансформаторів і схеми несиметричного включення навантаження, то можна назвати велику кількість варіантів несиметричних режимів трансформаторів. Однак поведінка силових трансформаторів у цих режимах залежить головним чином від того, чи протікають струми нульової послідовності в обмотках, чи вони відсутні.

4.3 Несиметричне навантаження трансформаторів при відсутності струмів нульової послідовності

В несиметричних режимах струми нульової послідовності відсутні, якщо фази трансформатора з'єднані зіркою без нульового проводу, а при з'єднанні трикутником відсутня ЕРС нульової послідовності. Таким чином струми нульової послідовності відсутні при з'єднанні фаз обмоток трансформаторів за схемами У/У; Д/У; У/Д.

Якщо струми нульової послідовності відсутні, то несиметрична система фазних струмів представляє суму симетричних систем прямої і зворотної послідовності. Ці симетричні системи струмів однаковим чином трансформуються з первинної обмотки трансформатора у вторинну обмотку.

Тому недоцільно розглядати в цьому випадку несиметричну систему по окремим складовим. Вважають, що для результуючої системи струмів, в яку входять системи прямої і зворотної послідовності, загальний опір для кожної фази складає Z_k , тобто для кожної фази справедлива спрощена схема заміщення трансформатора (рис. 4.2).

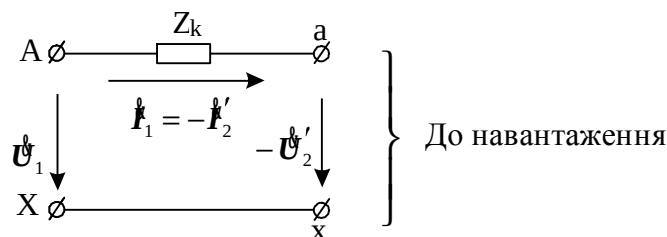


Рис. 4.2 Спрощена схема заміщення трансформатора

Якщо знехтувати намагнічуючим струмом трансформатора і вважати, що параметри вторинної обмотки трансформатора приведені до первинної, то можна записати, що

$$\dot{I}_A = \dot{I}_a, \quad \dot{I}_B = \dot{I}_b, \quad \dot{I}_C = \dot{I}_c.$$

Таким чином, при відсутності струмів нульової послідовності МРС первинної і вторинної обмоток врівноважуються пофазно. Вплив однієї фази на

іншу відсутній.

Для кожної фази буде справедлива розглянута раніше спрощена схема заміщення.

Якщо до трансформатора підведена симетрична трифазна напруга $\mathcal{U}_A$, $\mathcal{U}_B$, $\mathcal{U}_C$, то фазні напруги вторинних обмоток, згідно схеми заміщення (рис. 4.2):

$$\mathcal{U}_A - \mathcal{I}_A Z_k = -\mathcal{U}'_a; \mathcal{U}_B - \mathcal{I}_B Z_k = -\mathcal{U}'_b; \mathcal{U}_C - \mathcal{I}_C Z_k = -\mathcal{U}'_c. \quad (4.4)$$

Несиметрія фазних напруг вторинної обмотки виникає з тієї причини, що токове навантаження по фазах є нерівномірним. Отже значення спаду напруг $-\mathcal{I}_A Z_k$, $-\mathcal{I}_B Z_k$, $-\mathcal{I}_C Z_k$ не однакові. Однак ці спади напруг на порядок нижчі значення підведеної напруги. Тому, при відсутності струму нульової послідовності, значного спотворення напруг вторинної обмотки не спостерігається.

Відповідно до ДСТу система струмів і напруг вважається практично симетричною, якщо система зворотної послідовності струмів $\mathcal{I}_2$ або напруг $\mathcal{U}_2$ не перевищує 5% від прямої послідовності струмів $\mathcal{I}_1$ або напруг $\mathcal{U}_1$. При цьому система струмів або напруг вважається симетричною.

4.4 Несиметричні режими трансформаторів при наявності струмів нульової послідовності

При з'єднанні обмоток трансформатора зіркою (рис. 4.3, а), струми нульової послідовності протікають, якщо вона має нульовий провід.

В кожен момент часу ці струми спрямовані у всіх фазах однаково. Тому коло цих струмів може замикатися тільки через нульовий провід

$$\mathcal{I}_N = 3\mathcal{I}_{A0}.$$

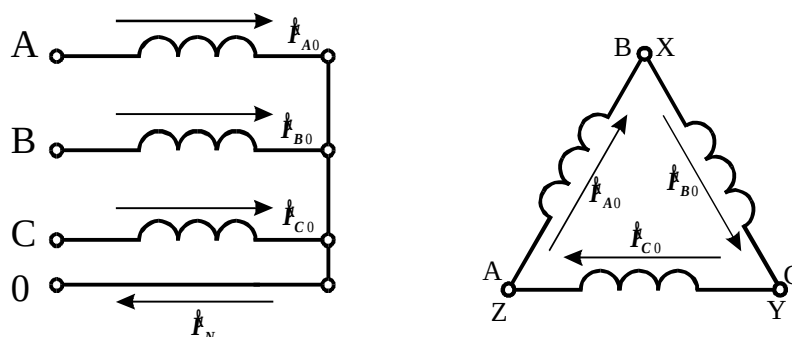


Рис. 4.3 Схеми з'єднання обмоток трансформатора:
(а) – зірка з нульовим проводом, (б) – трикутник.

При з'єднанні фаз трикутником (рис. 4.3, б), струми нульової послідовності циркулюють по замкнутому контуру.

В лінійних проводах струми нульової послідовності відсутні, тому що лінійні струми являють собою геометричну різницю відповідних фазних струмів. Отже при з'єднанні обмоток трансформатора трикутником струми нульової послідовності протікають тільки в тому випадку, якщо в трикутнику діє ЕРС нульової послідовності.

Несиметричні режими трифазних трансформаторів при наявності струмів нульової послідовності поділяють на два випадки:

а) струми нульової послідовності протікають як у первинної, так і у вторинної обмотках трансформатора;

б) струми нульової послідовності протікають тільки у вторинній обмотці трансформатора.

Перший випадок. Струми нульової послідовності протікають як у первинній, так і у вторинній обмотках при несиметричних режимах, якщо обмотки трансформаторів з'єднанні $Y_n/Y_n, D/Y_n$. В цих трансформаторах струми нульової послідовності врівноважуються по фазах. Тому вплив однієї фази на іншу відсутній. Якщо знехтувати намагнічуючим струмом, то можна записати

$$\dot{I}_{A0} = \dot{I}_{B0} = \dot{I}_{C0} = \dot{I}'_{a0} = \dot{I}'_{b0} = \dot{I}'_{c0}$$

Спотворення фазних напруг може мати місце при нерівномірному токовому навантаженні по фазах за рахунок спаду напруги від струму нульової послідовності

$$\dot{I}_{A0}Z_k, \dot{I}_{B0}Z_k, \dot{I}_{C0}Z_k,$$

так як

$$\dot{U}_A = -\dot{E}_A + \dot{I}_A Z_A; \dot{U}_B = -\dot{E}_B + \dot{I}_B Z_B; \dot{U}_C = -\dot{E}_C + \dot{I}_C Z_C$$

Оскільки ці спади напруги малі за значенням, то фазні напруги первинної обмотки практично не спотворюються. Трансформуючись у вторинну обмотку ($U_1/U_2 \approx k$), вони також утворюють трифазну симетричну систему напруг. Тобто спотворення фазних напруг вторинних обмоток незначні.

Таким чином, для випадку, коли струми нульової послідовності в несиметричному режимі протікають як у первинної, так і у вторинної обмотках, характерна відсутність значного спотворення фазних напруг.

Другий випадок. Струми нульової послідовності в несиметричних режимах протікають тільки у вторинній обмотці трансформатора при з'єднанні його обмоток Y/Y_n .

Цей випадок відрізняється від попереднього тим, що оскільки струм ну-

льової послідовності протікає тільки у вторинній обмотці, то він є чисто намагнічуючим струмом. Під дією МРС нульової послідовності $I_{\text{нул.посл}} w_2$ виникає значний магнітний потік нульової послідовності в кожній фазі трансформатора (рис.4.4).

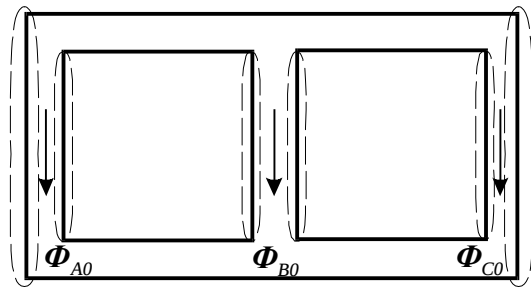


Рис. 4.4 Магнітна система трифазного стержневого трансформатора

Так як потоки нульової послідовності в кожній фазі в будь-який момент часу збігаються по фазі, вони не можуть замикатися по магнітопроводу і замикаються частково по конструктивних деталях трансформатора (по баку).

Оскільки потік нульової послідовності замикається по конструктивних деталях трансформатора, то він викликає додаткові втрати в трансформаторі, що може привести до порушення його теплового балансу.

Крім того, потік нульової послідовності індукуює в кожній фазі ЕРС нульової послідовності.

Отже для кожної фази первинної обмотки можна записати

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_A &= -\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_{on} + \mathcal{I}_A Z_A \\ \mathcal{U}_B &= -\mathcal{E}_B - \mathcal{E}_{on} + \mathcal{I}_B Z_B \\ \mathcal{U}_C &= -\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_{on} + \mathcal{I}_C Z_C \end{aligned} \right\}; \quad (4.5)$$

Тут $\mathcal{E}_A$, $\mathcal{E}_B$, $\mathcal{E}_C$ – симетрична система ЕРС, що представляє собою суму ЕРС прямої і зворотної послідовностей.

Якщо знехтувати спадом напруг $\mathcal{I}_A Z_A$, $\mathcal{I}_B Z_B$, $\mathcal{I}_C Z_C$, то можна записати

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_A &= -\mathcal{E}_A - \mathcal{E}_{on} \\ \mathcal{U}_B &= -\mathcal{E}_B - \mathcal{E}_{on} \\ \mathcal{U}_C &= -\mathcal{E}_C - \mathcal{E}_{on} \end{aligned} \right\}; \quad (4.6)$$

Підсумовуючи фазні напруги первинної обмотки одержимо $\mathcal{U}_A + \mathcal{U}_B + \mathcal{U}_C = -3\mathcal{E}_{on}$, тому що $(\mathcal{E}_A + \mathcal{E}_B + \mathcal{E}_C = 0)$.

Звідси випливає, що за рахунок ЕРС нульової послідовності відбувається спотворення фазних напруг первинної обмотки.

Оскільки вторинна обмотка зв'язана з первинною співвідношенням $U_1/U_2 \approx k$, то вторинні фазні напруги також спотворюються.

Опір трансформатора току нульової послідовності (рис. 4.5) визначається експериментально з допомогою способу відкритого трикутника (рис. 4.6):

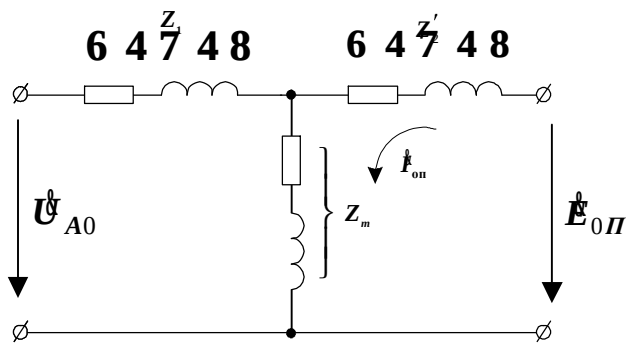


Рис. 4.5 Схема заміщення трансформатора для струму нульової послідовності

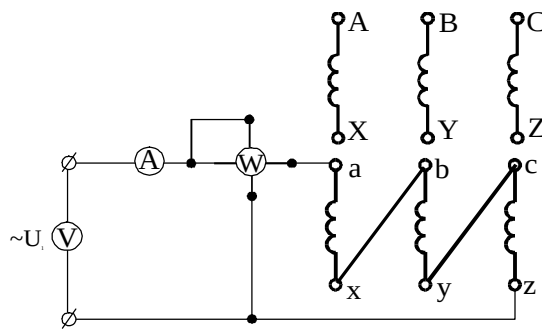


Рис. 4.6 До визначення опорів трансформатора струму нульовий послідовності

Вимірюють:

U – напругу, що підводиться до послідовно з'єднаних фаз вторинної обмотки;

I_{on} – струм нульової послідовності;

P_{00} – активну потужність, яку споживає схема.

Розраховують:

$$Z_{00} = \frac{U}{I_{on}}; \quad r_{00} = \frac{P_{00}}{I_{on}^2}; \quad x_{00} = \sqrt{Z_{00}^2 - r_{00}^2}. \quad (4.7)$$

В потужних трансформаторах, як правило, $r_{00} \ll x_{00}$ і $z_{00} \approx x_{00}$.

Контрольні питання

1. Суть методу симетричних складових при його використанні для аналізу несиметричних режимів роботи трансформатора.
2. Причини несиметричних режимів роботи трифазних трансформаторів.
3. Причини нерівномірного навантаження силових трансформаторів.
4. Явища, що негативно позначаються на роботі силових трансформаторів, у несиметричних режимах.
5. У яких випадках в трифазних трансформаторах при несиметричних навантаженнях відсутні струми нульової послідовності?
6. Електричні схеми заміщення трансформатора для струмів прямої і зворотної послідовності.
7. Вплив струмів і потоків нульової послідовності на роботу трансформатора з тристержневим магнітопроводом.
8. Дослідне визначення опору нульової послідовності трансформатора.

Глава 5. Паралельна робота трансформаторів

5.1 Умови вмикання трансформаторів на паралельну роботу

На сучасних трансформаторних підстанціях, як правило, встановлюється, в залежності від потужності підстанції, 2÷3 і більше трансформаторів. Ці трансформатори, як з боку первинних, так і з боку вторинних обмоток приєднані до загальних шин, тобто вони ввімкнені паралельно. Необхідність вмикання трансформаторів на паралельну роботу головним чином диктується наступними причинами:

а) з'являється резерв трансформаторів на випадок аварії чи необхідності ремонту трансформатора на підстанції. При цьому навантаження буде розподілене між працюючими трансформаторами;

б) поліпшується використання трансформаторів підстанцій, оскільки в періоди малих навантажень частина трансформаторів відключається, а інші працюють з високими показниками.

Паралельно працюючі трансформатори знаходяться в найкращих умовах, якщо навантаження розподілене пропорційно їхньої встановленої потужності. Щоб це виконувалося, необхідно при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу виконати наступні умови:

1. Номінальні первинні і вторинні напруги трансформаторів повинні бути однаковими, тобто

$$U_{1н1} = U_{1н2} = U_{1н3} = KU_{1нн}, \quad U_{2н1} = U_{2н2} = U_{2н3} = KU_{2нн}.$$

2. Трансформатори повинні мати однакову групу з'єднання обмоток;

3. Активні і реактивні складові напруги короткого замикання трансформаторів повинні бути однаковими, тобто

$$U_{ка1} = U_{ка2} = U_{ка3} = KU_{кан}; \\ U_{кп1} = U_{кп2} = U_{кп3} = KU_{кпн}.$$

Це зводиться до необхідності рівності

$$U_{к1} = U_{к2} = U_{к3} = KU_{кн}.$$

Друга умова вмикання трансформаторів на паралельну роботу відповідно до ДСТ повинне виконуватися обов'язково; 1-а і 3-я умови можуть виконуватися з деякими відхиленнями.

Так, якщо всі умови виконані, то при однакових номінальних потужностях, струми паралельно ввімкнутих трансформаторів будуть однакові і їх сума складає струм навантаження (рис. 5.1, а).

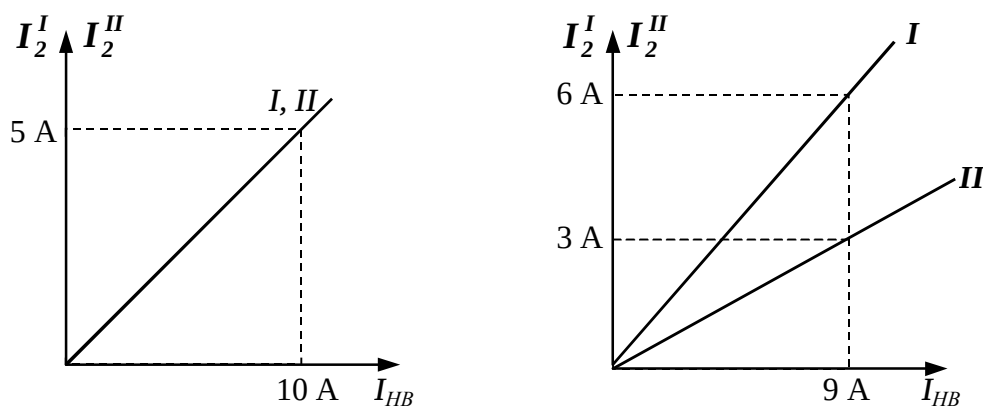


Рис. 5.1. Розподіл струмів між паралельно працюючими трансформаторами:
(а) $S_{нI} = S_{нII}$, (б) $S_{нI} = 2S_{нII}$

Якщо потужності трансформаторів не однакові, то струми їхніх вторинних обмоток розподіляються пропорційно встановленій потужності (рис. 5.1, б). ДСТ допускає вмикання на паралельну роботу трансформаторів в який номінальні потужності відрізняються не більше, ніж в 3 рази.

Розглянемо порядок вмикання трансформаторів на паралельну роботу. При цьому скористаємося схемою двох трифазних трансформаторів (рис. 5.2).

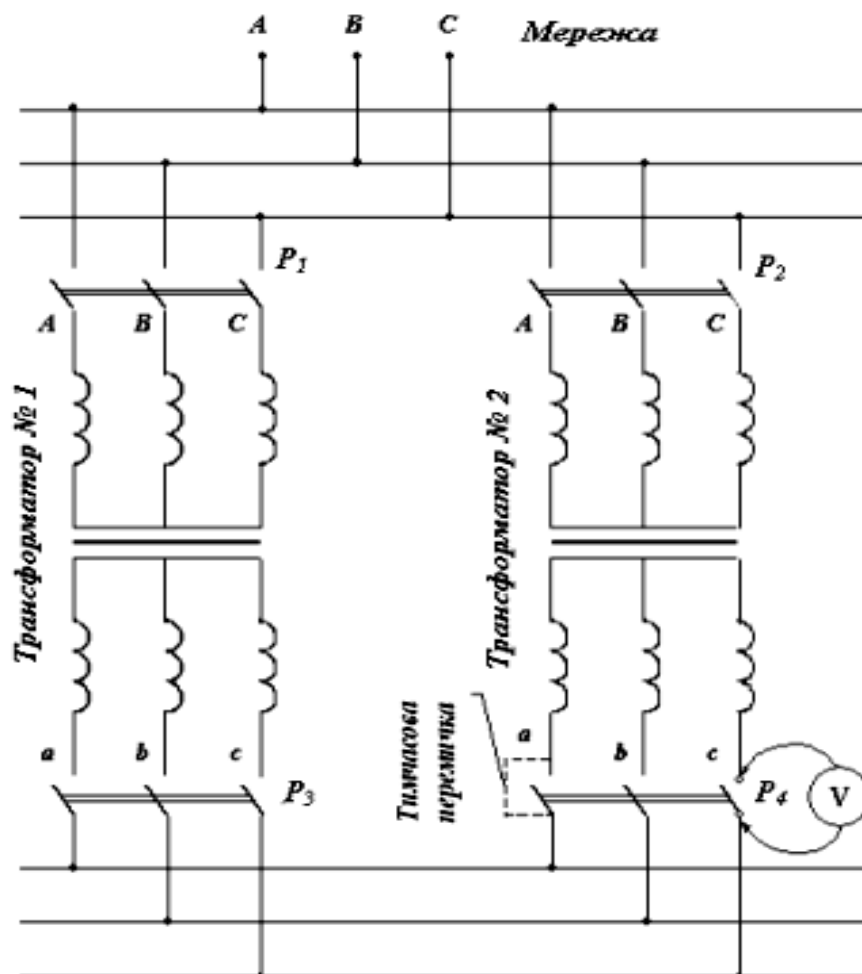


Рис. 5.2. Схема вмикання трансформаторів на паралельну роботу

При вмиканні трансформаторів на паралельну роботу необхідно перевірити фазировку, тобто щоб до загальних шин, як з боку первинних, так і з боку вторинних обмоток були приєднані однойменні фази трансформаторів. Перевірка фазировки здійснюється в такий спосіб: вмикається рубильники P_1 і P_3 (тобто трансформатор № 1 цілком включений у мережу). Потім вмикається рубильник P_2 – первинна обмотка трансформатора № 2 ввімкнута в мережу. У вторинній обмотці цього трансформатора в одній із фаз устанолюється тимчасова перемичка. В розриві двох інших фаз вторинної обмотки трансформатора № 2 перевіряється напруга. Якщо ця напруга дорівнює нулю, то вторинну обмотку трансформатора № 2 можна вмикати.

Існують і інші методи перевірки фазировки трансформаторів – за допомогою фазопоказників.

Фазировка робиться, як правило, один раз – при монтажі.

5.2 Процеси в трансформаторах при невиконанні умов паралельної роботи

А. Нерівність коефіцієнтів трансформації

Нехай для двох трансформаторів, ввімкнутих на паралельну роботу, виконується умова, що їх номінальні первинні напруги однакові: $U_{1н1} = U_{1н2} = U_{1н}$. Однак коефіцієнти трансформації не однакові $k_1 < k_2$. Інші умови вмикання на паралельну роботу виконуються. В цьому випадку до приєднання вторинних обмоток трансформатора на загальні шини їх напруги будуть знаходитися в наступних співвідношеннях:

$$U_{2н1} = \frac{U_{1н1}}{k_1} > U_{2н2} = \frac{U_{1н2}}{k_2}.$$

Коли вторинні обмотки будуть приєднані до загальних шин, між однойменними затискачами вторинних обмоток трансформатора почне діяти різниця потенціалів $DU = U_{2н1} - U_{2н2}$. Під дією цієї різниці потенціалів між паралельно ввімкненими трансформаторами потече вирівняльний струм. Шлях, по якому тече вирівняльний струм представлений на рис. 5.3.

Відповідно до схеми, вирівняльний струм тече тільки між трансформаторами і їхніми сполучними шинами. Тому коло, по якому цей струм протікає, має опір $Z_{k1} + Z_{k2}$. Отже значення вирівняльного струму кожного з трансформаторів визначається залежністю:

$$I_{B1} = I_{B2} = I_B = \frac{DU}{Z_{k1} + Z_{k2}} = \frac{\left(\frac{U_{1н}}{k_1} - \frac{U_{1н}}{k_2} \right)}{Z_{k1} + Z_{k2}} = \frac{U_{1н}}{Z_{k1} + Z_{k2}} \left(\frac{1}{k_1} - \frac{1}{k_2} \right) \quad (5.1)$$

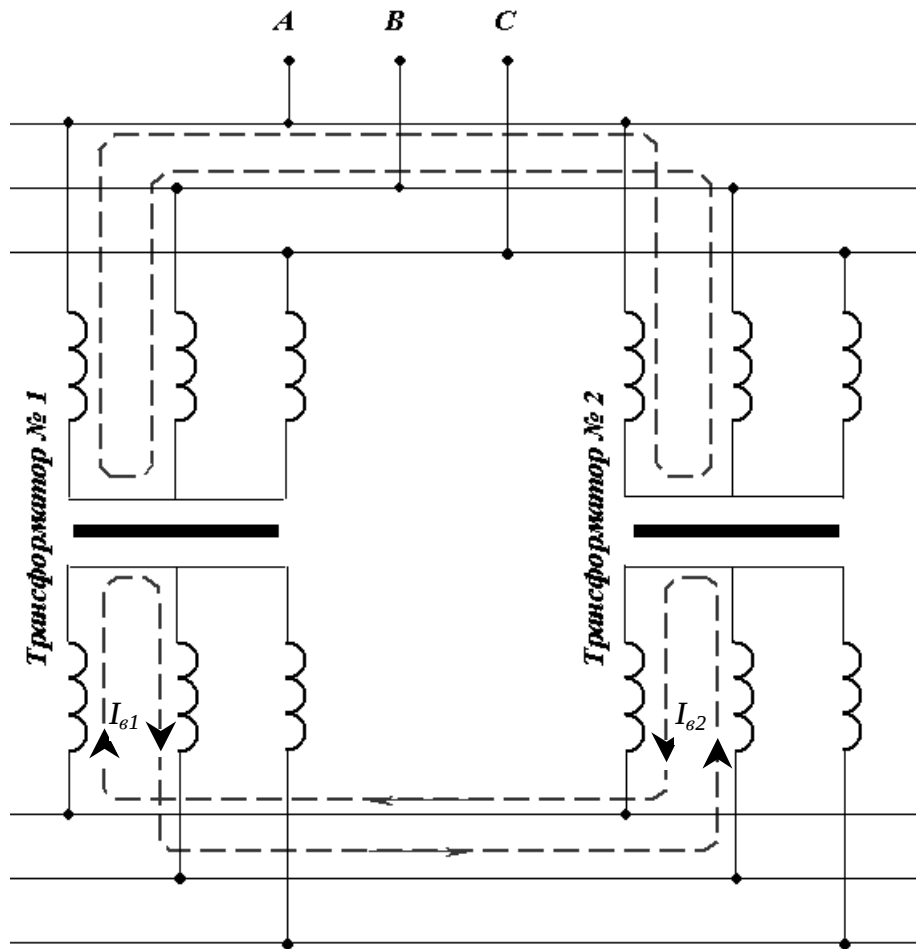


Рис. 5.3. Шлях протікання вирівняльного струму паралельно працюючих трансформаторів

Оскільки коефіцієнти трансформації трансформаторів не однакові, введемо в розгляд середнє значення коефіцієнта трансформації для двох трансформаторів, тобто $k_1 \cdot k_2 = k^2$, де k – середньгеометричне значення коефіцієнта трансформації для двох трансформаторів. При цьому можна записати

$$I_6 = \frac{\frac{U_{1H}}{k_1} \left(\frac{k_1 - k_2}{k} \right)}{Z_{k1} + Z_{k2}} = \frac{\frac{U_{1H}}{k} \left(\frac{Dk}{k} \right) \cdot 100}{(Z_{k1} + Z_{k2}) \cdot 100}.$$

Перетворимо отриманий вираз у такий спосіб

$$I_6 = \frac{\frac{U_{2H} Dk\%}{\frac{Z_{k1} \cdot I_{2H1}}{I'_{2H1}} \cdot 100 + \frac{Z_{k2} \cdot I_{2H2}}{I_{2H2}} \cdot 100}}{1 \frac{U_{2H1}}{U_{k2}\%} \frac{1}{I_{2H1}} + 1 \frac{U_{2H2}}{U_{k2}\%} \frac{1}{I_{2H2}}} =$$

$$= \frac{Dk\%}{\frac{U_{k1}\%}{I_{2н1}} + \frac{U_{k2}\%}{I_{2н2}}} . \quad (5.2)$$

Для оцінки значення вирівняльного струму при нерівності коефіцієнтів трансформації приймаємо для двох трансформаторів, що їхні номінальні потужності однакові $S_{н1} = S_{н2}$. Отже їхні номінальні струми теж однакові $I_{2н1} = I_{2н2}$. Крім того виконується третя умова включення на паралельну роботу $U_{k1} = U_{k2}$.

В цьому випадку вираз для вирівняльного струму приймає вид

$$I_{\epsilon} = \frac{DK\%}{2 \frac{U_k\%}{I_{2н}}}, \text{ отже } \frac{I_{\epsilon}}{I_{2н}} = \frac{DK\%}{2U_k\%}.$$

Нехай коефіцієнти трансформації відрізняються на 1%, а напруга короткого замикання $U_k = 5,5$. При цьому знаходимо $\frac{I_{\epsilon}}{I_{2н}} = \frac{1}{2 \cdot 5,5} = 0,09$, тобто вирівняльний струм, згідно розрахунків, складає 9% від номінального значення струму вторинної обмотки трансформатора.

Коли вторинні обмотки трансформаторів приєднуються до загальних шин і між трансформаторами тече вирівняльний струм, вторинні напруги трансформаторів вирівнюються до загальної напруги U_2 .

Це відбувається за рахунок спаду напруги в кожному із трансформаторів від вирівняльного струму. Тому цю загальну напругу U_2 можна виразити у такий спосіб.

$$U_2 = U_{2н1} - I_{\epsilon} Z_{\kappa 1}, \quad (5.3)$$

$$U_2 = U_{2н2} - I_{\epsilon} Z_{\kappa 2}.$$

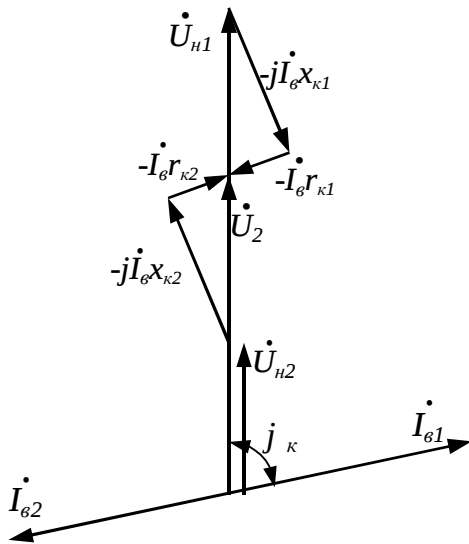


Рис. 5.4. Векторна діаграма напруг і струмів при нерівності коефіцієнтів трансформації.

Векторна діаграма напруг представлена на рис. 5.4.

$$j_{\kappa} = \arctg \frac{x_{\kappa 1} + x_{\kappa 2}}{r_{\kappa 1} + r_{\kappa 2}}. \quad (5.4)$$

Якщо до трансформаторів підключена загальне навантаження, то струм

вторинних обмоток трансформаторів являє собою суму струму навантаження і вирівняльного струму. При однаковій потужності паралельно включених трансформаторів їхні номінальні струми вторинних обмоток $I_{n1} = I_{n2}$ однакові.

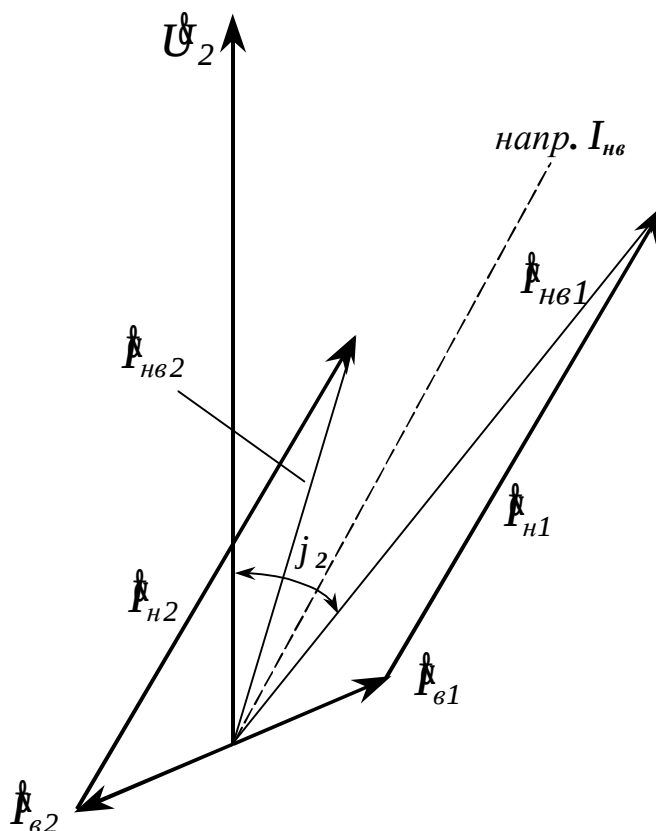


Рис. 5.5. До визначення розподілу струмів в трансформаторах

З векторної діаграми видно, що трансформатор з більш високою вторинною напругою холостого ходу (з меншим коефіцієнтом трансформації) виявляється перевантаженим, з більшим коефіцієнтом трансформації – недовантаженим. Тому що перевантаження трансформаторів неприпустиме, то приходиться знижувати загальне навантаження. При значній різниці коефіцієнтів трансформації нормальна робота трансформаторів стає практично неможливою. Однак ДСТ допускає включення на паралельну роботу трансформаторів з різними коефіцієнтами трансформації, якщо різниця коефіцієнтів трансформації не перевищує $\pm 0,5\%$ їхнього середньгеометричного значення:

$$DK = [(k_I - k_2) / k] 100\% \leq 0,5\% . \quad (5.5)$$

де $\kappa = \sqrt{\kappa_I \cdot \kappa_2}$ - середньгеометричне значення коефіцієнтів трансформації.

Б. Нерівність груп з'єднання обмоток

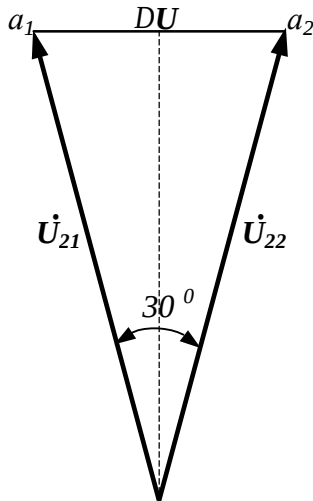


Рис. 5.6 До визначення зрівняльних струмів у трансформаторах

Розглянемо випадок, коли для двох трансформаторів, ввімкнених на паралельну роботу 1-а і 3-я умови виконуються, тобто вони мають однакові коефіцієнти трансформації і напруги короткого замикання. Однак друга умова не виконується, тобто групи з'єднання обмоток трансформаторів неоднакові. В цьому випадку фазні напруги трансформаторів не співпадають по фазі, тобто вони зміщені на деякий кут a і в найбільш сприятливому випадку $a = 30^\circ$. Векторна діаграма фазних напруг вторинних обмоток трансформаторів представлена на рис. 5.6. Відповідно до векторної діаграми, між однаковими затисками паралельно ввімкнених трансформаторів діє різниця потенціалів DU . Під дією цієї різниці потенціалів по обмотках трансформаторів потече вирівняльний струм.

Оцінюючи значення вирівняльного струму в цьому випадку, знаходимо з векторної діаграми діюче значення різниці потенціалів, тобто значення DU . Оскільки перша умова виконується $U_{2n1} = U_{2n2} = U_{2n}$, тобто

$$DU = 2U_{2n} \sin \frac{a}{2}.$$

Звідси знаходимо діюче значення вирівняльного струму

$$I_{e1} = I_{e2} = I_e = \frac{DU}{z_{k1} + z_{k2}} = \frac{2U_{2n} \sin \frac{a}{2}}{z_{k1} + z_{k2}}.$$

Перетворимо це рівняння у такий спосіб:

$$\begin{aligned} I_e &= \frac{2U_{2n} \sin \frac{a}{2} \cdot 100}{\frac{z_{k1} \cdot I_{2n1} \cdot 100}{I_{2n1}} + \frac{z_{k2} \cdot I_{2n2} \cdot 100}{I_{2n2}}} = \\ &= \frac{2U_{2n} \sin \frac{a}{2}}{\frac{z_{k1} \cdot I_{2n1} \cdot 100}{U_{2n}} \cdot \frac{1}{I_{2n1}} + \frac{z_{k2} \cdot I_{2n2} \cdot 100}{U_{2n2}} \cdot \frac{1}{I_{2n2}}}. \end{aligned} \quad (5.6)$$

Відповідно до векторної діаграми, між однаковими затискачами паралельно ввімкнених трансформаторів діє різниця потенціалів DU . Під дією цієї рі-

зниці потенціалів по обмотках трансформаторів потече вирівняльний струм.

Якщо номінальні потужності трансформаторів однакові $S_{н1} = S_{н2} = S_n$, то і $I_{2н1} = I_{2н2} = I_{2н}$, крім того, при виконанні третьої умови $U_{k1}\% = U_{k2}\% = U_k\%$.

З огляду на це

$$I_\phi = \frac{2 \sin \frac{a}{2} \cdot 100}{2 \frac{U_k\%}{I_{2н}}} , \text{ чи } \frac{I_\phi}{I_{2н}} = \frac{2 \sin \frac{a}{2} \cdot 100}{U_k\%} . \quad (5.7)$$

Зробимо розрахунок вирівняльного струму для випадку, коли $a=30^\circ$, $U_k\% = 5,5$.

$$\frac{I_\phi}{I_{2н}} = \frac{2 \sin \frac{30^\circ}{2} \cdot 100}{5,5} = 4,7.$$

Таким чином, навіть найбільш сприятливий випадок вмикання на паралельну роботу трансформаторів з різними групами з'єднання обмоток трансформаторів ($a=30^\circ$), вирівняльний струм перевищує номінальний у 4,7 рази, що зовсім неприпустимо.

Тому ДСТ однозначно забороняє вмикання на паралельну роботу трансформатори з різними групами з'єднання обмоток.

В. Нерівність напруг короткого замикання

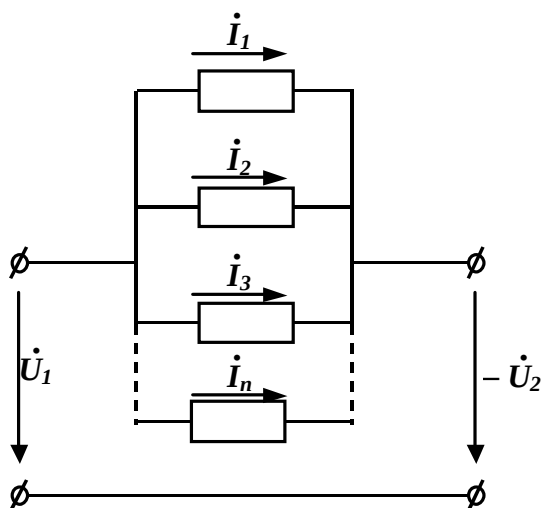


Рис. 5.7. Спрощена схема паралельної роботи трансформаторів з однаковими групами з'єднання і коефіцієнтами трансформації

Нехай в трансформаторах, ввімкнених на паралельну роботу виконані 1-а і 2-а умови, тобто вони мають однакові коефіцієнти трансформації і групи з'єднання обмоток, однак напруги короткого замикання не однакові.

Використовуючи спрощену схему заміщення трансформатора, представимо схему для декількох паралельно ввімкнених трансформаторів (рис. 5.7). Оскільки трансформатори ввімкнені паралельно, то відповідно до приведеної схеми заміщення, спад напруги в них однаковий

$$I_1 z_{k1} = I_2 z_{k2} = I_3 z_{k3} = K = I_n z_{kn} .$$

Звідси переходимо до наступного пропорції

$$I_1 : I_2 : I_3 : \mathbf{K} : I_n = \frac{1}{z_{k1}} : \frac{1}{z_{k2}} : \frac{1}{z_{k3}} : \mathbf{K} : \frac{1}{z_{kn}} .$$

Поточне значення потужностей, паралельно ввімкнених трансформаторів, що визначається загальним значенням навантаження, пропорційно струмам цих трансформаторів.

$$S_1 \sim I_1; S_2 \sim I_2; S_3 \sim I_3; \dots S_n \sim I_n .$$

Отже, приведену пропорцію можна записати в слідуєчому виді

$$S_1 : S_2 : S_3 : \mathbf{K} : S_n = \frac{1}{z_{k1}} : \frac{1}{z_{k2}} : \frac{1}{z_{k3}} : \mathbf{K} : \frac{1}{z_{kn}} .$$

Перейдемо від опорів короткого замикання до напруг короткого замикання, тобто виконаємо слідуєче перетворення:

$$z_{k1} = \frac{z_{k1} I_{1n1} \cdot 100}{\frac{U_{1n1}}{I_{1n1} \cdot 100}} ; \mathbf{K} z_{kn} = \frac{z_{kn} I_{1nn} \cdot 100}{\frac{U_{1nn}}{I_{1nn} \cdot 100}} ; \quad (5.8)$$

$$z_{k1} = \frac{U_{k1} \%}{I_{1n1}} \cdot \frac{U_{1n1}}{100} ; \mathbf{K} z_{kn} = \frac{U_{kn} \%}{I_{1nn}} \cdot \frac{U_{1nn}}{100}$$

Оскільки перша умова включення трансформаторів виконується, тобто

$$U_{1n1} = U_{1n2} = U_{1n3} = \mathbf{K} = U_{1nn} .,$$

то переходячи до пропорції одержимо

$$S_1 : S_2 : S_3 : \mathbf{K} : S_n = \frac{I_{1n1}}{U_{k1} \%} : \frac{I_{1n2}}{U_{k2} \%} : \frac{I_{1n3}}{U_{k3} \%} : \mathbf{K} : \frac{I_{1nn}}{U_{kn} \%} .$$

При рівності номінальних напруг паралельно ввімкнених трансформаторів їхні номінальні струми пропорційні номінальним потужностям

$$I_{1n1} \sim S_{n1}; I_{1n2} \sim S_{n2}; I_{1n3} \sim S_{n3}; \mathbf{K} I_{1nn} \sim S_{nn} .$$

Тому пропорцію в остаточному виді запишемо

$$S_1 : S_2 : S_3 : \mathbf{K} : S_n = \frac{S_{n1}}{U_{k1} \%} : \frac{S_{n2}}{U_{k2} \%} : \frac{S_{n3}}{U_{k3} \%} : \mathbf{K} : \frac{S_{nn}}{U_{kn} \%} \quad (5.9)$$

Звідси приходимо до наступного висновку: якщо третя умова вмикання трансформаторів на паралельну роботу виконується, тобто напруги короткого замикання однакові, то при збільшенні навантаження паралельно ввімкнених трансформаторів вони одночасно досягають номінальної потужності. Якщо ж напруги короткого замикання не однакові, те першим досягне номінальної потужності трансформатор, що має меншу напругу короткого замикання $U_{\kappa}\%$. Цей трансформатор буде лімітувати навантаження всіх паралельно ввімкнених трансформаторів. Тому ДСТ вимагає, щоб при вмиканні на паралельну роботу трансформаторів їхньої напруги короткого замикання не відрізнялися більше ніж на $\pm 10\%$ від їх середнього арифметичного

$$DU_{\kappa}\% = \frac{U_{\kappa I}\% - U_{\kappa II}\%}{U_{\kappa.ср}\%} \leq \pm 10\% , \quad (5.10)$$

$$\text{де } U_{\kappa.ср}\% = \frac{U_{\kappa I}\% + U_{\kappa II}\%}{2}.$$

Розподіл навантаження між паралельно ввімкненими трансформаторами визначається по виразу

$$S_x = \frac{S}{\sum \frac{S_n}{U_{\kappa n}\%}} \cdot \frac{S_{nx}}{U_{\kappa x}\%} , \quad (5.11)$$

де S_x – навантаження даного трансформатора, кВА; S – загальне навантаження всієї паралельної групи, кВА; S_{nx} – номінальна потужність даного трансформатора, кВА; $U_{\kappa x}$ – напруга к.з. даного трансформатора, %.

У виразі (5.11)

$$\sum \frac{S_n}{U_{\kappa n}} = \frac{S_{n1}}{U_{\kappa 1}} + \frac{S_{n2}}{U_{\kappa 2}} + \frac{S_{n3}}{U_{\kappa 3}} + \mathbf{K} + \frac{S_{np}}{U_{\kappa n}} .$$

Контрольні питання

1. Необхідність вмикання трансформаторів на паралельну роботу.
2. Яких умов необхідно дотримуватись при вмиканні трансформаторів на паралельну роботу?
3. Що таке фазировка трансформаторів і як вона виконується?
4. Особливості паралельної роботи трансформаторів при різних коефіцієнтах трансформації.
5. Особливості паралельної роботи трансформаторів при різних значеннях їхніх напруг короткого замикання.
6. Довести неприпустимість паралельної роботи трансформаторів з різними групами з'єднань обмоток.

Глава 6. Перехідні процеси в трансформаторах

6.1 Загальні відомості

При експлуатації силових трансформаторів можливі випадки різкої зміни навантаження або випадки короткого замикання контуру навантаження. При цьому виникає перехідний процес, тобто різкий перехід від одного сталого режиму до іншого. Перехідні режими в силових трансформаторах можуть супроводжуватися сплесками струму, що протікає в обмотках, чи підвищенням напруги на затискачах первинної і вторинної обмоток понад номінальний. З цієї причини перехідні процеси поділяють на надструми в трансформаторах і перенапруги в трансформаторах.

6.2 Надструми в трансформаторах

У найбільш виразній формі надструми в трансформаторах виникають:

- при вмиканні трансформатора в мережу;
- при раптовому короткому замиканні.

Струм вмикання. При вмиканні трансформатора в мережу при розімкнутій вторинній обмотці, спостерігається кидок струму в первинній обмотці трансформатора. Цей кидок струму є короткочасним, однак він може в 4...6 разів перевищити номінальний струм первинної обмотки трансформатора. Силкові трансформатори при проектуванні розраховуються на цей кидок струму, тому він не представляє для них небезпеки. Однак цей струм необхідно враховувати при розрахунку і відповідному виборі максимального струмового захисту силового трансформатора. Необхідно щоб цей захист не реагував на струм вмикання.

Струм раптового короткого замикання. В умовах експлуатації силових трансформаторів можливі аварійні режими, коли відбувається коротке замикання в контурі навантаження зв'язаного з трансформатором.

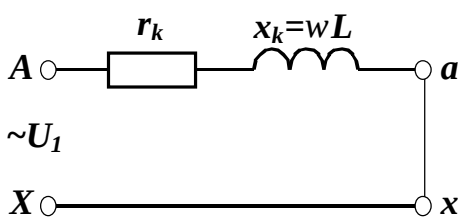


Рис. 6.1 Спрощена схема заміння трансформатора при короткому замиканні.

При цьому відбувається перехідний процес, що, з огляду на спрощену схему заміння трансформатора (рис. 6.1), є перехідним процесом у контурі з послідовно з'єднаними опорами r_k і $x_k = wL_k$.

Для приведенного контура перехідний процес характеризується рівнянням (за умови, що до трансформатора підведена синусоїдальна напруга).

$$u_1 = U_{1m} \sin(\omega t + j_k) = i_k r_k + L_k \frac{di_k}{dt} \quad (6.1)$$

де j_k – фаза короткого замикання, що визначає величину напруги на затиска-

чах трансформатора в момент короткого замикання.

Рішення цього рівняння знаходимо у виді

$$i_k = i_{k,ст.} + i_{k,в.} \quad (6.2)$$

де $i_{k,ст.}$ – струм короткого замикання сталого режиму; $i_{k,в.}$ – складова струму раптового короткого замикання, що протікає тільки в період перехідного процесу.

Рішенням цього рівняння буде

$$i_k = -I_{kmax} \cos(\omega t + y_k) + I_{kmax} \cos y_k e^{-\frac{r_k}{L_k} t}, \quad (6.3)$$

де $I_{kmax} = \frac{U_{1max}}{\sqrt{r_k^2 + x_k^2}}$ – амплітудне значення струму сталого короткого замикання;

y_k – фазний кут в момент короткого замикання.

Зміну струму, викликану коротким замиканням, в часі представимо у виді графіків

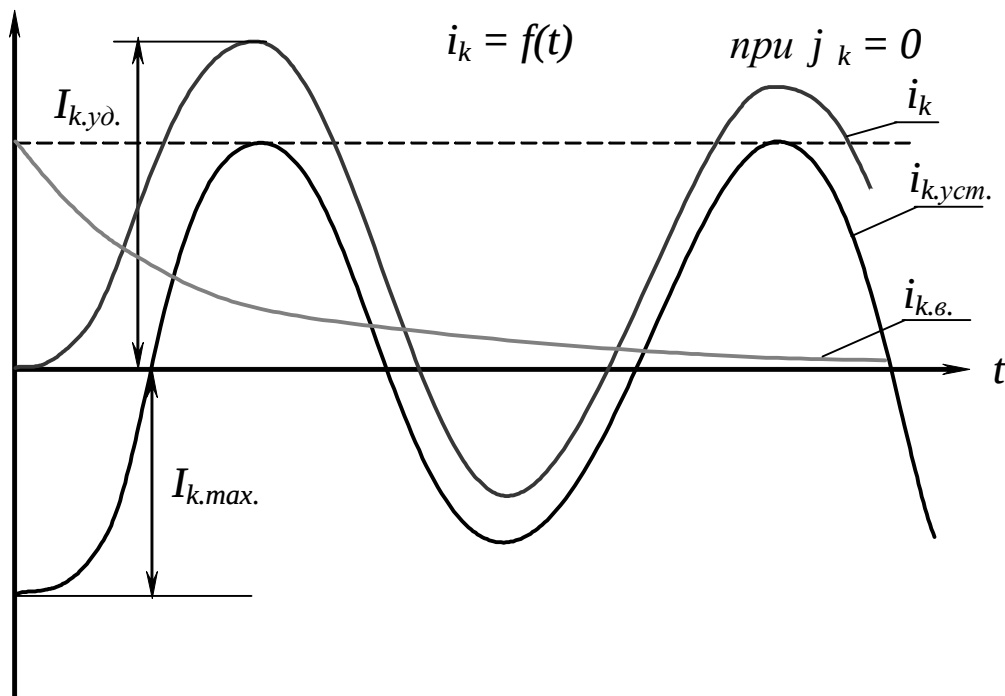


Рис. 6.2. Зміна струмів у трансформаторі при короткому замиканні

Найбільшу небезпеку в перехідному процесі при раптовому короткому замиканні представляє ударний струм короткого замикання, коли $\frac{r_k}{L_k} = 0$, тобто

$i_{k,в.}$ – не загасає (пунктирна лінія).

При цьому $I_{k,уд} = 2I_{k,max} = 2\sqrt{2}I_k$.

У дійсності $I_{к.уд.}$ трохи нижчий за своїм значенням, оскільки $\frac{r_k}{L_k} > 0$.

Ударний струм раптового короткого замикання викликає значні динамічні зусилля між обмотками трансформатора. Тому при проектуванні силових трансформаторів механічну міцність обмоток розраховують з умови раптового короткого замикання.

6.3 Перенапруга в трансформаторах

а) причини і характер перенапруг

Під перенапругами силових трансформаторів розуміють усяке підвищення напруги понад найбільшу робочу напругу. Однак частіше під перенапругою в силових трансформаторах розуміють короткочасні імпульси напруг періодичного чи аперіодичного характеру, амплітуда яких у кілька разів перевищує найбільшу робочу напругу.

В залежності від причини, по якій виникають ці перенапруги їх класифікують у такий спосіб:

- атмосферні перенапруги, що виникають при прямому влученні блискавки в ЛЕП, зв'язану з трансформатором, а також зв'язані з електромагнітною індукцією при розряді хмар і в результаті електростатичної індукції від заряджених хмар. Атмосферні перенапруги можуть у (7 , 12) разів перевищити найбільшу робочу напругу;

- аварійні перенапруги, що виникають при короткому замиканні в лінії електропередачі (ЛЕП) на землю. Вони можуть перевищити найбільшу робочу напругу в (5 , 8) разів ;

- комутаційні перенапруги, що виникають при вмиканні або вимиканні потужних споживачів електричної енергії в ЛЕП, зв'язаної з трансформатором, тобто коли значно змінюється електромагнітна енергія в системі "ЛЕП – трансформатор". Амплітуда цих перенапруг може перевищити найбільшу робочу напругу трансформатора в (2 , 5) разів.

Відповідно до ДСТУ перенапруга вважається небезпечною для силового трансформатора, якщо його амплітуда перевищує найбільшу робочу напругу трансформатора більш ніж у 3,5 рази.

б) схема заміщення трансформатора при перенапругах

В сталому режимі роботи силового трансформатора струм, що протікає по обмотках, зустрічає на своєму шляху контур, що складається з активного й індуктивного опорів. При перенапругах картина докорінно змінюється, оскільки перенапруга носить характер короткочасних імпульсів. Їх можна розкласти в гармонійний ряд високої частоти. Отже, індуктивний опір $x=2p'L \text{ ® } \text{¥}$, а ємнісний опір $x_c=1/(2p'C) \text{ ® } 0$.

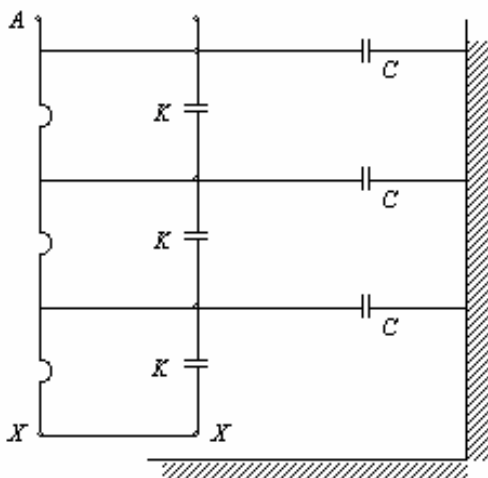


Рис. 6.3. Спрощена схема заміщення трансформатора при перехідних процесах

Тому при перенапругах струм у силовому трансформаторі тече по ємнісному контуру. Цей ємнісний контур складається з ємностей “С” цих елементів на землю. Як зазначені елементи обмотки можна розглядати витки або групи витків. Таким чином, для однієї фази обмотки ВН на яку набігає хвиля перенапруги із ЛЕП, схема заміщення трансформатора, представлена на рис. 6.3. У загальному випадку кінець фази Х може бути заземлений чи ізольований.

Згідно схеми заміщення (рис. 6.3), ємності “К” включені послідовно. Отже загальна ємність елементів обмотки для кожної фази

$$K_{\text{заг.}} = \frac{1}{n} K ,$$

де n – число розглянутих елементів обмотки

В цей же час ємності “С” включені паралельно. Отже, загальна ємність на землю

$$C_{\text{заг.}} = nC .$$

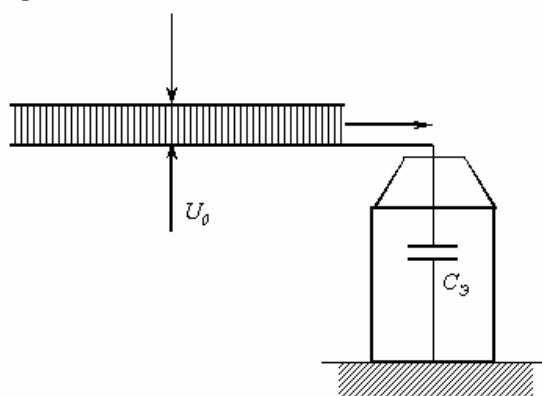


Рис. 6.4 Підхід прямокутної хвилі напруги до трансформатора.

Таким чином, кожну фазу обмотки ВН силового трансформатора можна представити у виді еквівалентної ємності

$$C_e = \sqrt{K_{\text{заг.}} C_{\text{заг.}}} = \sqrt{KC}$$

Розглянемо найбільш важкий випадок, коли з лінії електропередачі (ЛЕП) до трансформатора рухається хвиля перенапруги прямокутного фронту, то, з огляду на те, що трансформатор являє собою еквівалентну ємність, його можна представити у такий спосіб (рис. 6.4).

При своєму русі хвиля перенапруги зустрічає на своєму шляху хвильовий опір ЛЕП ($r_{\text{л}} = \sqrt{L_{\text{л}}/C_{\text{л}}}$). При досягненні затискачів трансформатора хвиля перенапруг зустрічає хвильовий опір трансформатора. При переході хвилі перенапруги з контуру з меншим хвильовим опором в контур з більшим хвильовим опором, виникає відбита хвиля перенапруги, амплітуда якої в граничному випадку може бути рівна подвоєній амплітуді хвилі перенапруги, що набігає, (рис. 6.5).

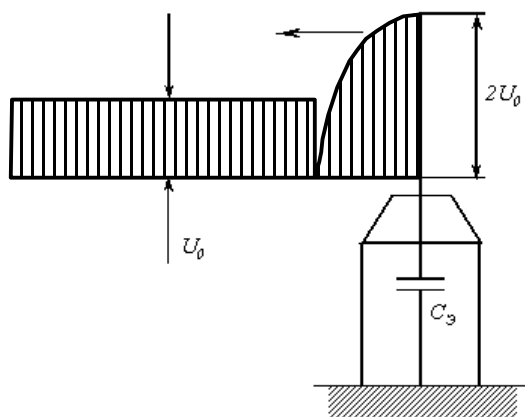


Рис. 6.5 Заряд ємнісного ланцюжка трансформатора

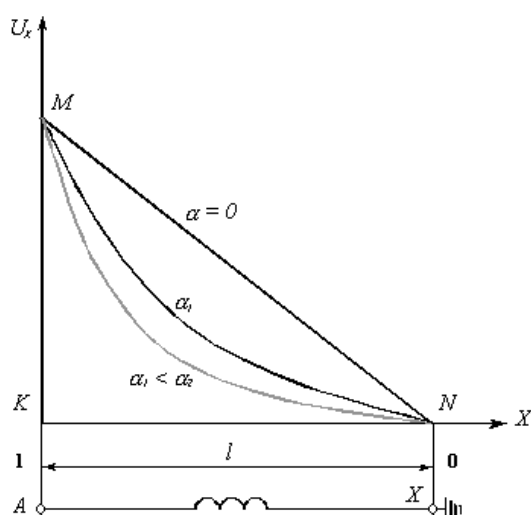


Рис. 6.6. Початковий розподіл напруги при заземленій нейтралі

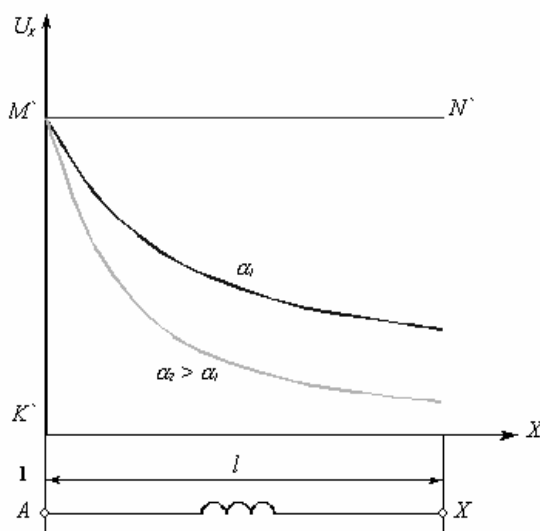


Рис. 6.7. Початковий розподіл напруги при ізолюваній нейтралі

Коли хвиля перенапруги досягне за-тискачів трансформатора, його ємнісний ланцюжок миттєво заряджається. Настає так званий початковий розподіл потенціалу по довжині обмотки ВН. Цьому відповідає момент часу $t = 0$.

Після цього настає перехідний процес, що завершується кінцевим розподілом потенціалу по довжині обмотки ВН.

в) початковий розподіл потенціалу, перехідний процес, кінцевий розподіл потенціалу

Початковий розподіл потенціалу по довжині обмотки ВН залежить від того, за-землений чи ізолюваний кінець фази X.

Кінець фази X заземлений. Якби були відсутні ємності C на землю, то оскільки кінець X заземлений, струм протікав би по ємностям K і при рівності цих ємностей мав би місце рівномірний розподіл потенціалу по довжині обмотки, що представлений прямою MN (рис. 6.6).

Якби були відсутні ємності K, то струм протікав би через першу від початку обмотки ємність C на землю. Отже розподіл потенціалу необхідно було б представити прямою MK (рис. 6.6). У дійсності ж існують ємності C і K, тому початковий розподіл потенціалу буде відбуватися по деякій кривій, що розташована між прямими MN і MK і залежить від коефіцієнта a

$$a = \sqrt{\frac{C_{\text{заг.}}}{K_{\text{заг.}}}}$$

Кінець фази X ізолюваний. Цей випадок відрізняється від попереднього тим, що при відсутності ємностей C, вся обмотка придбає однаковий потенціал. Тому розподіл потенціалу по довжині обмотки буде представлено прямою MN (рис. 6.7).

При відсутності ємностей K, почат-

ковий розподіл потенціалу буде визначатися прямої $M'K'$. Оскільки в дійсності існують ємності C і K , то початковий розподіл потенціалу, як і в попередньому випадку визначається кривою розташованою між $M\epsilon N\epsilon$ і $M\epsilon K\epsilon$ (рис. 6.7).

Після моменту часу $t=0$ настає перехідний процес. Перехідний процес при перенапругах характеризується у такий спосіб:

1) відбувається зміна потенціалу як по довжині обмотки, тобто уздовж координати X , так і в часі в кожній точці обмотки.

2) зміна потенціалу в часі для кожної координати X носить загасаючий характер, причому прямі MN і $M\epsilon N\epsilon$ можна розглядати як осі, біля яких відбувається зміна потенціалу обмотки в окремих її точках; межі можливих коливань лежать в заштрихованій області (рис. 6.8).

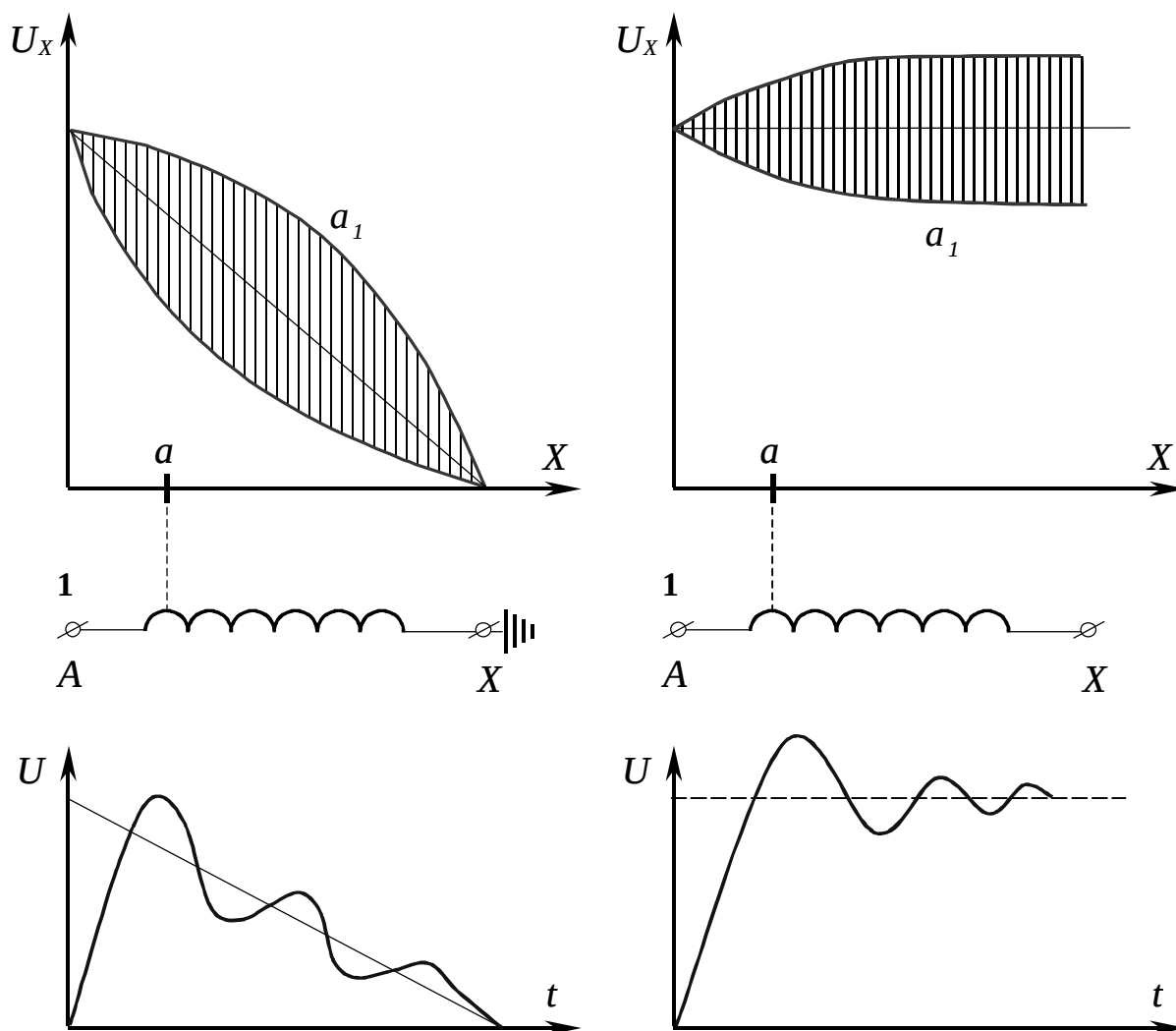


Рис. 6.8 Перехідні процеси в обмотці трансформатора при дії прямокутної хвилі перенапруги у випадку заземленої нейтралі (а) і ізолюваної нейтралі (б)

По завершенню перехідного процесу настає кінцевий розподіл потенціалу по довжині обмотки. Воно характеризується прямими MN і $M\epsilon N\epsilon$, оскільки при кінцевому розподілі потенціалу ємності C на землю відсутні.

г) міри захисту трансформаторів від перенапруг

В перехідних процесах при перенапругах має місце нерівномірний розподіл потенціалу по довжині обмотки. Тому на окремих ділянках по довжині

обмотки мають місце високі градієнти потенціалу. Це може привести до пробою міжвитковий ізоляції обмотки. З цієї причини в силових трансформаторах розроблені міри захисту від перенапруг. Їх можна розділити на міри **зовнішнього** і **внутрішнього** захисту

Міри зовнішнього захисту мають на меті в якійсь мірі знешкодити хвилю перенапруги, що набігає, і насамперед зробити його фронт пологим, а не крутим.

До мір **зовнішнього** захисту відносять:

- а) правильний вибір траси ліній передач, що виключає райони, особливо піддані грозам;
- б) захист трансформаторних підстанцій тросами, що заземлюють, і розрядниками.

До мір **внутрішнього** захисту відносять:

- а) посилення ізоляції вхідних і кінцевих витків обмотки ВН, де градієнт потенціалу може бути найбільш високим;
- б) установка ємнісного екрана навколо обмотки ВН. Він являє собою циліндр, що охоплює обмотку ВН, виготовлений з мідного листа, що не замкнутий а розрізаний в осьовому напрямку. Схема з'єднання цього ємнісного екрана з обмоткою ВН представлена на рис. 6.9.

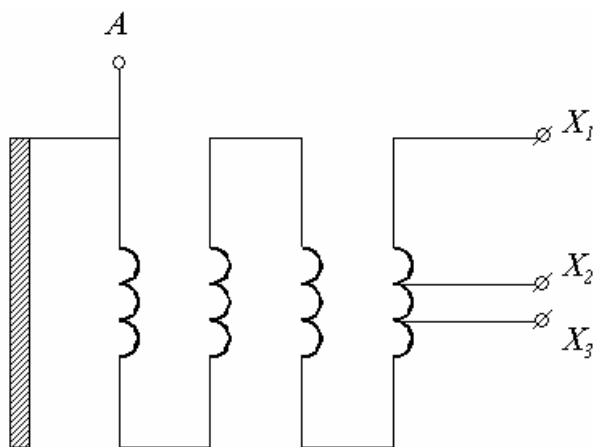


Рис. 6.9 Екранне кільце на початку обмотки

Міри внутрішнього захисту передбачаються в силових трансформаторах із класом напруги 35 кВ і вище.

Контрольні питання

1. Які причини виникнення надструму холостого ходу?
2. Які найбільш несприятливі умови раптового короткого замикання трансформатора?
3. Вихідні рівняння для режиму раптового короткого замикання, його загальне рішення й аналіз окремих випадків. Ударний струм короткого замикання.
4. Причини перенапруг у трансформаторах.
5. Схема заміщення трансформатора при перенапругах.
6. В чому складається зовнішній і внутрішній захист трансформаторів від перенапруг?
7. Яке призначення додаткових електростатичних екранів у трансформаторах?

Глава 7. Різновиди трансформаторів

7.1 Триобмоткові трансформатори

Широке застосування в енергетиці знайшли триобмоткові трансформатори, які мають одну первинну і дві вторинні обмотки (рис. 7.1).

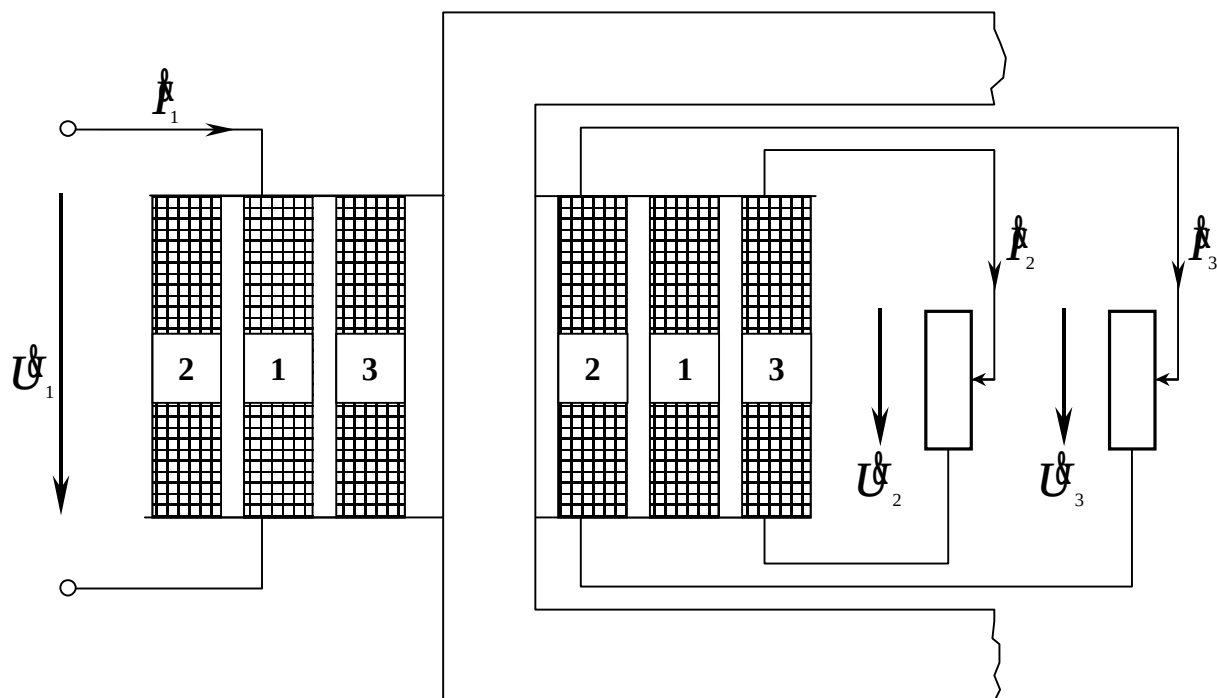


Рис. 7.1 Триобмоточний трансформатор

Такі трансформатори використовуються на електричних станціях і підстанціях для живлення розподільних мереж з різними номінальними напругами і дозволяють досягти економії в капітальних витратах за рахунок установки меншої кількості трансформаторів.

Будемо вважати, що обмотки 2 і 3 приведені до числа витків обмотки 1, для чого введем коефіцієнти трансформації:

$$K_{12} = \frac{W_1}{W_2} ; \quad K_{13} = \frac{W_1}{W_3} . \quad (7.1)$$

За номінальну потужність триобмоткового трансформатора приймається потужність найбільш потужної його обмотки.

В приведеному трансформаторі всі три обмотки мають таке ж число витків, що і первинна w_1 . Зв'язок між обмотками триобмоткового трансформатора здійснюється електромагнітним шляхом. Магнітний потік Φ_0 створюється індуктивною складовою струму холостого ходу I_0 . Магніторушійна сила, що створюється при проходженні струму холостого ходу I_0 по первинній обмотці, при навантаженні трансформатора, дорівнює сумі магніторушійних сил усіх трьох обмоток. У кожній з обмоток основний магнітний потік Φ_0 наводить ЕРС, пропорційну числу її витків.

Основні рівняння рівноваги напруг для кіл первинної і вторинної обмоток

у комплексній формі записуються у такий спосіб

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 Z_1 \\ \dot{U}'_2 &= -\dot{E}'_2 + \dot{I}'_2 Z'_2 \\ \dot{U}'_3 &= -\dot{E}'_3 + \dot{I}'_3 Z'_3 \end{aligned} \right\} \quad (7.2)$$

$$Z_1 = r_1 + jx_1;$$

$$Z'_2 = r'_2 + jx'_2;$$

$$Z'_3 = r'_3 + jx'_3 .$$

В цих рівняннях повні опори обмоток рівні.

Рівняння магніторухливих сил приведенного трансформатора має вид:

$$\dot{I}_0 = \dot{I}_1 + \dot{I}'_2 + \dot{I}'_3 \quad (7.3)$$

Векторна діаграма триобмоткового трансформатора, що відповідає рівнянням (7.2) і (7.3) при активно-індуктивному навантаженні представлена на рис. 7.2.

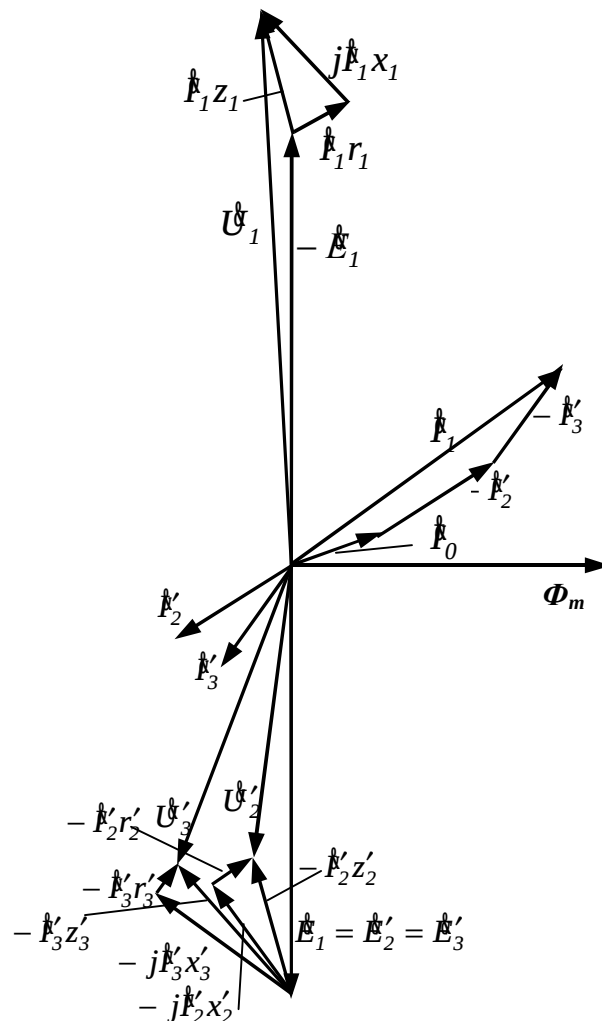


Рис. 7.2 Векторна діаграма триобмоткового трансформатора

З рівнянь (7.2, 7.3), векторної діаграми (рис. 7.2) і схеми заміщення (рис. 7.3) випливає, що при зміні навантаження на одній із вторинних обмоток змінюються напруги на обох обмотках. При зміні струмів навантаження росте струм в первинній обмотці. При цьому намагнічуючий струм і магнітний потік в триобмотковому трансформаторі практично не змінюються. Ступінь впливу навантаження в одній із вторинних обмоток на другу залежить від опору z_1 , тому що чим більший спад напруги на первинній обмотці, тим більша зміна ЕРС.

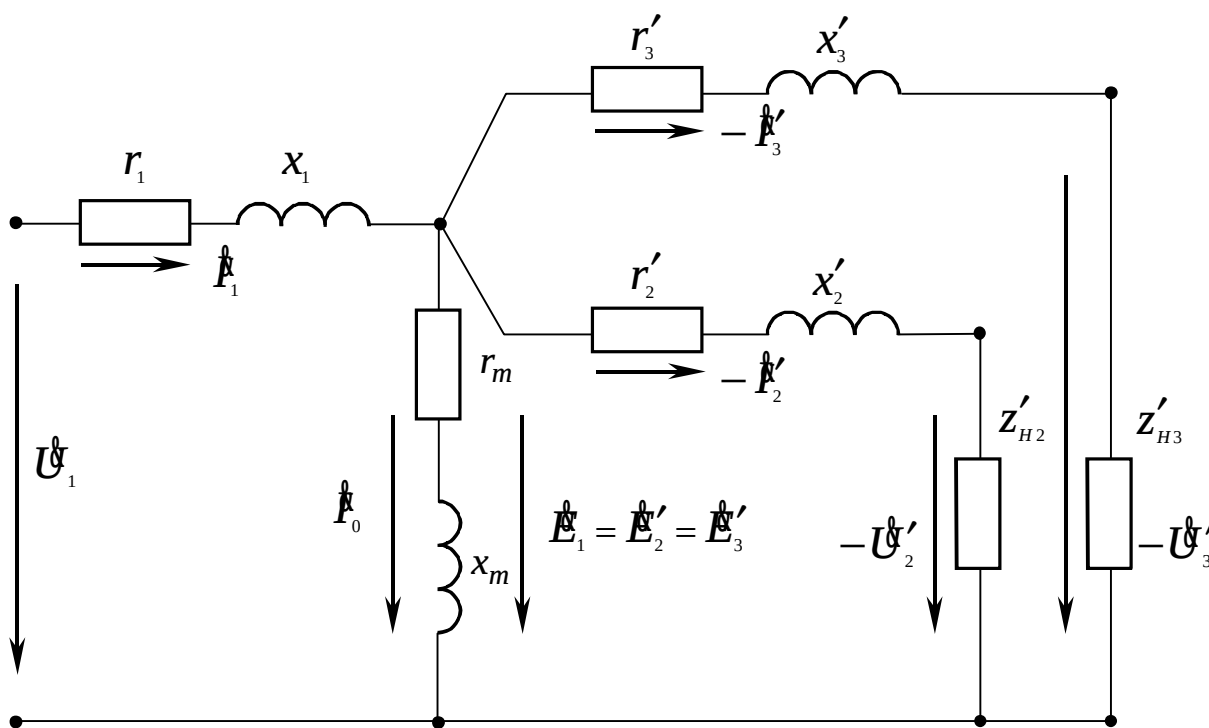


Рис. 7.3 Спрощена схема заміщення триобмоткового трансформатора

Якщо вважати опір z_m у схемі заміщення триобмоткового трансформатора рівним нескінченності, то в схемі заміщення неважко знайти три контури, утворені опорами схеми заміщення. Тому для визначення параметрів схеми заміщення необхідно провести три досліді короткого замикання.

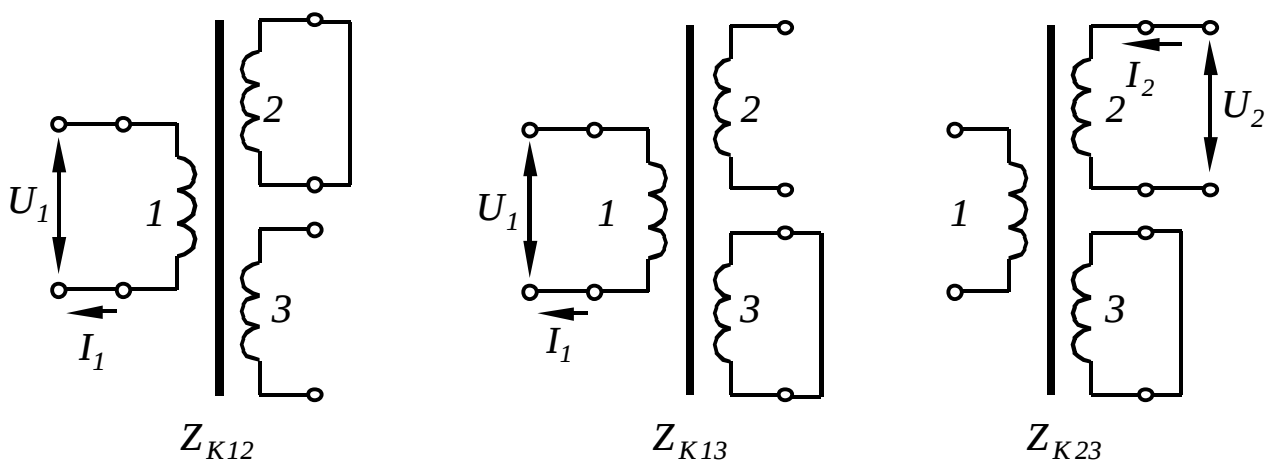


Рис.7.4 Схеми дослідів короткого замикання триобмоткового трансформатора

В цих дослідях по черзі замикаються і розмикаються обмотки трансформатора так, щоб у кожному досліді виключався один опір.

В першому досліді визначається

$$Z_{k12} = r_{k12} + jx_{k12} = Z_1 + Z'_2. \quad (7.4)$$

В другому досліді

$$Z_{k13} = r_{k13} + jx_{k13} = Z_1 + Z'_3. \quad (7.5)$$

З третього досліді визначається

$$Z_{k23} = r_{k23} + jx_{k23} = Z'_2 + Z'_3. \quad (7.6)$$

З трьох дослідів короткого замикання можна знайти параметри схеми заміщення:

$$\left. \begin{aligned} Z_1 &= \frac{1}{2}(Z_{k12} + Z_{k13} - Z_{k23}); \\ Z'_2 &= \frac{1}{2}(Z_{k12} + Z_{k23} - Z_{k13}); \\ Z'_3 &= \frac{1}{2}(Z_{k13} + Z_{k23} - Z_{k12}). \end{aligned} \right\} \quad (7.7)$$

Опір намагнічуючого контуру знаходиться з досліді холостого ходу, як і для двохобмоткового трансформатора.

Варто мати на увазі, що з дослідів короткого замикання визначаються опори x_{k12} , x_{k13} і x_{k23} , рівні сумі індуктивних опорів обмоток. Значення індуктивних опорів обмоток x_1 , x'_2 , x'_3 залежать від розташування обмоток відносно один одного і щодо стержня трансформатора. При формальному визначенні x_1 , x'_2 , x'_3 з дослідів короткого замикання можуть бути отримані негативні значення опорів.

Зміна напруги на обмотках триобмоткового трансформатора визначається для двох обмоток:

$$\begin{aligned} DU_{12} &= (U_1 - U'_2) / U_1; \\ DU_{13} &= (U_1 - U'_3) / U_1. \end{aligned} \quad (7.8)$$

Стандартом передбачається виготовлення силових триобмоткових трансформаторів з наступним співвідношенням номінальних потужностей:

$$100 \%, \quad 100 \%, \quad 100 \%.$$

При такім виконанні обмоток трансформатор може віддавати 100% потужності в одну з вторинних обмоток або сумарну потужність, рівну 100%, - в обидві вторинні обмотки.

Раніше випускалися трансформатори з обмотками

100 %,	100 %,	67 %
100 %,	67 %,	100 %
100 %,	67 %,	67 %

Ці трансформатори мали менші витрати міді, але і меншу маневреність, тому що в них можна було направляти 100 % потужності або не більш 2/3 потужності в одну обмотку.

Трифазні трансформатори мають схеми з'єднання $Y/Y_0/\Delta-0-11$ чи $Y_0/\Delta/\Delta-11-11$. Однофазні трансформатори мають групу з'єднання 0.

Триобмоткові трансформатори застосовуються як підвищувальні трансформатори, коли вони мають дві первинні обмотки, підключені до вихідних зажимів двох генераторів, а їхня третя обмотка підключена до високовольтної мережі.

7.2 Автотрансформатори

Автотрансформатором називається статичний електромагнітний пристрій, у якого вторинна обмотка є частиною первинної. Таким чином, в автотрансформатора обмотка HH електрично зв'язана з обмоткою BH .

Принципова схема однофазного або однієї фази трифазного автотрансформатора представлена на рис. 7.5.

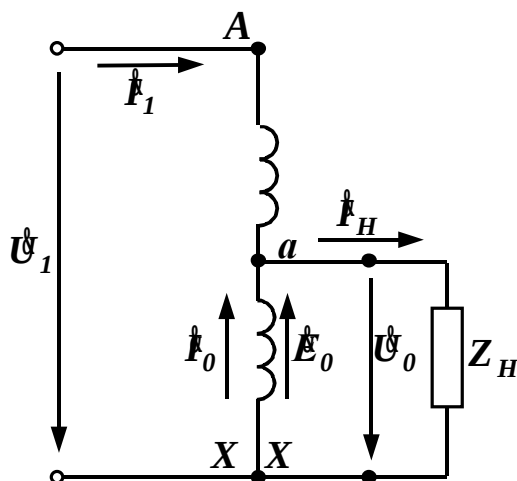


Рис. 7.5. Принципова схема заміння однофазного понижуючого автотрансформатора.

В режимі холостого ходу ($z_H = \infty$)

$$U_2 = U_{ax} = \frac{U_{AX}}{W_{AX}/W_{ax}} = \frac{U_1}{K_A}, \quad (7.9)$$

де $K_A = \frac{w_{AX}}{w_{ax}}$ – коефіцієнт трансформації автотрансформатора.

В навантажувальному режимі струм I_{ax} загальної частини обмотки представляє геометричну суму струмів I_1 і I_2 .

Струми I_1 і I_2 практично знаходяться в протифазі. Отже, для діючих значень цих струмів справедливо

$$I_2 = I_1 + I_{ax}. \quad (7.10)$$

Якщо знехтувати намагнічуючим струмом, то

$$I_1 = I'_2 = I_2 / K_A.$$

“Зовнішня” або “прохідна” потужність автотрансформатора, що передається з однієї мережі в іншу дорівнює

$$S_{np} = E_2 I_2 = E_2 (I_{ax} + I_1) = E_2 I_{ax} + E_2 I_1 = S_{em} + S_{el}, \quad (7.11)$$

де $S_{em} = E_2 I_{ax}$ – потужність, що передається у вторинний контур електромагнітним шляхом, називається “внутрішньою” або “розрахунковою” потужністю; $S_{el} = E_2 I_1$ – потужність, що передається у вторинний контур, внаслідок електричного зв'язку між первинною і вторинною обмотками.

З огляду на те, що

$$I_{ax} = I_2 - I_1 = I_2 \left(1 - \frac{1}{K_A} \right),$$

знаходимо

$$S_{poz} = E_2 I_{ax} = E_2 I_2 \left(1 - \frac{1}{K_A} \right) = S_{np} \left(1 - \frac{1}{K_A} \right) \quad (7.12)$$

(у трансформаторів $S_{poz} = S_{np} = E_2 I_2$).

Отже, розрахункова потужність автотрансформатора в $\left(1 - \frac{1}{K_A} \right)$ раз менше потужності двообмоточного трансформатора при однаковій прохідній потужності, переданої з первинної у вторинний контур. Це дозволяє виконувати автотрансформатори з меншою масою і габаритами. Ця перевага губиться при великих значеннях коефіцієнта трансформації K_A . Тому звичайно $K_A \notin 2,5$.

Автотрансформатори великої потужності застосовуються для з'єднання високовольтних мереж з різними напругами.

Трифазні автотрансформатори, як правило, на стороні вищої напруги з'єднуються в зірку з нульовим проводом (рис. 7.6).

З'єднання в зірку забезпечує зниження напруги, на яке розраховується ізоляція автотрансформатора.

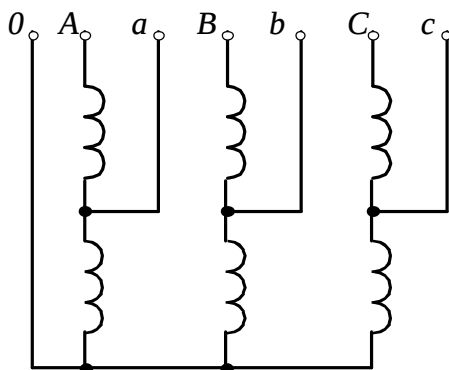


Рис. 7.6. Принципова схема трифазного автотрансформатора

Застосування автотрансформаторів поліпшує ККД енергосистем, забезпечує зниження вартості передачі енергії, але приводить до збільшення струмів короткого замикання.

7.3 Двохомоткові трансформатори з розщепленою первинною (або вторинною) обмоткою

Таку назву одержали трансформатори з однією первинною (або вторинною) обмоткою і з розщепленою вторинною (або первинною) обмоткою. Оскільки розщеплена обмотка складається з двох самостійних електрично не зв'язаних частин, такий трансформатор власне кажучи є багатообмотковим і відрізняється від триобмоткового лише тим, що в ньому не потрібно здійснювати передачу енергії з однієї частини розщепленої обмотки в іншу.

Будова однофазного двохомоткового трансформатора з однією первинною обмоткою 1 і розщепленої на дві частини (2 і 3) вторинною обмоткою показана на рис. 7.7. Магнітопровід трансформатора виконаний бронестержневим.

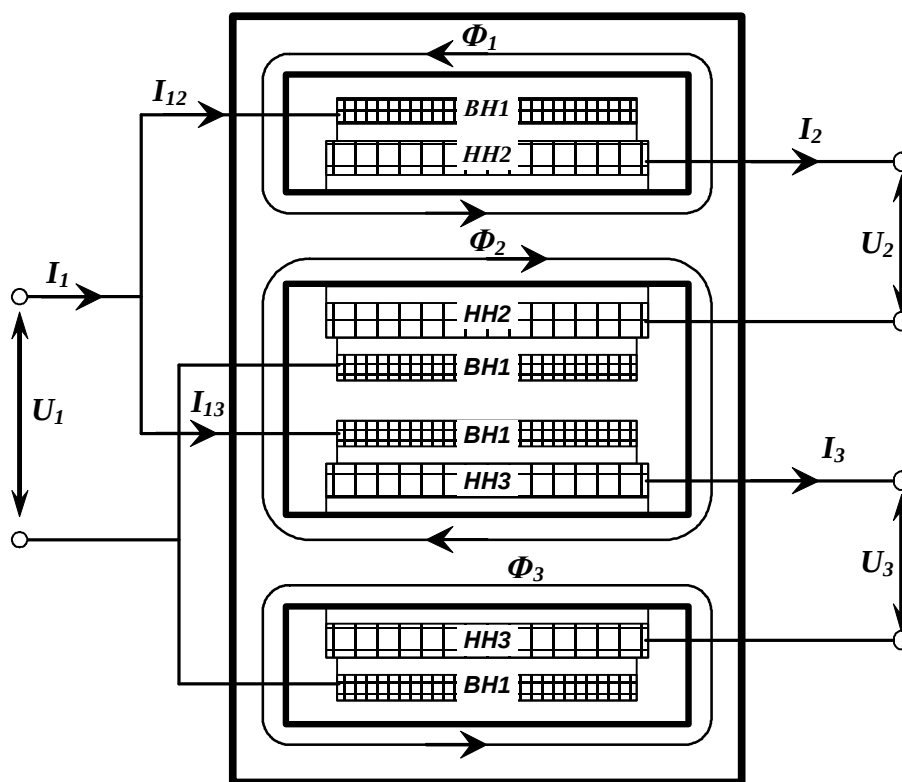


Рис. 7.7 Схема двохомоткового однофазного трансформатора з розщепленою обмоткою НН

Вторинні обмотки 2 і 3 нижчої напруги *НН* розміщуються на різних стержнях, первинна обмотка 1 вищої напруги має дві паралельні вітки, що також розміщуються на різних стержнях.

При такому розташуванні обмоток магнітний зв'язок між двома частинами (2 і 3) обмотки *НН* дуже слабка. Передача енергії з мережі 2 в мережу 3 за допомогою магнітного поля майже цілком виключається і трансформатор мож-

на розглядати як два окремих трансформатори, один із яких зв'язує мережу 1 з мережею 2, а інший – мережу 1 з мережею 3. При навантаженні однієї з частин обмотки нижчої напруги HN , наприклад $HN2$, на стороні вищої напруги VH буде практично навантажений тільки один з паралельних контурів, який розміщений на тому ж стержні, що й обмотка $HN2$. Зрозуміло, такий трансформатор може передавати енергію й у зворотному напрямку. У цьому випадку він має дві первинні обмотки $HN2$ і $HN3$, що живляться, наприклад, від двох окремих генераторів, і одну вторинну, $VH1$.

Номинальні напруга U_3 і U_2 можуть бути як однаковими, так і різними. Магнітні потоки Φ_2 і Φ_3 у стержнях трансформатора і приведені струми I'_2 і I'_3 залежать від співвідношення між напругою U_1 і приведеними напругами U'_2 і U'_3 . Якщо $U'_2 = U'_3$ то $I'_2 = I'_3$ і $\Phi_2 = \Phi_3$, і, отже, потоки в крайніх необмотаних стержнях бронестержнєвого магнітопроводу відсутні.

У загальному випадку, коли напруги в мережах 2 і 3 такі, що $U'_2 \neq U'_3$, приведені струми і потоки неоднакові, $I'_2 \neq I'_3$ і $\Phi_2 \neq \Phi_3$ і потік, рівний різниці потоків $\Phi_2 - \Phi_3$ замикається через крайні стрижні. Якби магнітопровід трансформатора був двостержневим, то при $U'_2 \neq U'_3$ потік $\Phi_2 - \Phi_3$ замикався б між верхнім і нижнім ярмами поза магнітопроводу й у стінках масляного бака й в інших масивних металевих конструктивних частинах, розташованих у зовнішньому магнітному полі, це б визивало значні втрати від вихрових струмів. Тому для трансформаторів з розщепленою обмоткою краща бронестержнєва конструкція магнітопроводу.

У порівнянні зі звичайним двообмотковим трансформатором з однією обмоткою вищої напруги VH , приєднаної до мережі 1, і однією обмоткою нижчої напруги HN , приєднаної до мереж 2 і 3, двообмотковий трансформатор з розщепленою на дві частини (2 і 3), обмоткою HN володіє тим безсумнівною перевагою, що при короткому замиканні на виводах мережі 2 він споживає з мережі 1 удвічі менший струм. Це пояснюється тим, що в звичайному двообмотковому трансформаторі обмотки 2 і 3 з'єднані паралельно і його опір короткого замикання $Z_{к123}$ дорівнює половині опору короткого замикання обмоток 1 і 2 (чи 1 і 3) трансформатори з розщепленою обмоткою $Z_{к12} = Z_{к13}$. Саме тому трансформатори з розщепленою обмоткою одержали помітне поширення.

Контрольні питання

1. Принципова схема триобмоткового трансформатора, рівняння напруг і струмів.
2. Векторна діаграма і схема заміщення триобмоточного трансформатора.
3. Схеми дослідів короткого замикання триобмоточного трансформатора.
4. Які достоїнства триобмоточних трансформаторів?
5. Перелічіть достоїнства і недоліки автотрансформаторів.
6. Чи залежать достоїнства автотрансформатора від коефіцієнта трансформації? Поясніть, чому?.
7. Принципова схема двообмоточного трансформатора з розщепленою вторинною обмоткою.

Розділ 2. Асинхронні машини

Асинхронні машини одержали найбільш широке застосування в сучасних електричних установках і є самим розповсюдженим видом безколекторних електричних машин змінного струму. Як і будь-яка електрична машина, асинхронна машина оборотна і може працювати як у генераторному, так і в режимі двигуна. Однак переважне застосування мають асинхронні двигуни, що складають основу сучасного електроприводу. Області застосування асинхронних двигунів дуже широкі – від приводу пристроїв автоматики і побутових електроприладів до приводу великого гірничого обладнання (екскаваторів, дробарок, млинів і т.п.). Відповідно до цього потужність асинхронних двигунів, що випускаються електромашинобудівельною промисловістю, складає діапазон від часток ватів до тисяч кіловатів при напрузі живильної мережі від десятків вольтів до 10 кВ. Найбільше застосування мають трифазні асинхронні двигуни, розраховані на роботу від мережі промислової частоти (50 Гц). Асинхронні двигуни спеціального застосування виготовляються на підвищені частоти змінного струму (200, 400 Гц і більше). Основна увага в даному розділі приділена вивченню трифазних асинхронних двигунів загального застосування.

Глава 8. Будова і принцип дії асинхронних машин

8.1 Типи і конструктивні елементи асинхронних машин

Асинхронною машиною називають електричну машину змінного струму, засновану на використанні обертового магнітного поля, частота обертання ротора якої залежить від навантаження.

Розрізняють два типи асинхронних машин:

- 1) безколекторні;
- 2) колекторні.

Безколекторні асинхронні машини є їх основним типом, тому надалі, коли говоримо про асинхронну машину, маємо на увазі саме цей тип асинхронних машин.

Колекторні асинхронні машини серійно вітчизняна промисловість не випускає. Вони застосовуються як електричні машини спеціального призначення.

Можна без перебільшення сказати, що промислове виробництво приводиться в рух асинхронними двигунами. Основна серія асинхронних машин 4А містить в собі двигуни від 0,4 до 400 кВт. Випускаються високовольтні машини у виді єдиної серії 4А на потужності понад 400 кВт.

Конструктивно асинхронний двигун складається з двох основних частин, розділених повітряним зазором: нерухомого **статора** й обертового **ротора**. Кожна з цих частин має осердя і обмотку. При цьому обмотка статора включається

ся в мережу і є як би первинною, а обмотка ротора – вторинною, тому що енергія в неї надходить з обмотки статора за рахунок магнітного зв'язку між цими обмотками.

По своїй конструкції асинхронні двигуни розділяються на два типи: двигуни з короткозамкнутим ротором і двигуни з фазним ротором.

Розглянемо основні конструктивні елементи цих двох типів двигунів.

Асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором одержали найбільше поширення й у серії 4А виконуються на всі потужності, включаючи 400 кВт.

Асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором серії 4А можна розділити на два різновиди по ступеню захисту і способу охолодження. Машини закриті, захищені від попадання усередину її бризгів будь-якого напрямку і предметів діаметром більш 1 мм, мають зовнішній обдув вентилятором (рис. 8.1). За ДСТ 14254-69 це виконання має позначення IP44.

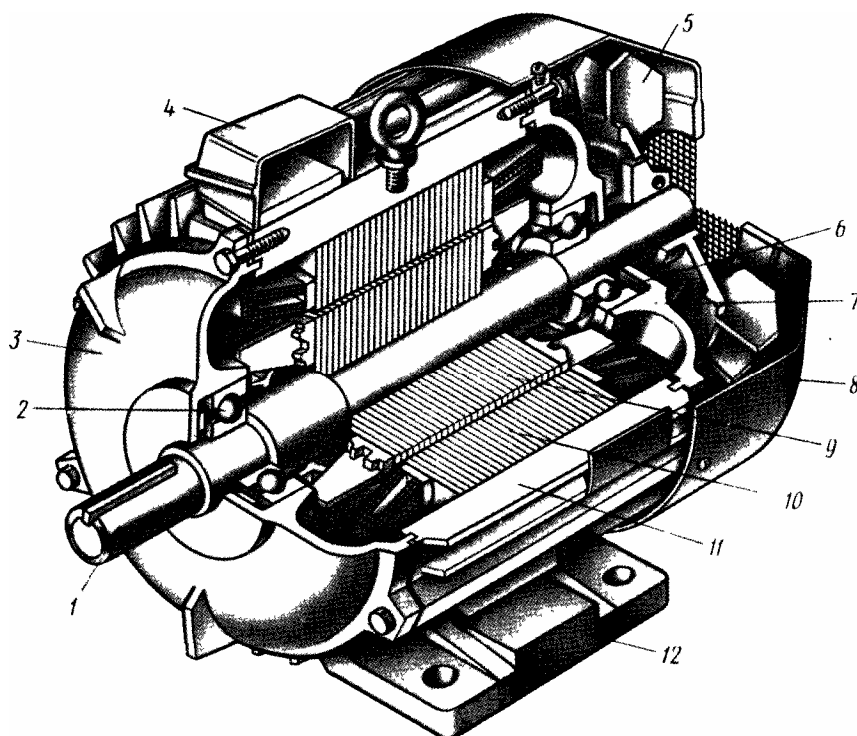


Рис. 8.1. Будова трифазного асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором:
1 – вал; 2, 6 – підшипники; 3, 7 – підшипникові щити; 4 – коробка виводів; 5 – вентилятор; 8 – кожух вентилятора; 9 – осердя ротора з короткозамкнутою обмоткою; 10 – осердя статора з обмоткою; 11 – корпус; 12 – лапи

Другим різновидом конструкції є машини з виконанням по ступені захисту IP23. У цих машинах забезпечується захист від можливості доторку пальців рук і твердих предметів діаметром більш 12,5 мм зі струмоведучими обертовими частинами машини. Виконання IP23 забезпечує захист від влучення усередину машини крапель, що падають під кутом 60° до вертикалі. Іноді таке виконання називають краплезахисним.

Нерухома частина двигуна – статор – складається з корпусу 11 і осердя 10 із трифазною обмоткою. Корпус двигуна відливають з алюмінієвого сплаву, або чавуну або роблять зварним. Розглянутий двигун має закрите виконання, що

обдувається. Тому поверхня його корпусу має ряд подовжніх ребер, призначення яких полягає в тому, щоб збільшити поверхню охолодження двигуна.

В корпусі розташовано осердя 10 статора, що має шихтовану конструкцію: відштамповані пластини з тонколистової електротехнічної сталі товщиною 0,5 мм покриті шаром ізоляційного лаку, зібрані в пакет і скріплені спеціальними скобами або подовжніми звареними швами по зовнішній поверхні пакета. Така конструкція осердя сприяє значному зменшенню вихрових струмів, що виникають у процесі намагнічування осердя обертовим магнітним полем. На внутрішній поверхні осердя статора знаходяться подовжні пази, в яких розташовані пазові частини обмотки статора, з'єднані у визначеному порядку лобовими частинами, що знаходяться за межами осердя по його торцевих сторонах.

В розточці статора розташована обертова частина двигуна – ротор, що складається з вала 1 і осердя 9 з короткозамкнутою обмоткою. Таку обмотку, називають «біляче колесо», воно являє собою ряд металевих (алюмінієвих або мідних) стержнів, розташованих в пазах осердя ротора, замкнених із двох сторін короткозамикаючими кільцями (рис. 8.2, а). Осердя ротора також має шихтовану конструкцію, але листи ротора не покриті ізоляційним лаком, а мають на своїй поверхні тонку плівку оксиду. Це є достатньою ізоляцією, що обмежує вихрові струми, тому що величина їх невелика через малу частоту перемагнічування осердя ротора. Наприклад, при частоті мережі 50 Гц і номінальному ковзанні 6 % частота перемагнічування осердя ротора складає 3 Гц. Короткозамкнена обмотка ротора в більшості двигунів виконується заливанням зібраного осердя ротора розплавленим алюмінієвим сплавом. При цьому одночасно зі стержнями обмотки відливаються короткозамикаючі кільця і вентиляційні лопатки (рис. 8.2, б).

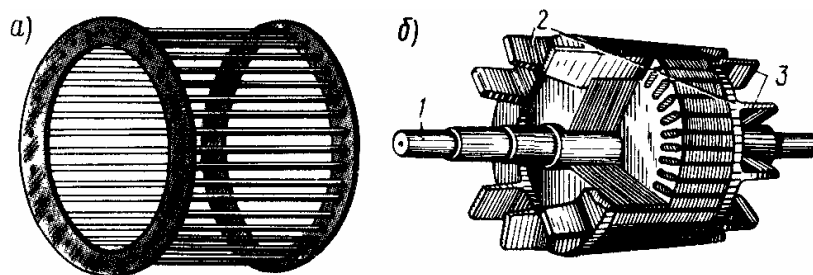


Рис. 8.2. Короткозамкнений ротор: а — обмотка «біляча клітка», б — ротор з обмоткою, виконаної методом лиття під тиском, 1 — вал, 2 — короткозамикаючі кільця, 3 — вентиляційні лопатки

Вал ротора обертається в підшипниках кочення 2 і 6, розташованих в підшипникових щитах 3 і 7.

Охолодження двигуна здійснюється методом обдуву зовнішньої оребреної поверхні корпусу відцентровим вентилятором 5, прикритим кожухом 8. На торцевій поверхні цього кожуха знаходяться отвори для забору повітря. Двигуни потужністю 15 кВт і більше крім закритого роблять ще і захищеного виконання з внутрішньою самовентиляцією. В підшипникових щитах цих двигунів знаходяться отвори (жалюзі), через які повітря за допомогою вентилятора проганяється через внутрішню порожнину двигуна.

При цьому повітря «омиває» нагріті частини (обмотки, осердя) двигуна й охолодження виходить більш ефективним, ніж при зовнішньому обдуві. Кінці обмоток фаз виводять на затискачі коробки виводів 4. Як правило асинхронні двигуни призначені для включення в трифазну мережу на дві різних напруги, що відрізняються в $\sqrt{3}$ раз. Наприклад, двигун розрахований для включення в мережу на напруги 380/660 В. Якщо в мережі лінійна напруга 660 В, то обмотку статора варто з'єднати зіркою, а якщо 380 В, то трикутником. В обох випадках напруга на обмотці кожної фази буде 380 В. Виводи обмоток фаз розташовують на панелі таким чином, щоб з'єднання обмоток фаз було зручно виконувати за допомогою перемичок, без перехресчування останніх. У деяких двигунах невеликої потужності в коробці виводів знаходяться лише три затискачі. У цьому випадку двигун може бути включений у мережу лише на одну напругу (з'єднання обмотки статора такого двигуна чи зіркою, чи трикутником виконано усередині двигуна).

Монтаж двигуна в місці його установки здійснюється або за допомогою лап 12, або за допомогою фланця. В останньому випадку на підшипниковому щиті (з боку виступаючого кінця вала) роблять фланець з отворами для кріплення двигуна на робочій машині. Для запобігання від можливої поразки електричним струмом обслуговуючого персоналу двигуни забезпечуються болтами заземлення (не менше двох).

Асинхронні двигуни з фазним ротором конструктивно відрізняється від розглянутого двигуна головним чином будовою ротора (рис. 8.3).

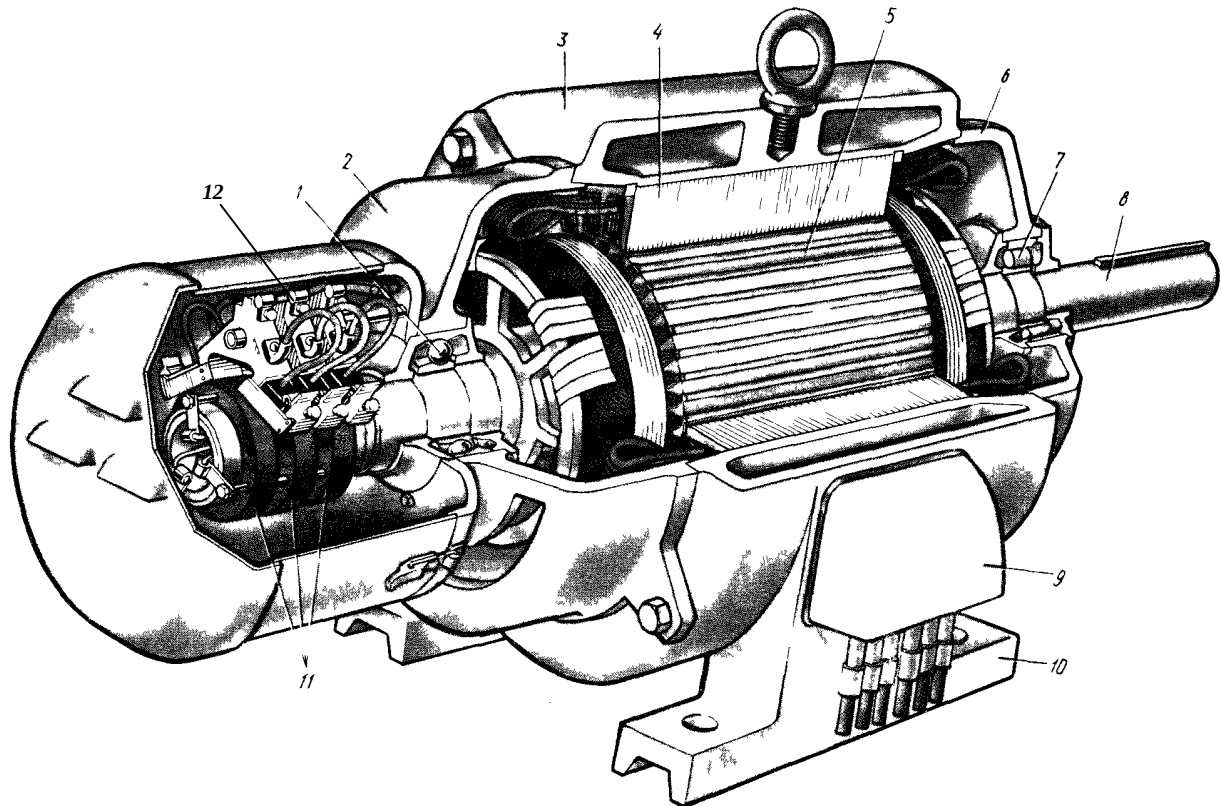


Рис. 8.3. Будова трифазного асинхронного двигуна з фазним ротором:
1, 7 – підшипники; 2, 6 – підшипникові щити; 3 – корпус; 4 – осердя статора з обмоткою;
5 – осердя ротора; 8 – вал; 9-коробки виводів; 10 – лапи; 11 – контактні кільця,

Статор цього двигуна також складається з корпусу 3 і осердя 4 із трифазною обмоткою, а також підшипникові щити 2 і 6 з підшипниками кочення 1 і 7. До корпусу 3 прикріплені лапи 10 і коробка виводів 9. Однак ротор має більш складну конструкцію. На валу 8 закріплене шихтоване осердя 5 із трифазною обмоткою, виконаної аналогічно обмотці статора. Цю обмотку з'єднують зіркою, а її кінці приєднують до трьох контактних кілець 11, розташованих на валу й ізольованих одне від одного і від вала. Для здійснення електричного контакту з обмоткою обертового ротора в двигуні передбачений струмозйомний апарат 12, що складається з щіток і щіткотримачів. Щіткотримачі укріплені на ізольованій частині пальця, металевий кінець якого угвинчений у прилив підшипникового щита.

Асинхронні двигуни з фазним ротором мають більш складну конструкцію. Вони менш надійні, але мають кращі регульовальні і пускові властивості, ніж двигуни з короткозамкнутим ротором.

Система вентиляції і ступінь захисту двигунів з фазним ротором – IP23 та IP44.

На корпусі асинхронного двигуна прикріплена табличка, на якій зазначені тип двигуна, завод – виготовлювач, рік випуску і номінальні дані (корисна потужність, напруга, струм, коефіцієнт потужності, частота обертання і ККД).

8.2 Трифазні обмотки змінного струму

Принцип виконання обмоток. На статорі асинхронної (синхронної) машини і на роторі асинхронної машини з фазним ротором укладаються трифазні обмотки змінного струму. Ці обмотки безпосередньо беруть участь у перетворенні електричної енергії в механічну у двигунів і навпаки у генераторів. Тому до них пред'являють ряд вимог.

В електричних машинах, як правило, застосовуються симетричні обмотки. Для трифазних симетричних обмоток необхідно виконати наступні умови: усі три фази обмотки повинні знаходитися в однакових умовах; у всіх трьох фазах повинні наводитися однакові ЕРС; електрорушійні сили фаз повинні бути зсунуті у просторі на 120 електричних градусів.

Крім того, для роторних обмоток повинна бути виконана геометрична симетрія, тобто виводи фазних обмоток повинні розташовуватися рівномірно по довжині обмотки.

При виконанні обмоток необхідно забезпечити механічну й електричну міцність, достатню нагрівостійкість, технологічність виготовлення і зручність ремонту. Обмотки повинні мати мінімальну масу. Вони повинні працювати при найкращих енергетичних показниках машини.

Найпростішим елементом обмотки є виток, що складається з двох провідників, розташованих на відстані y , рівному полюсній поділці t , або $y < t$. У ба-

гатофазних (трифазних) обмотках кожна фаза утворює самостійне електричне коло з повним числом провідників обмотки.

Загальне число провідників обмотки розраховується у такий спосіб:

$$N = 2W_{\phi} \cdot a_{\phi} \cdot m, \quad (8.1)$$

де W_{ϕ} – число послідовно з'єднаних витків в фазі; a_{ϕ} – число паралельних віток в фазі; m – число фаз.

Щоб розподілити провідники обмотки по фазах використовують метод, заснований на застосуванні зірки пазових векторів ЕРС. Ця зірка має число променів

$$n_{II} = \frac{\kappa z}{p}, \quad (8.2)$$

де z – число пазів статора або ротора; p – число пар полюсів машини; κ – найменший множник, що робить n_{II} цілим числом.

Два сусідніх вектори в цій зірці розташовані під кутом

$$g = \frac{360^{\circ} p}{z} \text{ [ел. град.]} \quad (8.3)$$

Приклад: $z = 24, p = 2, m = 3$.

Виконаємо розподіл провідників по фазах

$$n_{II} = \frac{1 \cdot 24}{2} = 12, g = \frac{360^{\circ} \cdot 2}{24} = 30 \text{ [ел. град.]}$$

Зірка пазових ЕРС обмотки, для нашого випадку, зображена на рис. 8.4.

Номера векторів від 1-12 відповідають одній парі полюсів, від 13 – 24 іншій парі полюсів. Вектори зірки пазових векторів ЕРС розбиваються на 3 групи, відповідно трьом фазам обмотки, причому протилежно спрямовані вектори відносяться до провідників, що утворюють **виток**.

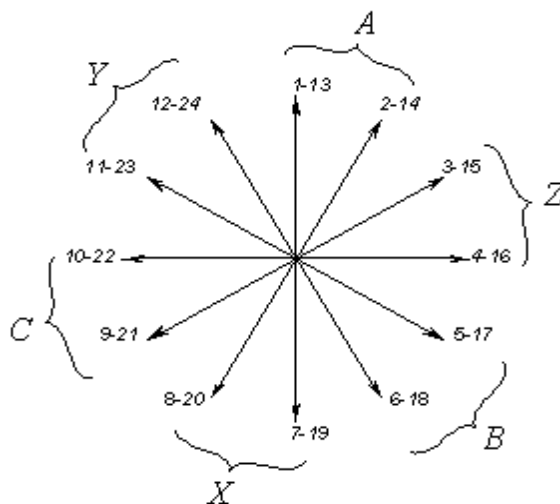


Рис.8.4 Зірка пазових ЕРС обмотки

Котушкові обмотки виконують на спеціальному шаблоні. Їх мотають ізольованим проводом. На котушку, що має w_k витків, наноситься корпусна ізоляція. Схематично котушка петльової обмотки представлена на рис. 8.5, а.

Стержневі обмотки виконують у великих машинах, розрахованих на великі струми, у яких укладання цілих котушок скрутне. Така обмотка складається з окремих напівкотушок. Схематично напівкотушки стержневої хвильової обмотки представлені на рис. 8.5, б.

Після укладання напівкатушок в пази статора або ротора виконується їхнє з'єднання (пайка) в лобовій частині обмотки.

В пазах статора або ротора обмотки можуть бути покладені в один або два шари (рис. 8.6)

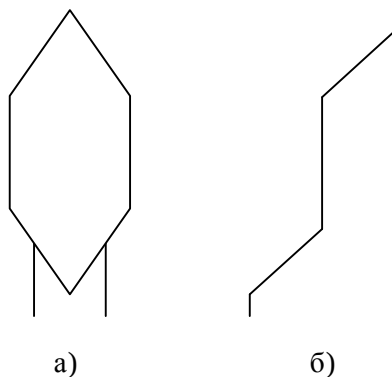


Рис. 8.5. Котушка петльової (а) і напівкатушка стержневої (б) обмоток

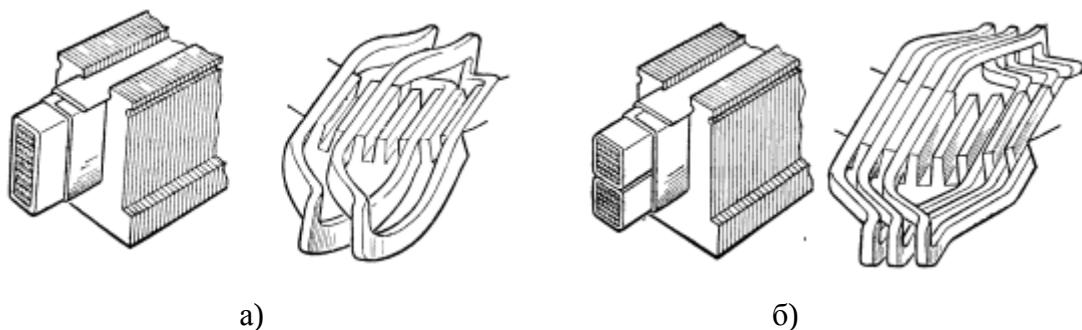


Рис. 8.6. Одношарова (а) і двошарова (б) обмотки

Котушки обмотки укладаються в пази, проштамповані в листовій сталі, що збирається в пакети. Пази бувають наступних форм у залежності від потужності і напруги машини: відкриті, напіввідкриті, напівзакриті, закриті.

Відкриті і напіввідкриті пази, як правило, бувають прямокутної форми (рис. 8.7, а і б), напівзакриті і закриті бувають прямокутної і трапецієдної форми з закругленими кутами (рис. 8.7, в, г, д).

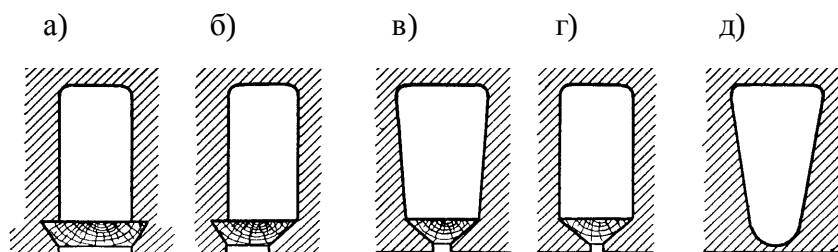


Рис. 8.7. Форма пазів

Обмотки можуть виконуватися з повним (діаметральним) кроком $y = t$, (де t – полюсний поділ) і з укороченим кроком $y < t$.

Ціль скорочення кроку обмотки наступна: ЕРС, що індукується в обмотках змінного струму, в кривій зміни ЕРС в часі можуть містити крім основної, також вищі гармонійні непарного порядку. Ці вищі гармонійні негативно позначаються на роботі самої машини і на роботі живильної мережі. В трифазних обмотках 3-я гармонійна ЕРС і кратні трьом компенсуються пофазово. Тому найбільш сильне вираження по амплітуді ЕРС 5-го і 7-го порядку. Для того, щоб в кривій зміни ЕРС в часі компенсувати 5-ю гармонійну ЕРС необхідно укоротити крок обмотки на $(1/5)t$.

При укороченні кроку обмотки на $(1/5)t$ 5-і гармонійні ЕРС, що індукуються в провідниках діють по контуру витка зустрічно і взаємно компенсуються.

Відповідно, при укороченні кроку витка на $(1/7)t$ компенсуються 7-і гармонійні ЕРС. Т.ч., укорочення кроку витка в обмотках змінного струму виконують від $(1/5)t$ до $(1/7)t$, що відповідає відношенню $y/t = 0,8 \div 0,86$. Більш докладно ці питання розглянуті в параграфі 8.3.

Порядок розрахунку обмоток змінного струму. Незалежно від типу, обмотку розраховують у наступній послідовності:

Дано: $2p$ – число полюсів машини;

q – число пазів на полюс і фазу;

a_ϕ – число віток обмотки;

m – число фаз.

Розраховують:

1) число пазів статора (ротора)

$$z = 2pmq. \quad (8.4)$$

2) полюсний поділ

$$t = z/(2p). \quad (8.5)$$

3) крок обмотки приймають відповідно

$$y = t \quad \text{чи} \quad y < t.$$

4) дані для зірки пазових векторів ЕРС

$$n_{II} = \kappa z/p, \quad a = 360^\circ p/z. \quad (8.6)$$

5) складається таблиця з'єднань котушок і котушкових груп;

6) викреслюється розгорнута схема обмотки;

7) розраховуються обмотувальні коефіцієнти.

Характеристика основних типів обмоток змінного струму. Одношарові обмотки застосовуються в машинах малої потужності (до 10 кВт). По конструктивному виконанню цих обмоток розрізняють:

- одношарові обмотки з котушками не рівної ширини;
- одношарові обмотки з котушками рівної ширини.

Одношарові обмотки з котушками не рівної ширини по розміщенню лобових частин поділяються на **концентричні**, у яких лобові частини секцій охоплюють одна одну, а також **дво-** і **триплоскостні**, у яких лобові частини розташовуються в двох або трьох площинах (рис. 8.8, а, б).

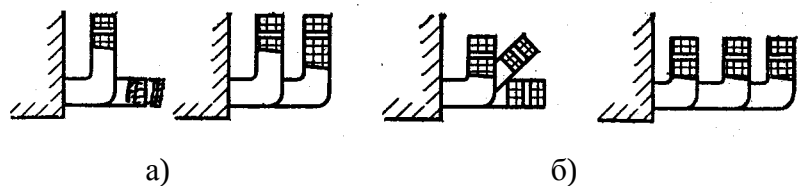


Рис. 8.8 Лобові частини одношарової обмотки: а – двоплоскостної; б – триплоскостної

На рис. 8.9 представлено схему – розгортка трифазної одношарової двоплоскостної обмотки для $2p = 4$, $q = 2$, $Z = 2pmq = 2 \times 3 \times 2 \times 2 = 24$. Дво- і триплоскостні обмотки не технологічні, тому що мають різні за формою секції.

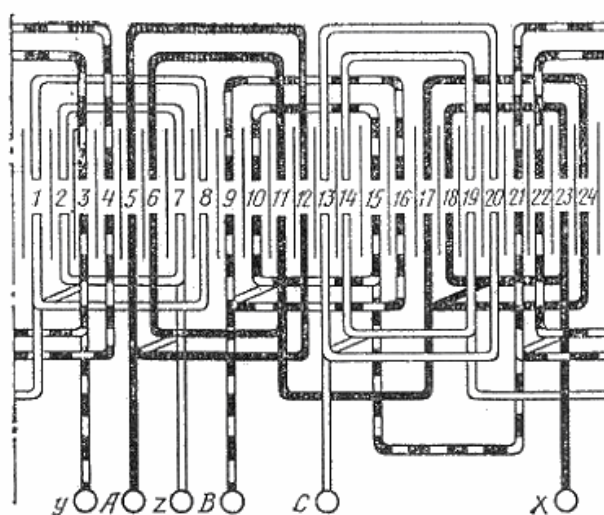


Рис. 8.9. Трифазна одношарова двоплоскостна обмотка ($m = 3$, $2p = 4$, $Z = 24$)

Одношарові обмотки з котушками рівної ширини або шаблонів застосовуються в статорних обмотках машин потужністю до 10 кВт. Ці обмотки мають м'які однакові секції. Проста трифазна шаблонна обмотка для $2p = 2$, $q = 3$, $Z = 2pmq = 2 \times 3 \times 3 = 18$ показана на рис. 8.10. Секція шаблонної обмотки представлена на рис. 8.11. Як правило, такі секції складаються з декількох витків або десятків витків.

Двошарові обмотки застосовуються частіше одношарових. Двошарові обмотки дають можливість вибору більш сприятливого кроку, вони більш дешеві внаслідок зменшення витрати міді й ізоляції і краще допускають механіза-

цію виготовлення.

Двошарові обмотки поділяються на *петльові* і *хвильові*.

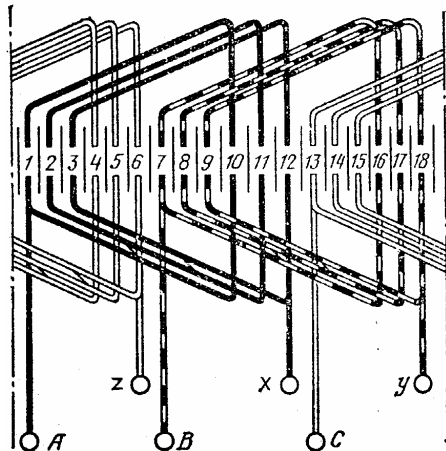


Рис. 8.10 Трифазна шаблонува обмотка
($m = 3$, $2p = 2$, $q = 3$, $Z = 18$)

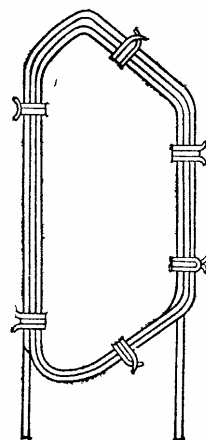


Рис. 8.11. Котушка шаблонува обмотки
перед укладанням в пази

Обмотки електричних машин характеризуються кроком обмотки. Розрізняють результуючий крок обмотки y – відстань між двома послідовно з'єднаними секціями – і часткові кроки y_1 і y_2 , що визначають відповідно відстань між початком і кінцем секції і кінцем першої і початком сусідньої секції. Як правило, кроки обмотки вимірюються числом пазів на полюсній поділці.

Петльові обмотки. На рис. 8.12 показаний елемент схеми петльової обмотки. Тут y_1 – перший частковий крок – відстань між початком і кінцем секції, y_2 – другий частковий крок – відстань між кінцем першої і початком другої секції.

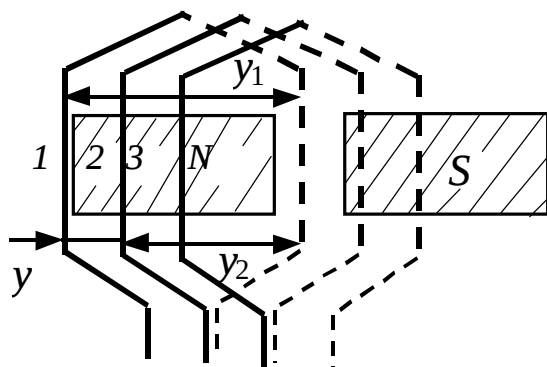


Рис. 8.12. Секції петльової обмотки.

На схемах обмоток половина секції, що лежить в верхній частині паза, зображується суцільною лінією, а частина секції, що лежить в нижній частині паза, – штриховою лінією.

В петльових обмотках результуючий крок y дорівнює різниці часткових кроків:

$$y = y_1 - y_2 \quad (8.7)$$

В простих петльових обмотках $y = 1$.

Для економії міді і поліпшення форми поля в повітряному зазорі двошарові обмотки виконують з укороченим кроком $y < t$. При $y = 0,8t$ досягається економія міді, а зменшення основної гармоніки ЕРС у порівнянні з ЕРС обмотки з діаметральним кроком складає усього кілька відсотків.

На рис. 8.13 представлена схема трифазної двошарової петльової обмотки з укороченим кроком для $m = 3$, $2p = 4$, $q = 2$, $y_p = 5$, $Z = 2pmtq = 2 \times 2 \times 3 \times 2 = 24$.

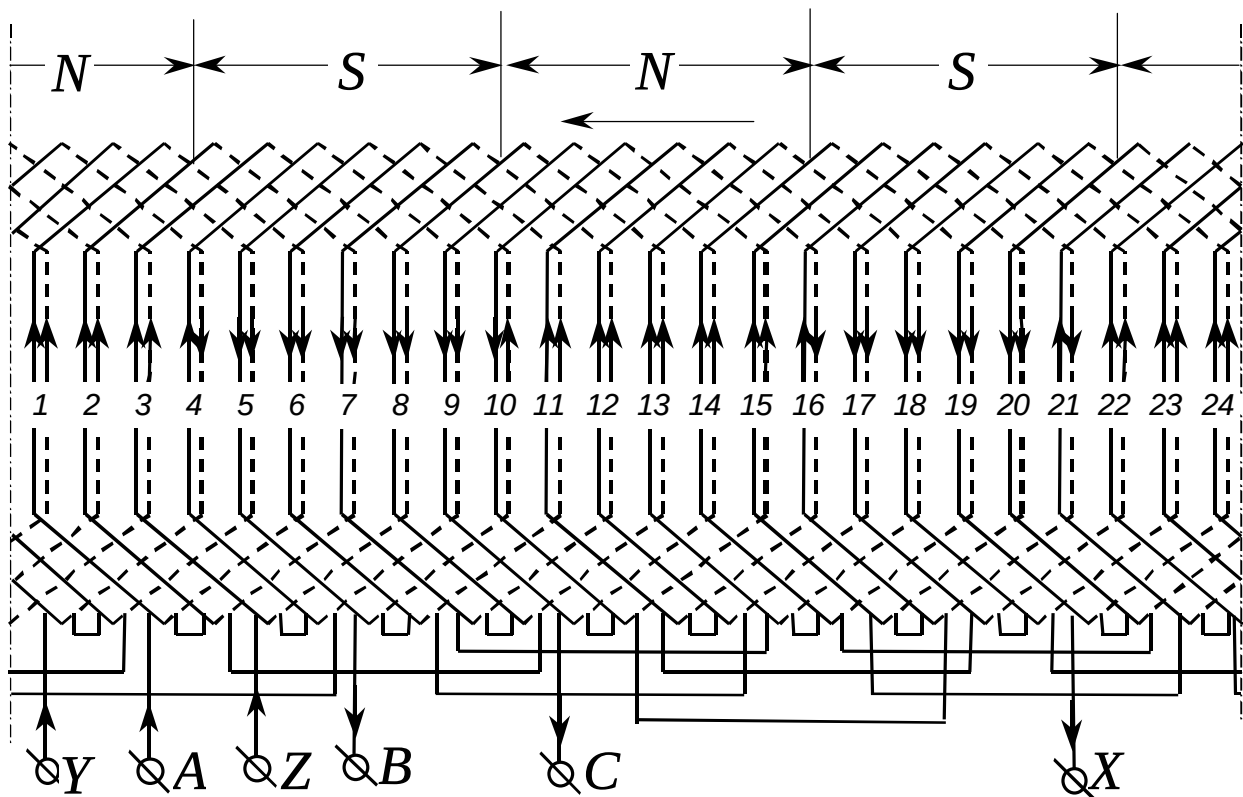


Рис. 8.13. Трифазна двошарова петльова обмотка з укороченим кроком
($2p = 4$, $2a = 2$, $q = 2$, $y = 0,8\tau = 5$, $Z = 24$)

Фаза обмотки складається з секційних груп, що з'єднуються між собою відповідним чином. Найчастіше це послідовне з'єднання в одну вітку ($a = 1$), яке дозволяє отримати максимальну ЕРС (рис. 8.14, а).

В низьковольтних машинах секційні групи з'єднують паралельно, тоді в одношаровій обмотці $a = P$, а двошаровій – $a = 2P$ (рис. 8, 14, б).

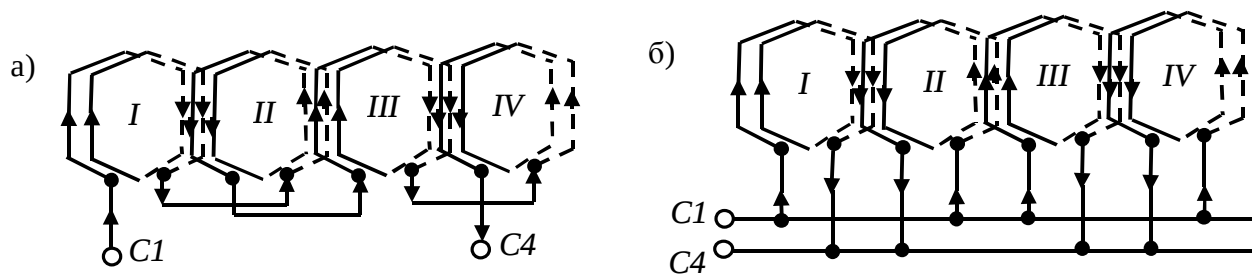


Рис. 8.14. Способи з'єднання котушкових груп

Приклад 8.1 Проста петльова обмотка статора машини змінного струму

Дано:

$$\left. \begin{array}{l} 2p = 4 \\ q = 2 \\ m = 3 \\ a_\phi = 1 \end{array} \right\}$$

1. Визначаємо число пазів:

$$Z = 2p m q = 4 \times 3 \times 2 = 24.$$

2. Визначаємо полюсний поділ:

$$t = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6.$$

3. Визначаємо крок обмотки:

$$y = 0,83t = 4,98, \quad \text{Приймаємо } y = 5$$

4. Визначаємо кількість катушкових груп у фазі:

$$n_{к.гр.} = 2p = 4.$$

5. Визначаємо зсув початків катушкових груп

$$x_{кат.} = t = 6.$$

6. Визначаємо зсув початків фаз:

$$x_{\phi} = 2/3 \cdot t = 2/3 \cdot 6 = 4.$$

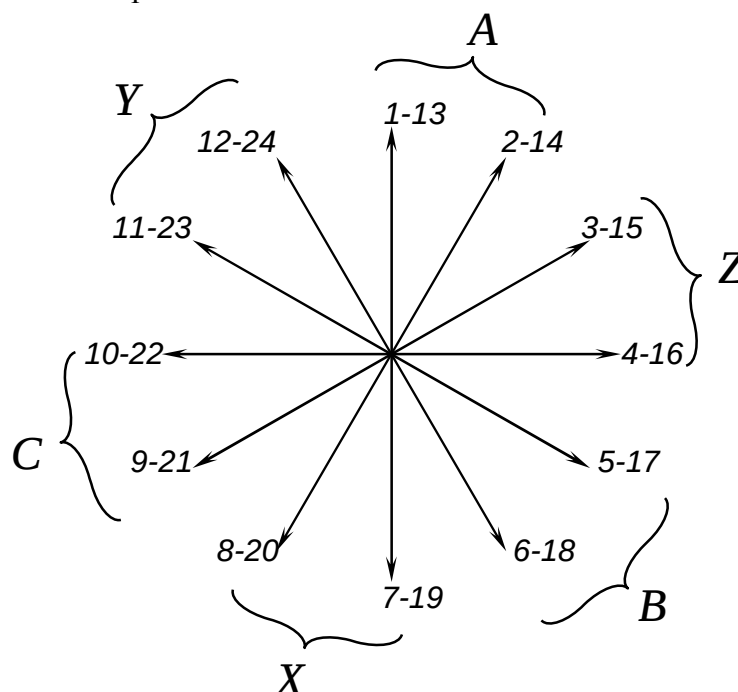
7. Визначаємо дані для зірки пазових ЕРС:

$$\text{кількість променів } n_{\Pi} = \frac{\kappa Z}{p} = \frac{1 \cdot 24}{2} = 12;$$

$$\text{кут між променями } g = \frac{p \cdot 360^{\circ}}{Z} = 30^{\circ}.$$

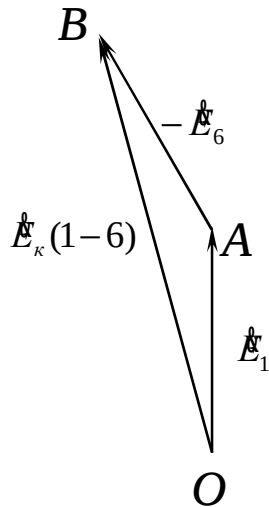
8. Будуємо зірку пазових векторів ЕРС і визначаємо коефіцієнти $K_y, K_p, K_{об}$.

а) зірка пазових векторів ЕРС



б) визначення коефіцієнта укорочення K_y графічним та аналітичним шляхом.

Будуємо вектор ЕРС катушки:

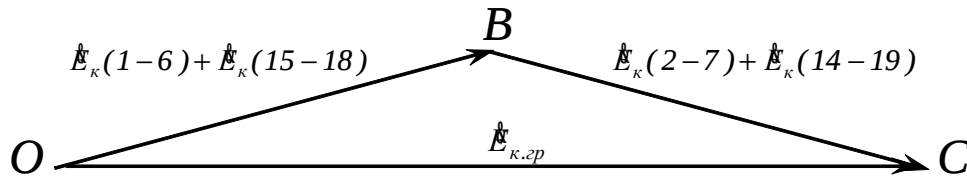


$$K_y = \frac{OB}{2 \cdot OA} \approx 0,97$$

$$K_y = \sin\left(\frac{pb}{2}\right) = 0.967$$

в) визначення коефіцієнта розподілення K_p графічним та аналітичним шляхом:

Будуємо вектор ЕРС котушкової групи:



$$K_p = \frac{OC}{q \cdot OB} \approx 0,97;$$

$$K_p = \frac{\sin\left(\frac{q \cdot a}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{2 \cdot 30^\circ}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,967.$$

г) визначення обмоточного коефіцієнта $K_{об}$:

$$K_{об} = K_y \cdot K_p = 0,967 \cdot 0,967 = 0,935$$

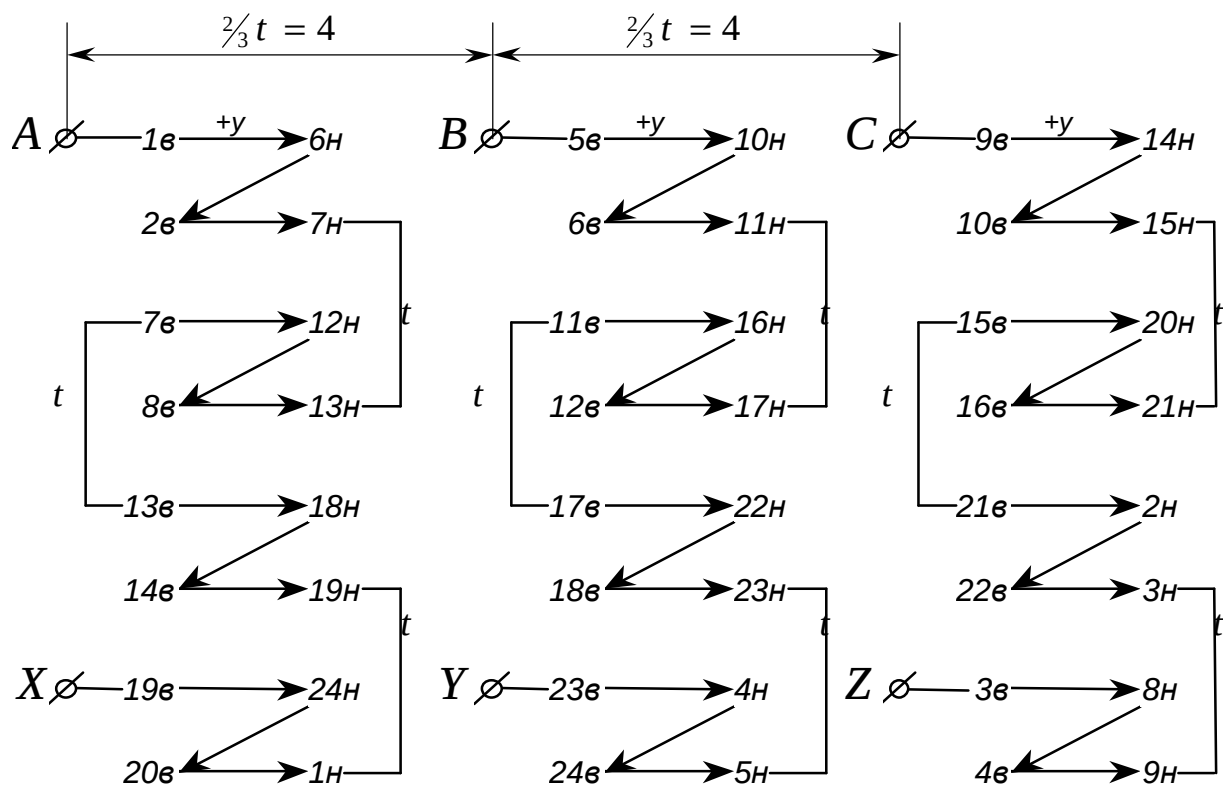
9. Складаємо обмотувальну таблицю.

10. Вичерчуємо розгорнуту схему обмотки (розгорнута схема обмотки подана на рис. 8.13).

11. Указуємо напрямок струму в провідниках фазних обмоток і визначаємо зону дії полюсів.

Хвильові обмотки. На рис. 8.15 показаний елемент схеми хвильової обмотки.

В обмотці розрізняють наступні кроки: y_1 – перший частковий крок – є відстань між сторонами даної секції; y_2 – другий частковий крок – є відстань від сторони даної секції до найближчої сторони послідовно з'єднаної з нею секції; y_p – результуючий крок. У хвильових обмоток (рис. 8.15) результуючий крок



Обмотувальна таблиця для прикладу 8.1.

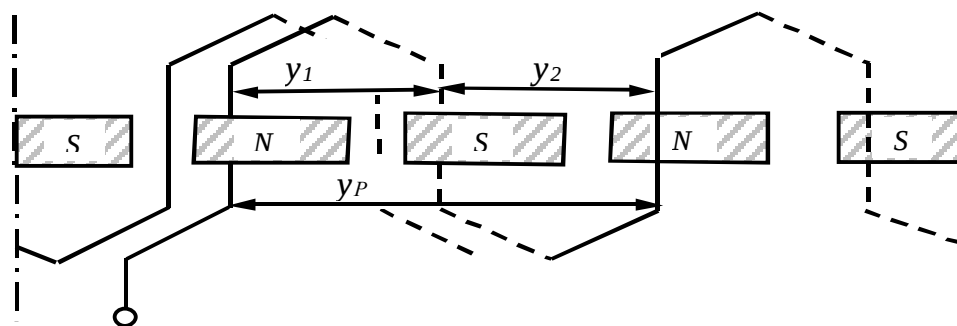


Рис. 8.15. Секції хвильової обмотки

дорівнює сумі часткових кроків:

$$y_p = y_1 + y_2; \quad (8.8)$$

$$y_p = z/p = 2pmq/p = 2mq, \quad (8.9)$$

при $m = 3$ й $y_p = 6q$.

Як правило, в хвильовій обмотці

$$y_1 = y_2 = y_p/2 \quad (8.10)$$

Хвильові обмотки мають наступні особливості:

– при обході послідовно з'єднаних секцій по окружності статора (рото-

ра) приходимо до вихідного пазу. Тому, щоб продовжити обхід послідовно з'єднаних секцій в одному напрямку виконується штучне зсув вперед або назад на 1 паз стосовно вихідного. Тобто у першому випадку робиться подовжений, а у другому випадку укорочений перехід;

– обхід послідовно з'єднаних секцій в одному напрямку включає q поруч розташованих секцій, що утворять катушкову групу. Після того як сформува-лися катушкові групи при обході в одному напрямку робиться довга перемичка і виконується обхід послідовно з'єднаних секцій у протилежному напрямку. Обхід у протилежному напрямку також включає q поруч розташованих секцій, що утворять катушкову групу

На рис. 8.16 дана схема двошарової хвильової обмотки для $2p = 4$, $q = 2$, $Z = 2pmq = 2 \cdot 2 \cdot 3 \cdot 2 = 24$

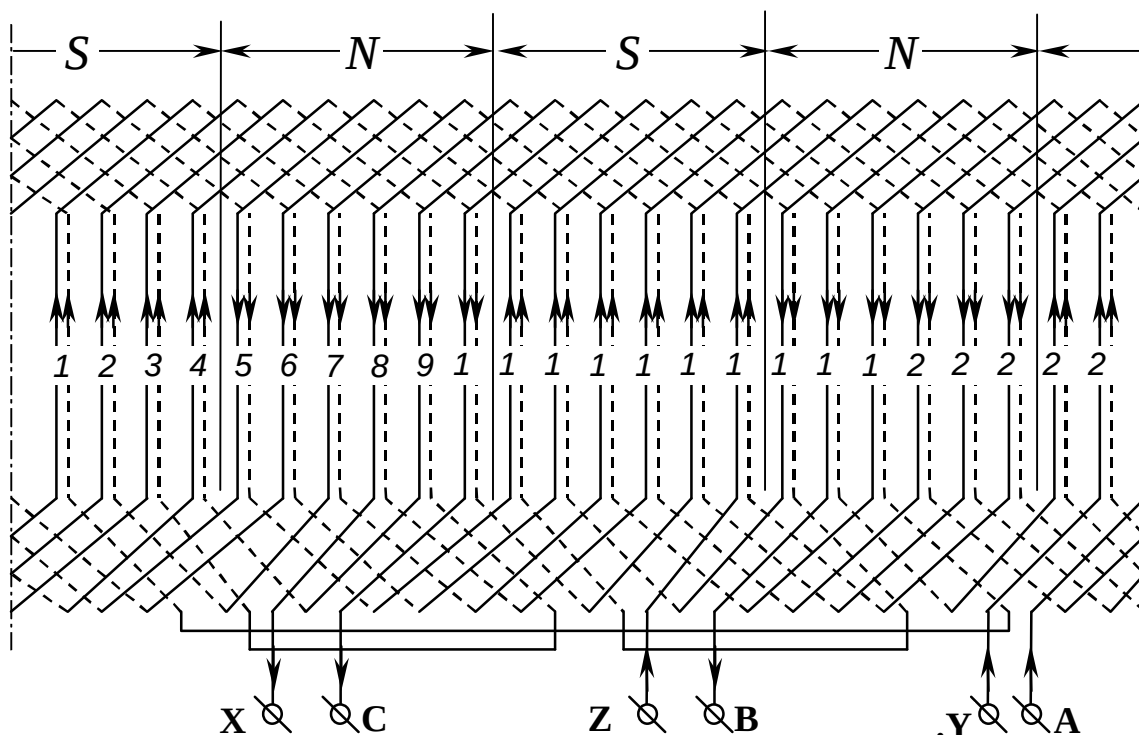


Рис. 8.16. Схема двошарової обмотки ($m = 3$, $2p = 4$, $Z = 24$)

Приклад 8.2 Проста хвильова обмотка ротора машини змінного струму

Дано:

$$\left. \begin{array}{l} 2p = 4 \\ q = 2 \\ m = 3 \\ a_\phi = 1 \end{array} \right\}$$

1. Визначаємо число пазів:

$$Z = 2pmq = 4 \cdot 3 \cdot 2 = 24$$

2. Визначаємо полюсний поділ:

$$t = \frac{Z}{2p} = \frac{24}{4} = 6 .$$

3. Визначаємо (приймаємо) кроки обмотки:

$$y_1 = y_2 = t = 6.$$

4. Визначаємо зсув початків фаз:

$$x_\phi = \frac{2}{3}t + n2t,$$

а) з погляду геометричної симетрії бажано виконати:

$$x_\phi = \frac{Z}{m} = \frac{24}{3} = 8.$$

$$\text{Початок фази } A \text{ в пазу } \# q \quad (2)$$

$$B \text{ в } 2 + 8 = (10)$$

$$C \text{ в } 2 + 8 = (18)$$

б) з погляду електричної симетрії:

I Варіант ($n = 0$)

$$A \text{ в } (2)$$

$$B \text{ в } 2 + \frac{2}{3}t = 2 + \frac{2}{3}6 = (6)$$

$$C \text{ в } 2 + \frac{4}{3}t = 2 + \frac{4}{3}6 = (10)$$

II Варіант ($n = 1$)

$$A \text{ в } (2)$$

$$B \text{ в } 2 + \frac{2}{3}t + 2t = 2 + \frac{2}{3}6 + 2 \cdot 6 = (18)$$

$$C \text{ в } 2 + \frac{4}{3}t + 2t = 2 + \frac{4}{3}6 + 2 \cdot 6 = (22)$$

Примітка:

При деякім співвідношенні полюсів забезпечити точно геометричну симетрію неможливо.

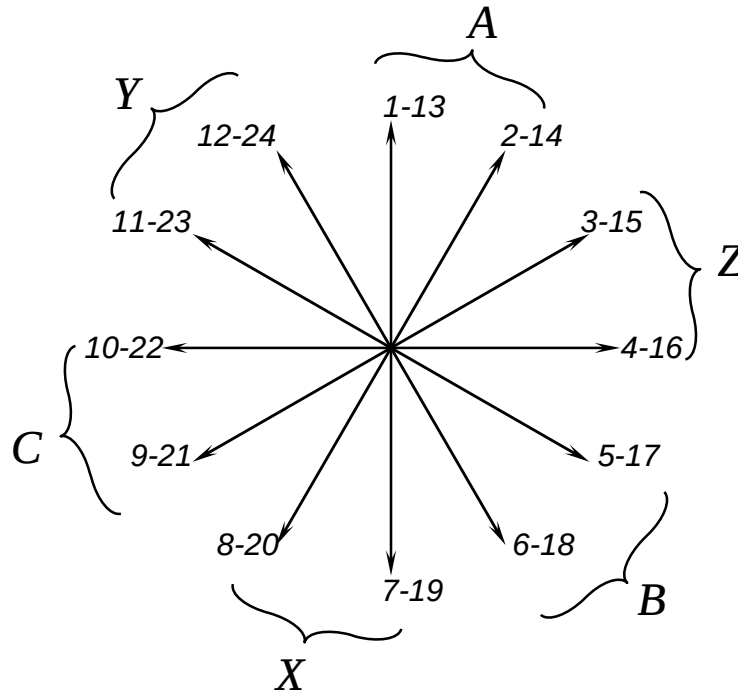
5. Визначаємо дані для зірки пазових ЕРС:

$$\text{число променів } n_n = \frac{\kappa Z}{p} = \frac{1 \cdot 24}{2} = 12,$$

$$\text{кут між променями } g = \frac{p \cdot 360^\circ}{Z} = \frac{2 \cdot 360^\circ}{24} = 30^\circ.$$

6. Будуємо зірку пазових ЕРС і визначаємо коефіцієнти $K_y, K_p, K_{об}$.

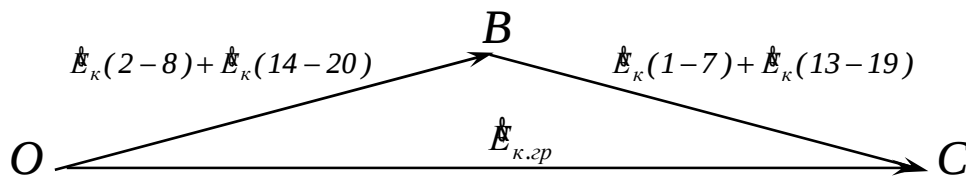
а) зірка пазових векторів ЕРС



б) коефіцієнт укорочення $K_y = 1$ (крок обмотки діаметральний).

в) визначення коефіцієнта розподілення K_p графічним та аналітичним шляхом:

Будуємо вектор ЕРС котушкової групи:



$$K_p = \frac{OC}{q \cdot OB} \approx 0,97;$$

$$K_p = \frac{\sin\left(\frac{q \cdot a}{2}\right)}{q \cdot \sin\left(\frac{a}{2}\right)} = \frac{\sin\left(\frac{2 \cdot 30^\circ}{2}\right)}{2 \cdot \sin\left(\frac{30^\circ}{2}\right)} = 0,967.$$

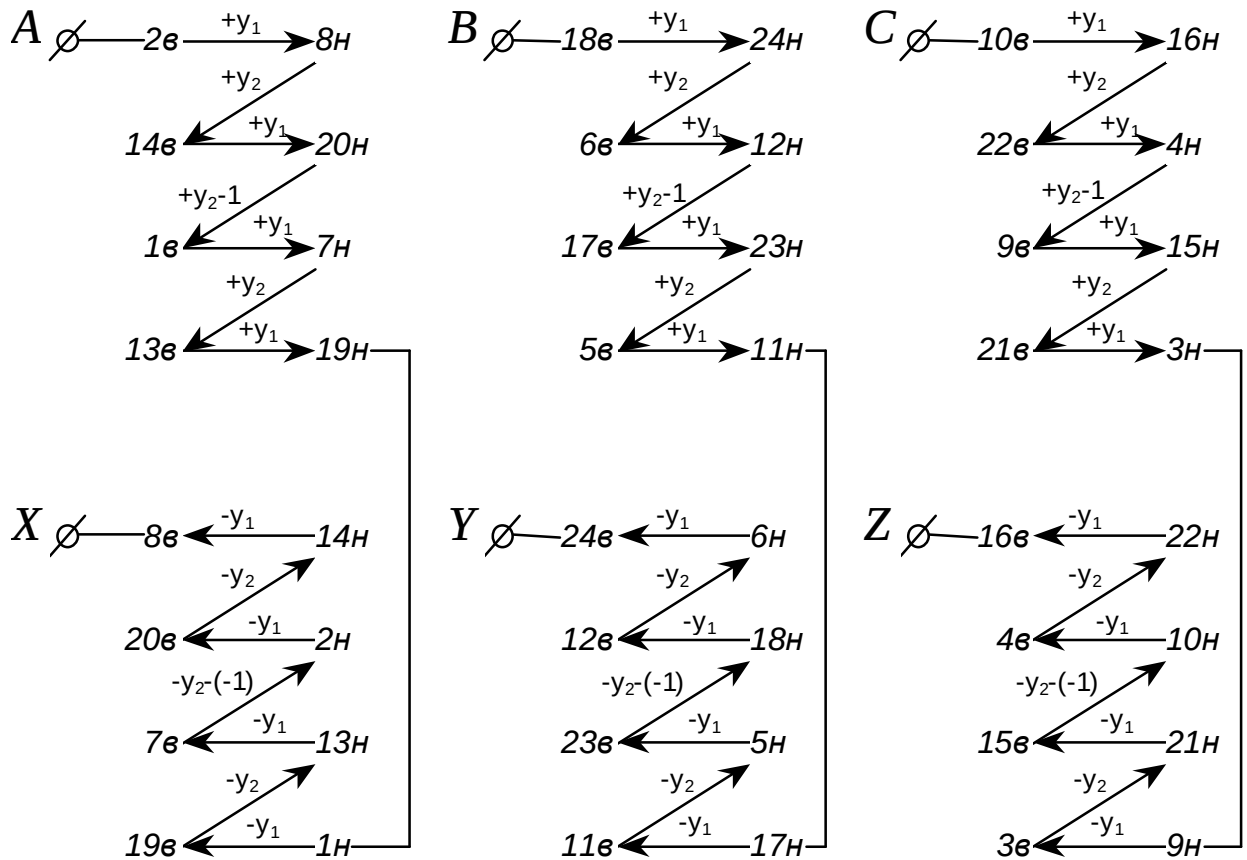
г) визначення обмоточного коефіцієнта $K_{об}$:

$$K_{об} = K_y \cdot K_p = 1 \cdot 0,967 = 0,967$$

7. Складаємо обмотувальну таблицю.

8. Вичерчуємо розгорнуту схему обмотки (розгорнута схема обмотки надана на рис. 8.13).

9. Указуємо напрямок струму в провідниках фазних обмоток і визначаємо зону дії полюсів.



Обмотувальна таблиця для прикладу 8.2.

8.3 Електрорушійні сили, що індукуються в обмотках змінного струму

Обертове магнітне поле перетинає обмотки статора і ротора, індукуючи в них змінну ЕРС. Виведемо формулу, що визначає зв'язок ЕРС із параметрами обертового магнітного поля.

а) електрорушійна сила зосередженої обмотки

Зобразимо розгортку статора (рис. 8.17), на якій покажемо зосереджену обмотку (котушку) однієї фази АХ і розподіл результуючої індукції $B_{рез}$ уздовж окружності статора для моменту, коли струм в даній фазі має максимум (приймаємо, що результуючий потік, створюваний усіма фазними обмотками, має синусоїдальну форму). У цьому випадку максимум кривої результуючої індукції збігається з віссю фази АХ.

У вихідному положенні з обмоткою фази АХ зчеплений потік $\Phi_{рез.} = \Phi_m$. Через напівперіод хвиля результуючої

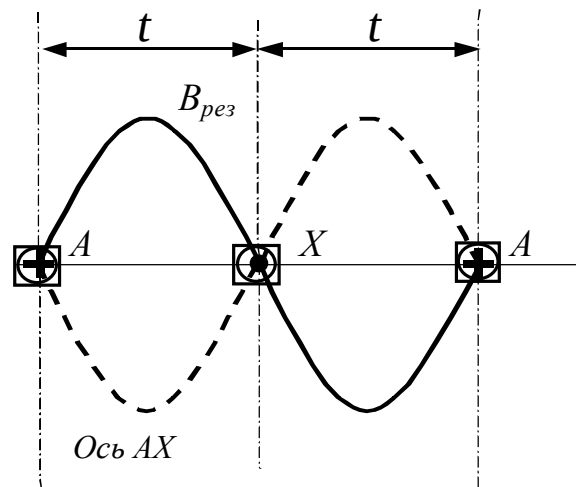


Рис.8.17. До визначення ЕРС обмотки

індукції зміститься на один полюсний поділок (штрихова лінія) і з обмоткою зчіплюється потік – Φ_m .

Середнє значення ЕРС за півперіод

$$E_{cp.} = W_{\phi} \frac{d\Phi}{Dt} = W_{\phi} \frac{\Phi_m - (-\Phi_m)}{T/2} = 4W_{\phi} \frac{\Phi_m}{T} = 4W_{\phi} f\Phi_m, \quad (8.11)$$

де W_{ϕ} – число послідовно з'єднаних витків у фазі.

Діюче значення ЕРС

$$E_1 = \kappa_{\phi} \times E_{cp.} = 4,44W_{\phi} \times f \times \Phi_m, \quad (8.12)$$

де $\kappa_{\phi} = p/(2\sqrt{2}) = 1,11$ – коефіцієнт форми кривої для синусоїди.

б) електрорушійна сила зосередженої обмотки при укороченні кроку

Як уже відзначалося, форма кривої ЕРС e_k залежить винятково від графіка розподілу індукції B_d в повітряному зазорі. Однак навіть при нерівномірному зазорі графік індукції залишається несинусоїдальним. Тому ЕРС котушки e_k також несинусоїдальна і з першою (основною) синусоїдальною гармонікою ЕРС містить ряд вищих синусоїдальних гармонік (рис. 8.18).

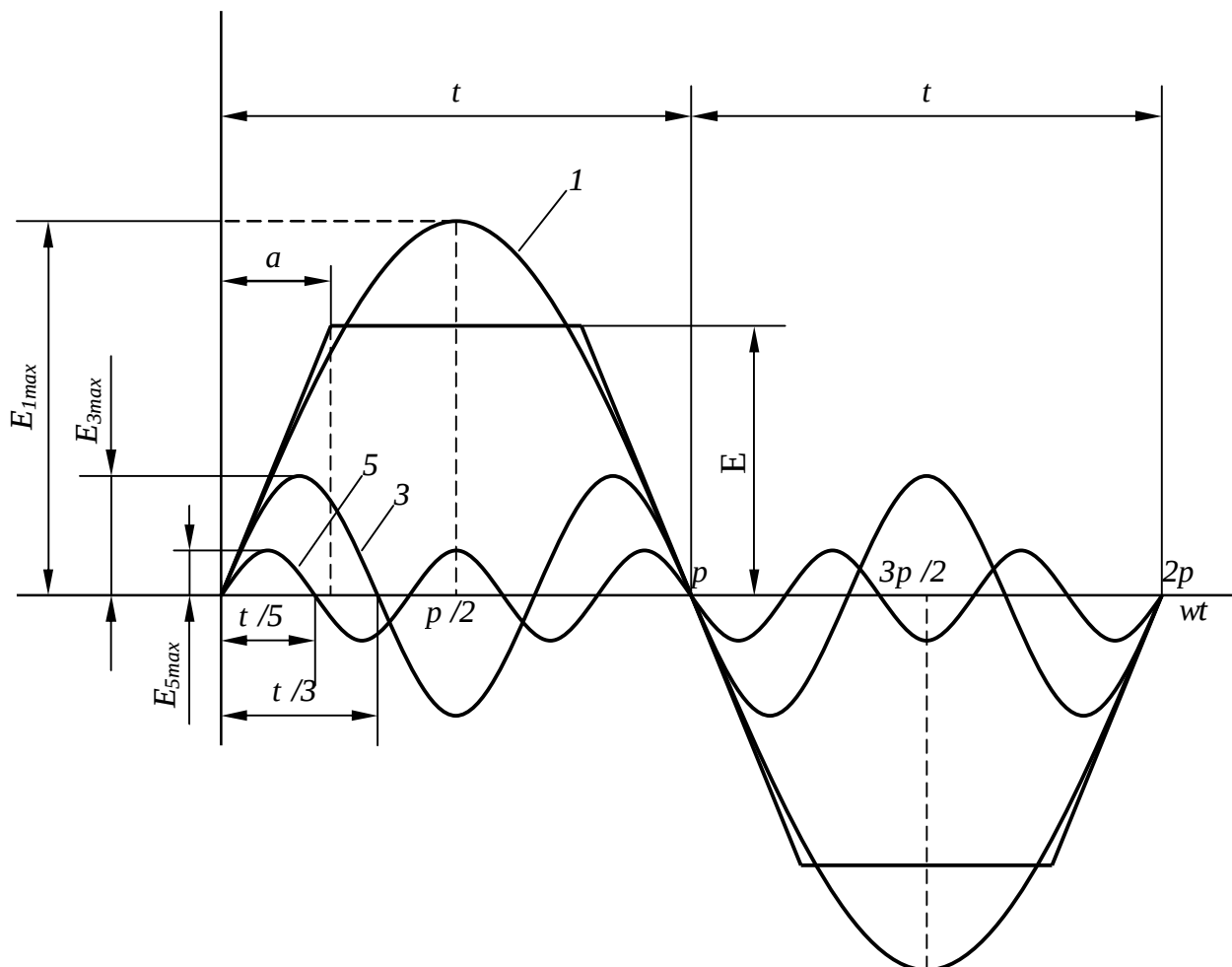


Рис. 8.18. Розкладання трапецієподібної кривої ЕРС у гармонійний ряд

У зв'язку з тим, що крива ЕРС симетрична щодо осі абсцис, вона містить лише непарні гармоніки (1, 3, 5 і т.д.). З деяким наближенням, прийнявши форму кривої ЕРС e трапецоїдною (рис. 8.18), можна записати наступний вираз гармонійного ряду:

$$e = \frac{4E}{\pi a} (\sin a \sin w_1 t + \frac{1}{3^2} \sin 3a \sin 3w_1 t + \frac{1}{5^2} \sin 5a \sin 5w_1 t + \dots + \frac{1}{v^2} \sin va \sin vw_1 t), \quad (8.13)$$

де v – номер гармоніки; w_1 – кутова частота основної гармоніки.

З (8.13) бачимо, що з ростом номера гармоніки її амплітуда зменшується пропорційно величині $\sin va/v^2$, а частота $f_v = f_{1v}$, тобто росте пропорційно номеру гармоніки. Тому практичний вплив на форму кривої ЕРС роблять гармоніки не вище сьомої. Таким чином, задача одержання в обмотці статора синусоїдальної ЕРС зводиться до усунення або значного ослаблення вищих синусоїдальних гармонік, в першу чергу третьої, п'ятої і сьомої.

Відомо, що струми і ЕРС третьої гармоніки у всіх фазах трифазної обмотки збігаються в часі (по фазі). Тому в лінійній ЕРС (напрузі) при схемах з'єднання обмоток зіркою або трикутником третя гармоніка відсутня. Усе, що стосується третьої гармоніки, поширюється і на вищі гармоніки ЕРС, номери яких кратні трьом (9, 15 і т.д.).

Розглянемо питання про можливість усунення або значного ослаблення гармонік вище третьої, головним чином п'ятої або сьомої. Допустимо, що крива розподілу магнітної індукції B_d в повітряному зазорі несинусоїдальна і поряд з першою гармонікою B_1 містить п'яту B_5 (рис. 8.19, а).

Якщо при цьому обмотка виконана з діаметральним кроком ($y_1 = t$), то ЕРС першої і п'ятої гармонік (e_1 і e_5) в обох сторонах котушки (витка) (рис. 8.19, б) складаються арифметично. У цьому випадку результуюча ЕРС котушки $e_{к.д.}$, а отже, і ЕРС всієї обмотки поряд з першою містять і п'яту гармоніку.

Якщо ж крок котушки скоротити на $1/5$ полюсного поділку, тобто прийняти його рівним

$$y_1 = (4/5)t = 0,8t ,$$

то ЕРС п'ятої гармоніки e_5 , хоча і наводяться в пазових сторонах котушки, будуть знаходитися в протифазі відносно один одного. У підсумку сума цих ЕРС в котушці буде дорівнювати нулю (рис. 8.19, в) і ЕРС котушки буде містити лише першу (основну) ЕРС e_1 , тобто вона стане практично синусоїдальною.

Аналогічно, для усунення ЕРС сьомої гармоніки потрібно укорочення кроку котушки на $1/7$ полюсного поділку τ , тобто приймаємо крок котушки рівним

$$y_1 = (6/7)t = 0,857t .$$

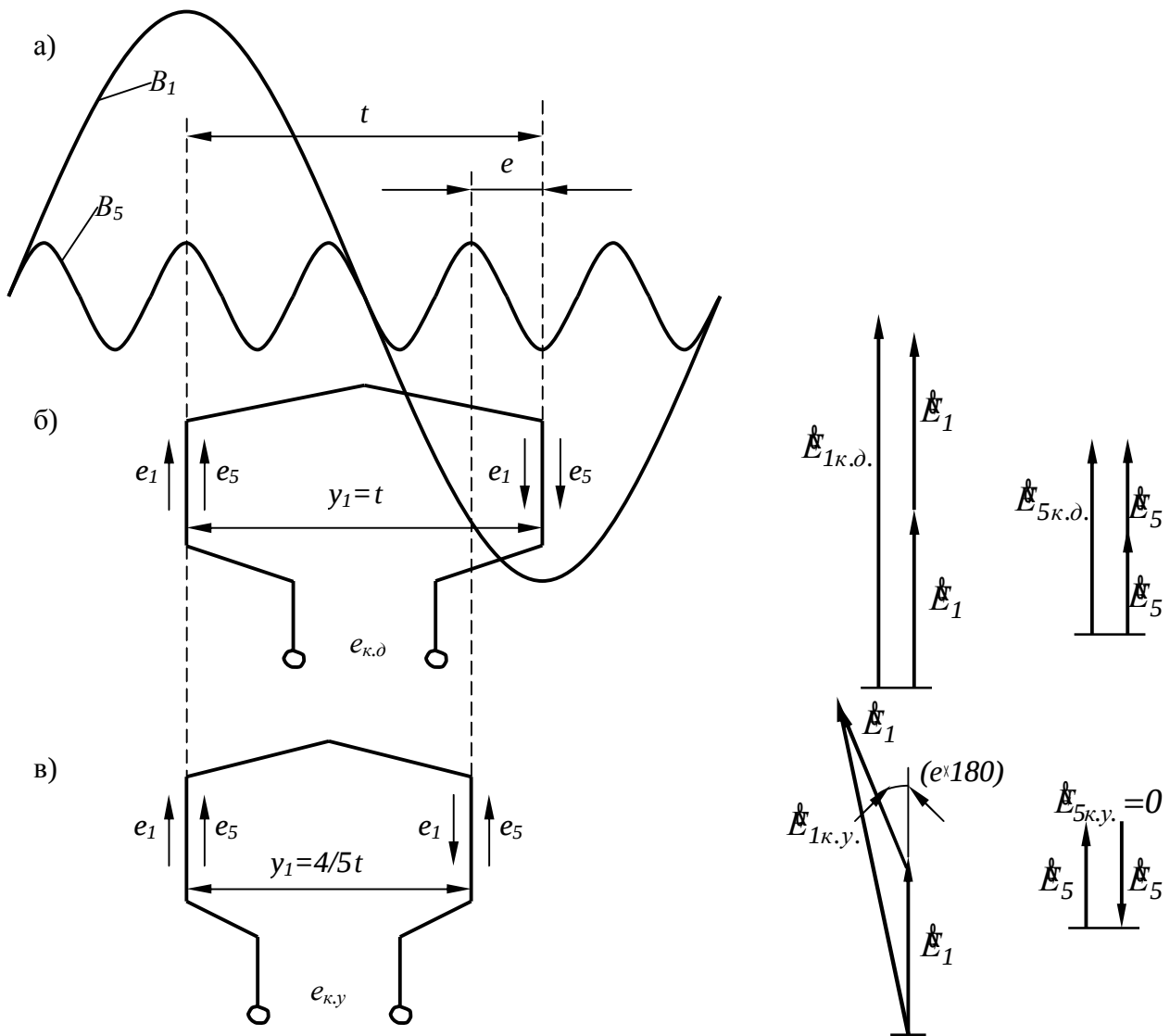


Рис. 8.19. Укорочення кроку обмотки на $1/5t$

Відношення кроку y_1 до полюсного поділку називають **відносним кроком** обмотки ($b=y_1/t$.) Як правило, відносний крок приймають $b = 0,80 \div 0,89$, що забезпечує значне ослаблення ЕРС вищих гармонік.

З побудов, приведених на рис.8.19, видно, що зменшення кроку котушки на величину **відносного укорочення** $e = 1 - b$ викликає ослаблення не тільки ЕРС вищих гармонік, але і ЕРС першої (основної) гармоніки. Пояснюється це тим, що при діаметральному кроці ($y_1 = t$) ЕРС першої гармоніки $E_{1к.д.}$ (рис. 8.19,б) дорівнює арифметичній сумі ЕРС, що наводяться в пазових сторонах котушки ($E_{1к.д.} = 2E_1$), а при укороченні кроку на величину e (рис.8.19, в) ЕРС в пазових сторонах котушки виявляються зсунутими по фазі відносно один одного на кут $e \cdot 180^\circ$ і ЕРС котушки $E_{1к.у}$ визначається геометричною сумою:

$$E_{1к.у} = E_1 + E_1 \cos(e \cdot 180^\circ) < E_{1к.д.}$$

Зменшення ЕРС котушки при укороченні її кроку на величину $\epsilon = 1 - \beta$ враховується **коефіцієнтом укорочення кроку** $k_y = E_{к.у}/E_{к.д.}$. Для першої гармоні-

$$k_{y1} = \sin(b \cdot 90^\circ)$$

Для ЕРС будь-якої гармоніки

$$k_{yv} = \sin(vb \cdot 90^\circ)$$

Таким чином, діюче значення ЕРС зосередженої обмотки з укороченим кроком дорівнює

$$E_1 = 4,44 W_\phi f \Phi k_y .$$

Нижче приведені значення коефіцієнтів укорочення k_{yv} у залежності від відносного кроку b обмотки для різних гармонік ЕРС:

Відносний крок	4/5	6/7	1
Коефіцієнт укорочення k_{yv} :			
1-я гармоніка.....	0,951	0,975	1,000
5-я гармоніка.....	0,000	0,433	1,000
7-я гармоніка.....	0,573	0,000	1,000

На закінчення необхідно відзначити, що укорочення кроку обмотки по пазах можливо лише в двошарових обмотках. Одношарові обмотки виконуються з діаметральним кроком, тому ЕРС, що наводяться в них, містять значною мірою вищі гармоніки 5-го і 7-го порядку. Це обмежує застосування одношарових обмоток в асинхронних двигунах потужністю більш 15–22 кВт.

б) електрорушійна сила котушкової групи

Обмотки статора розділяються на зосереджені і розподілені. При **зосередженій** обмотці всі котушки однієї фази, що приходяться на полюс і утворюють **котушкову групу**, укладаються в двох пазах, тобто зосереджуються разом і утворюють одну велику котушку. З ряду причин зосереджені обмотки не одержали поширення. Одна з причин – необхідність вирубки в пластинах статора пазів великої площі, необхідної для розміщення значного числа пазових сторін. Це веде до необхідності збільшення зовнішнього діаметра статора, а отже, до збільшення розмірів машини.

У **розподілених** обмотках усі котушки рівномірно розташовані по периметру розточки статора. При цьому котушки кожної фази, що приходяться на полюс, тобто котушки кожної котушкової групи, займають більше двох пазів, наприклад чотири, шість і т.д.

Дуже важливим параметром обмотки статора є **число пазів, що приходяться на полюс і фазу**:

$$q_1 = Z_1 / (2pm_1) ,$$

де m_1 – число фаз в обмотці (для трифазної обмотки $m_1 = 3$).

В зосередженій обмотці, де на пару полюсів приходится два пази кожної фази, а всього пазів $Z_1 = 2pm$, число пазів на полюс і фазу $q_1 = 1$. В розподіленій обмотці $q_1 > 1$. В розподіленій двошаровій обмотці статора число катушкових груп в кожній фазі дорівнює числу полюсів $2p$, а загальне число катушкових груп трифазної обмотки $A = 2pm_1$. При цьому число катушок в катушковій групі дорівнює q_1 . Однак зосереджені і розподілені обмотки різняться не тільки конструкцією. Має місце також різниця й у величині і формі графіків ЕРС, наведених в зосередженій і розподіленій обмотках. Для роз'яснення звернемося до рис.8.20, де показані дві одновиткові катушки фазної обмотки, зосереджені в двох пазях (а), і такі ж дві катушки, що утворюють катушкову групу і розподілені в чотирьох пазях (б).

У випадку зосередженої обмотки (рис.8.20, а) ЕРС, наведені в двох катушках, збігаються по фазі; у цьому випадку ЕРС катушкової групи $E_{2,3}$ дорівнює арифметичній сумі ЕРС катушок:

$$E_{2,3} = E_{\kappa 1} + E_{\kappa 2}$$

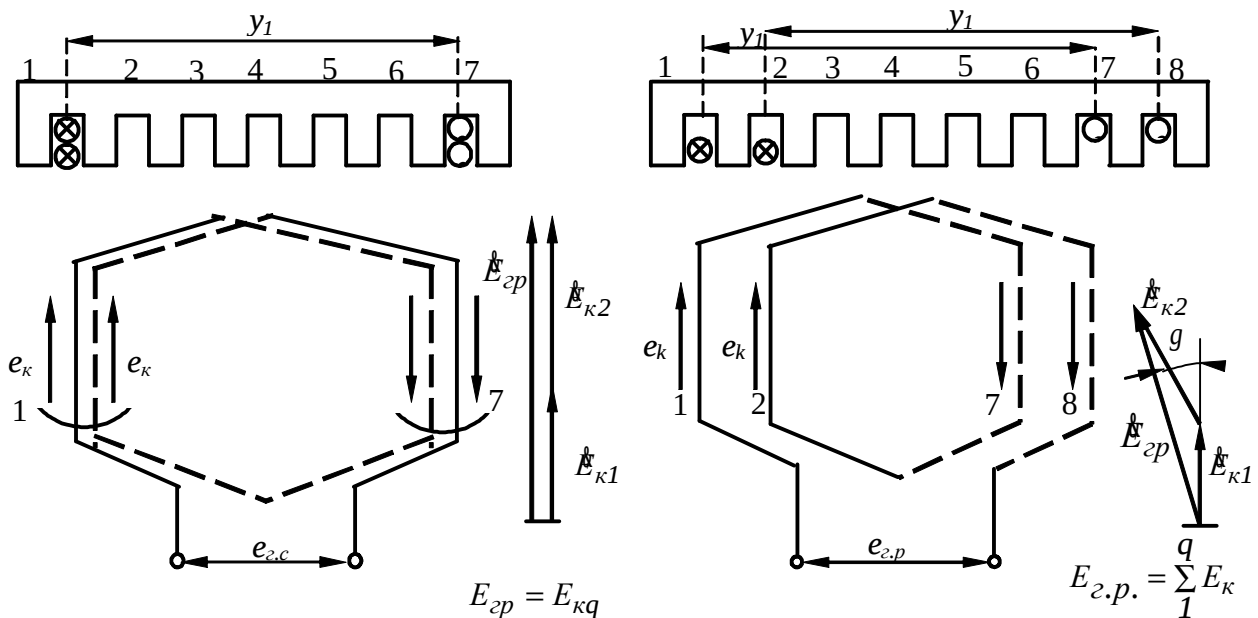


Рис. 8.20. До поняття про коефіцієнт розподілу

У випадку розподіленої обмотки обидві катушки зсунуті в просторі відносно один одного на пазовий кут g . Тому ЕРС, що наводяться в катушках катушкової групи, виявляються зсунутими по фазі відносно один одного на кут γ (рис.8.20, б). Виходячи з цього ЕРС катушкової групи розподіленої обмотки $E_{2,p}$ дорівнює **геометричній** сумі ЕРС катушок, число яких дорівнює q_1 :

$$E_{2,p} = \sum_{k=1}^{q_1} E_{\kappa k} .$$

Як видно з приведених на рис. 8.20 векторних діаграм, ЕРС котушкової групи зосередженої обмотки $E_{z,3}$ більше, ніж ЕРС при розподіленій обмотці $E_{z,p}$. Зменшення ЕРС котушкової групи при переході від зосередженої обмотки до розподіленої поширюється на ЕРС не тільки першої, але і вищих гармонік. Для кількісної оцінки цього зменшення ЕРС користуються **коефіцієнтом розподілу обмотки**, що представляє собою відношення ЕРС:

$$k_p = (E_{z,p} / E_{z,3}) < 1 .$$

Результуюча ЕРС розподіленої обмотки

$$E_1 = 4,44 W_\phi f k_{p1} \Phi_m , \quad (8.14)$$

де k_{p1} – коефіцієнт розподілу обмотки для першої гармоніки

$$k_{p1} = \frac{\sin(0,5 q_1 g)}{q_1 \sin(0,5 g)} ,$$

де g – кут зсуву по фазі між векторами пазових ЕРС, тобто ЕРС, що наводяться в провідниках, що лежать у сусідніх пазах статора, ел. град

$$g = 360 p / Z_1 .$$

Так як кут зсуву по фазі між векторами пазових ЕРС для v -ї гармоніки в v раз більше пазового кута γ , то коефіцієнт розподілу обмотки для будь-якої гармоніки ЕРС дорівнює

$$k_{pv} = \frac{\sin(0,5 v q_1 g)}{q_1 \sin(0,5 v q_1 g)}$$

Нижче приведені значення коефіцієнта розподілу для першої, третьої, п'ятої і сьомої гармонік ЕРС:

Число пазів на полюс і фазу q_1	1	2	3	4	5	6	7
1-я гармоніка	0,000	0,966	0,960	0,958	0,957	0,956	0,955
3-я	1,000	0,707	0,667	0,654	0,646	0,644	0,636
5-я	1,000	0,259	0,217	0,204	0,200	0,197	0,191
7-я	-1,000	-0,259	-0,178	-0,157	-0,149	-0,145	-0,136

З приведених даних видно, що збільшення q_1 викликає порівняно невелике зменшення коефіцієнта розподілу для основної гармоніки і значне зменшен-

ня його для вищих гармонік.

г) електрорушійна сила розподіленої обмотки при укороченні кроку

Діюче значення ЕРС розподіленої обмотки при укороченні кроку

$$E_1 = 4,44 W_{\phi} f k_{p1} k_{y1} \Phi_m,$$

або

$$E_1 = 4,44 W_{\phi} f k_{об1} \Phi_m, \quad (8.15)$$

де $k_{об1} = k_{p1} k_{y1}$ - обмотковий коефіцієнт для основної гармоніки.

Для v -ї гармоніки

$$k_{об.v} = k_{pv} k_{yv}. \quad (8.16)$$

Цей коефіцієнт показує, наскільки зменшується ЕРС обмотки змінного струму внаслідок її розподілу по декількох пазах і укороченні кроку в порівнянні з зосередженою обмоткою.

8.4 Магніторушійна сила трифазної обмотки статора

В трифазній обмотці змінного струму фази зсунуті на 120 електричних градусів. Якщо до такої обмотки прикладена симетрична синусоїдальна напруга, то, при ідентичності фаз, по фазах обмотки протікають симетричні синусоїдальні струми, миттєві значення яких виражаються у такий спосіб

$$\left. \begin{aligned} i_A &= I_m \sin \omega t; \\ i_B &= I_m \sin \left(\omega t - \frac{2}{3} p \right); \\ i_C &= I_m \sin \left(\omega t - \frac{4}{3} p \right). \end{aligned} \right\} \quad (8.17)$$

Ця симетрична синусоїдальна система струмів володіє тією властивістю, що в будь-який момент часу сума струмів усіх фаз дорівнює нулю. Кожна фаза обмотки при протіканні в ній струму створює пульсуючу МРС.

Приймаючи в облік тільки першу гармоніку МРС, розташовуємо початок координат по осі фази $A-X$.

Тоді для кожної з фаз трифазної обмотки, якщо вона обтікається синусоїдальним струмом, МРС можна записати наступними залежностями

$$\left. \begin{aligned} F_A &= F_{\phi.m} \cos \omega t; \\ F_B &= F_{\phi.m} \cos(\omega t - 2/3p); \\ F_C &= F_{\phi.m} \cos(\omega t - 4/3p). \end{aligned} \right\} \quad (8.18)$$

Реально в машині діє одна МРС трифазної обмотки. Для її визначення складемо МРС окремих фаз. Після перетворення одержимо наступний вираз першої гармонійної МРС трифазної обмотки

$$F_1 = F_{\phi A} + F_{\phi B} + F_{\phi C} = \frac{3}{2} F_{\phi m} \sin(\omega t - a). \quad (8.19)$$

Це вираз бігущої хвилі МРС. В електричній машині це обертова в просторі хвиля. При числі полюсів $2p$ кутова частота обертання цієї хвилі

$$\omega_1 = \frac{2pf}{p} \quad [rad/c] \quad (8.20)$$

де f – частота струму, що протікає по фазах.

Принцип утворення обертової МРС розглянемо на найпростішій трифазній двополосній обмотці, кожна фаза якої складається з однієї котушки ($q_1 = 1$). Фазні обмотки з'єднані зіркою і включені в мережу трифазного струму. Проведемо ряд побудов вектора МРС трифазної обмотки, що відповідають різним моментам часу, відзначеним на графіку рис. 8.21, *а* цифрами 0, 1, 2, 3. В момент часу 0 струм в фазі *A* дорівнює нулю, в фазі *B* має негативний напрямок, а в фазі *C* – позитивне. Ці напрямки струму відзначаємо на рис. 8.21, *б*. Потім відповідно до зазначеного в пазових сторонах обмотки напрямками струмів визначаємо напрямок вектора МРС F_1 трифазної обмотки статора (вектор спрямований вертикально вниз). В момент часу 1 струм в обмотці фази *B* дорівнює нулю, в обмотці фази *A* має позитивний напрямок, а в обмотці фази *C* – негативний напрямок. Зробивши побудови, аналогічні моменту часу 0, бачимо, що вектор МРС F_1 повернувся щодо свого положення в момент часу 0 на 120° по годинній стрілці. Провівши такої ж побудови для моментів часу 2 і 3, бачимо, що вектор F_1 щораз повертається на 120° і за один період змінного струму робить повний оборот (360°).

Якщо частота струму в обмотці статора $f_1 = 50$ Гц, то вектор МРС обертається з частотою 50 об/с. У загальному випадку частота обертання вектора МРС n_1 – синхронна частота обертання – прямо пропорційна частоті струму f_1 і зворотно пропорційна числу пар полюсів p обмотки статора:

$$n_1 = f_1 60/p.$$

Значення синхронних частот обертання для промислової частоти змінного струму $f_1 = 50$ Гц приведені нижче:

Число пар полюсів p	1	2	3	4	5	6
Синхронна частота обертання n_1 , про/хв.	3000	1500	1000	750	600	500

Обертова МРС створює в розточці статора обертове магнітне поле. При необхідності змінити напрямок обертання МРС потрібно змінити порядок проходження струмів в обмотці.

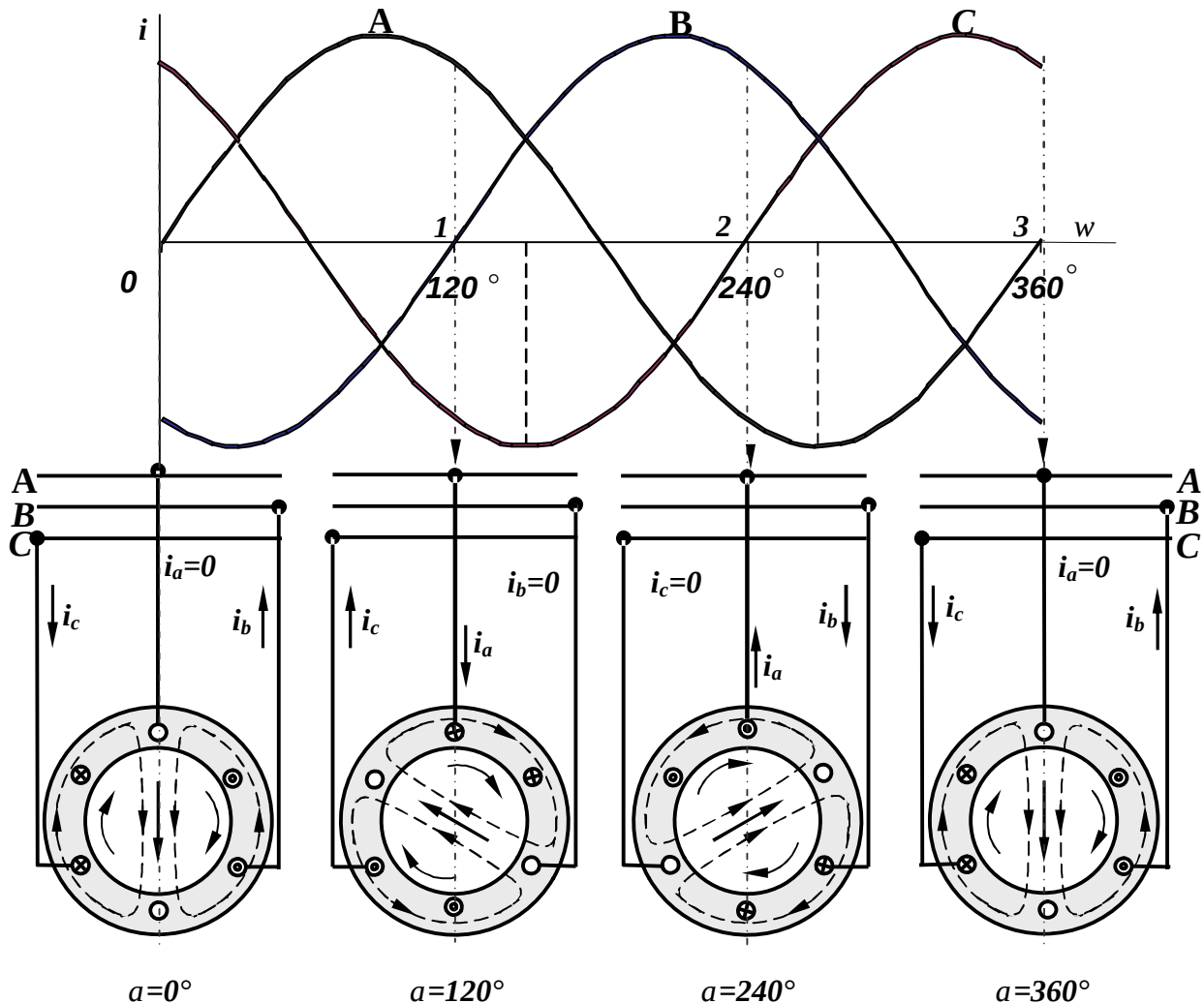


Рис. 8.21. Принцип одержання обертової МРС

8.5 Принцип дії і режими роботи асинхронної машини

Принцип дії асинхронної машини заснований на електромагнітній взаємодії між магнітним полем, утвореним обмоткою статора, і струмом обмотки ротора. У такий спосіб за принципом дії асинхронна машина подібна трансформатору. Обмотка статора відіграє роль первинної обмотки, обмотка ротора – вторинної обмотки. Однак асинхронна машина являє собою трансформатор узагальненого типу, тобто такий трансформатор, у якого відбувається перетворення не тільки напруги і струму, але також частоти і роду енергії. Електромагнітна взаємодія між статором і ротором можлива тільки у тому випадку, коли частота обертання ротора n відрізняється від частоти обертання магнітного по-

ля n_1 . У тому випадку, коли $n = n_1$ (ротор обертається із синхронною частотою) обмотка ротора нерухома щодо магнітного поля статора. Отже вона не перетинається магнітними силовими лініями поля статора, ЕРС в обмотці ротора не індукується і струм у ній не протікає.

Відносну різницю частот обертання магнітного поля і ротора називають ковзанням.

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} (\text{дол.од.}),$$

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \cdot 100[\%]$$
(8.21)

Асинхронна машина може працювати в трьох режимах:

- 1) режим двигуна;
- 2) генераторний режим;
- 3) режим електромагнітного гальма.

Кожний з цих режимів характеризується своїм співвідношенням частот обертання n_1 і n , а, отже, своїм характером електромагнітної взаємодії між статором і ротором.

Розглянемо ці режими з погляду характеру електромагнітної взаємодії між статором і ротором і можливими межами зміни ковзання.

Режим двигуна. У цьому режимі до обмотки статора підводиться змінна трифазна напруга. При цьому вона обтікається струмом і створює обертове магнітне поле, що переміщується з частотою n_1 . Ротор обертається в тім же напрямку з частотою $n < n_1$.

Щоб установити характер електромагнітної взаємодії між статором і ротором, розглянемо провідник обмотки ротора і магнітне поле навколо цього провідника (рис.8.22, а).

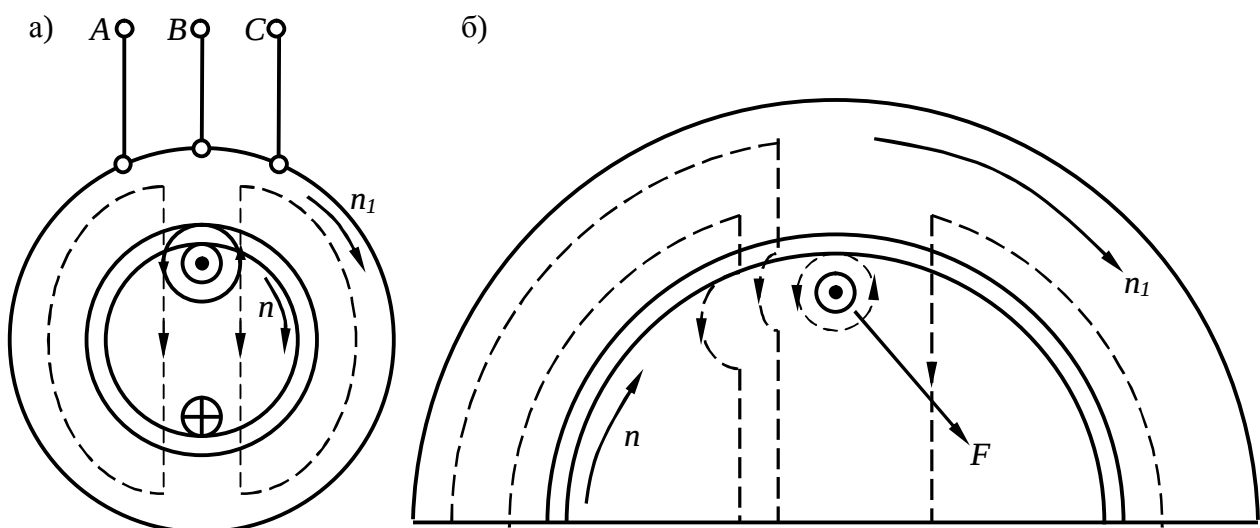


Рис. 8.22. До визначення електромагнітної взаємодії між статором і ротором асинхронного двигуна

Напрямок ЕРС і струму в провіднику обмотки ротора визначимо за правилом правої руки. Зобразимо магнітну силову лінію навколо провідника обмотки ротора зі струмом.

З рис. 8.22, а випливає, що ліворуч від провідника магнітні силові лінії поля статора і поля, утвореного провідником ротора збігаються по напрямку. Праворуч вони протилежні по напрямку. Отже результуюче магнітне поле в зоні розташування провідника можна представити у такий спосіб (рис. 8.22, б).

По картині результуючого магнітного поля визначаємо напрямок сили F , що діє на провідник зі струмом обмотки ротора. Сила F , що діє на провідник обмотки ротора, спрямована в тім же напрямку, що і рух ротора. Отже, ця сила створює на валу асинхронного двигуна електромагнітний момент, що є обертальним моментом. В сталому режимі роботи двигуна цей обертальний момент врівноважується гальмовим моментом, що створюється робочим механізмом.

В режимі двигуна частота обертання ротора може змінюватися від

$$n = 0, \text{ до } S = (n_1 - 0)/n_1 = 1 \text{ до } n = n_1 \text{ до } S = 0.$$

Таким чином, в цьому режимі

$$0 \leq S \leq 1$$

Генераторний режим. В цьому режимі ротор за допомогою приводного двигуна розганяють до частоти $n > n_1$.

При цьому асинхронна машина, споживаючи реактивну потужність з мережі для створення магнітного потоку збудження, здатна віддавати активну енергію в мережу (асинхронна машина з фазним ротором).

Для того, щоб визначити характер електромагнітної взаємодії між статором і ротором в цьому режимі, аналогічно розглянемо провідник обмотки ротора і магнітне поле навколо цього провідника (рис. 8.23, а)

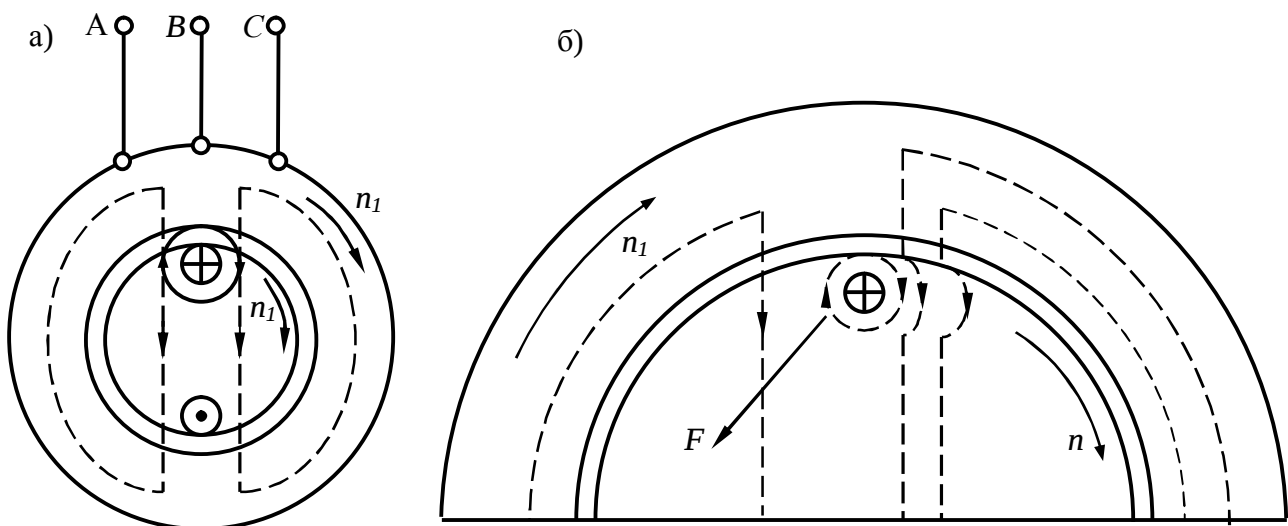


Рис. 8.23. До визначення електромагнітної взаємодії між статором і ротором асинхронного генератора

З рис. 8.23, б випливає, що напрямок сили F протилежний руху ротора. Отже, вона створює на валу асинхронного генератора електромагнітний момент, що є гальмовим моментом. В сталому режимі роботи генератора гальмовий момент врівноважується обертальним моментом, створюваним приводним двигуном.

В генераторному режимі частота обертання ротора змінюється від

$$n = n_1 \text{ до } S = 0 \text{ до } n = +\infty \text{ (теоретично)}$$

$$S = (n_1 - \infty) / n_1 = -\infty \text{ (теоретично)}$$

У такий спосіб в генераторному режимі роботи

$$-\infty_{\text{теор.}} < S \leq 0$$

Режим електромагнітного гальма. Нехай спочатку асинхронна машина працювала двигуном. Якщо навантаження двигуна збільшувалося, то відповідно частота обертання зменшувалася. При деякому значенні навантаження частота обертання асинхронного двигуна може стати рівною нулю, тобто його ротор буде нерухомий. Якщо навантаження активне, тобто має характер вантажу, що опускається, то при подальшому збільшенні такого навантаження ротор асинхронної машини може бути приведений в обертання у бік, протилежний режиму двигуна. При цьому асинхронна машина перейде в режим електромагнітного гальмування. Щоб визначити характер електромагнітної взаємодії між статором і ротором розглянемо, як і в попередньому випадку, магнітне поле в області провідника обмотки ротора (рис. 8.24).

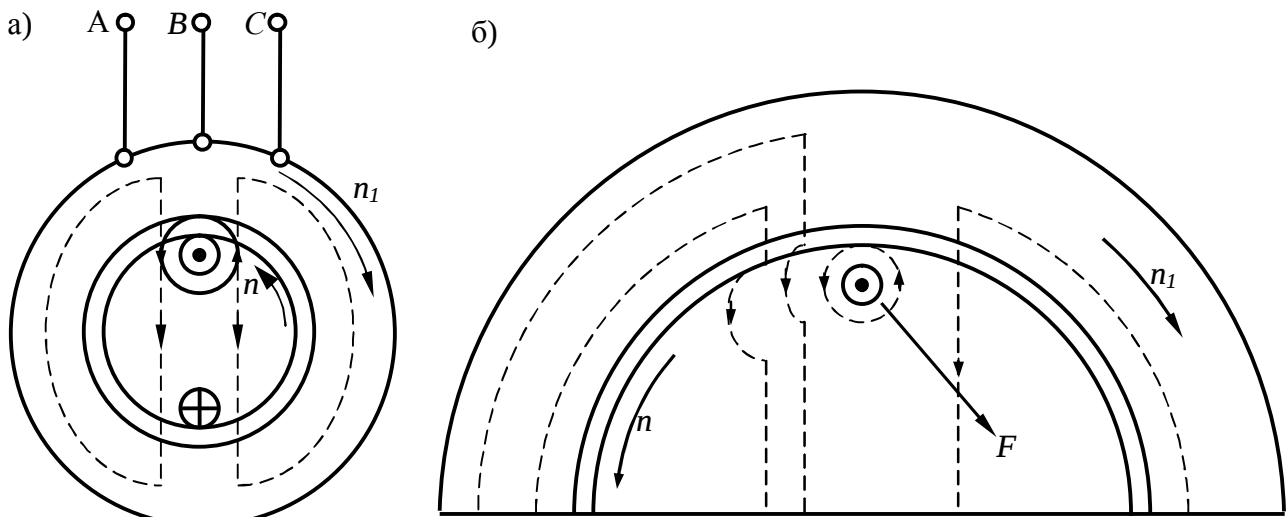


Рис. 8.24 До визначення електромагнітної взаємодії між статором і ротором асинхронної машини в режимі електромагнітного гальма

Поле обертається в одну сторону з частотою n_1 , а ротор – в іншу сторону з частотою n .

По картині силових ліній результуючого магнітного поля в зоні розташування провідника обмотки ротора встановлюємо, що сила F , що діє на провідник, спрямована проти руху ротора. Отже, на валу асинхронної машини ця си-

ла створює електромагнітний момент, що є гальмовим моментом. В сталому режимі цей гальмовий момент врівноважується обертальним моментом, створюваним навантаженням.

В режимі електромагнітного гальма частота обертання ротора змінюється від

$$n = 0 \quad P \quad S = 1$$

$$n = - \Psi_{теор.} \quad P \quad S = + \Psi_{теор.}$$

“-” ротор обертається проти напрямку обертання поля.

Таким чином ковзання змінюється у межах

$$1 \leq S < + \infty$$

На підставі встановлених меж зміни ковзання S асинхронної машини для різних режимів роботи з метою наочності можна представити наступну шкалу зміни ковзання S (рис. 8.25).

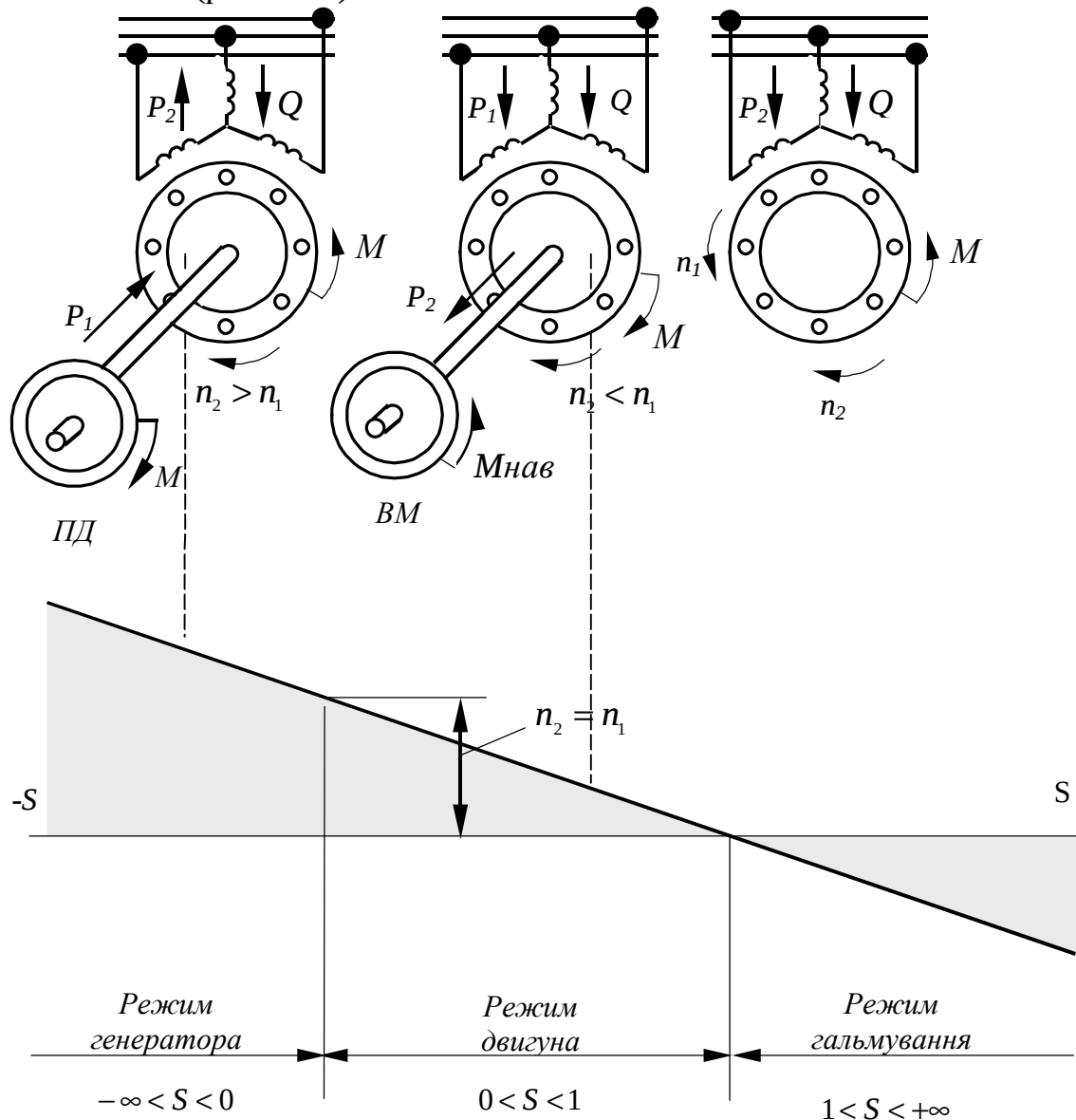


Рис. 8.25 Режими роботи асинхронної машини

Контрольні питання

1. Поясніть конструкцію статора асинхронної машини.
2. Поясніть конструкцію короткозамкнутого і фазного роторів.
3. З якою метою обмотку статора асинхронного двигуна підключають до мережі трифазного струму?
4. Поясніть принцип дії асинхронної машини.
5. Що таке ковзання асинхронної машини?
6. Який діапазон зміни ковзання асинхронної машини в різних режимах її роботи?
7. Яким чином асинхронний двигун можна звести в режим електромагнітного гальмування?
8. Що таке крок обмотки по пазах і якою повинна бути його величина?
9. На які гармонійні складові можна розкласти несинусоїдальну криву ЕРС, наведеної в обмотці статора?
10. Які засоби застосовуються придушення вищих гармонік ЕРС в обмотці статора?
11. Які достоїнства і недоліки двошарових і одношарових обмоток статорів?
12. Яка залежність частоти обертання МРС обмотки статора від частоти струму і числа полюсів в обмотці статора?
13. Як змінити напрям обертання МРС обмотки статора?

Глава 9. Робочий процес трифазної асинхронної машини

9.1 Основні співвідношення для асинхронної машини при нерухомому роторі

Вивчення основних співвідношень для асинхронної машини доцільно почати з частного випадку, коли її ротор загальмований, тобто

$$n = 0$$

Така нерухома асинхронна машина являє собою трансформатор, що відрізняється від звичайного тільки конструкцією. Обмотка статора відіграє роль первинної обмотки, обмотка ротора – вторинної.

Скористаємося принциповою схемою асинхронної машини з фазним ротором (рис. 9.1)..

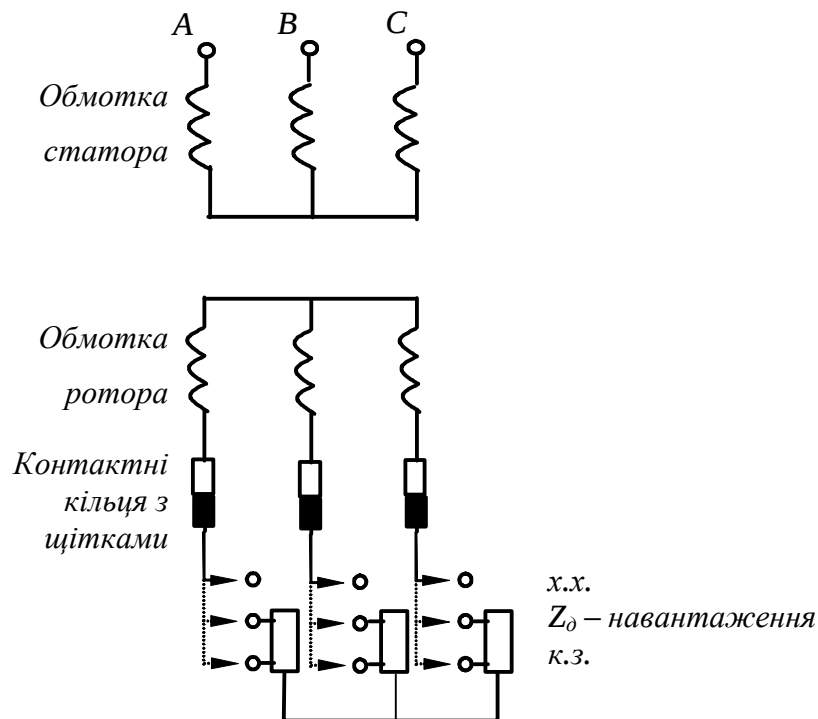


Рис. 9.1 Схema двигуна з контактними кільцями і реостатом

В залежності від опору, включеного в коло ротора, можливі наступні режими роботи асинхронної машини при нерухомому роторі

$$\text{х.х.} - z_0 = \infty$$

$$\text{навантаження} - z_0 > 0$$

$$\text{к.з.} - z_0 = 0$$

Розглянемо основні співвідношення асинхронної машини при нерухомому роторі для цих режимів роботи.

а) холостий хід

В цьому режимі роботи до обмотки статора підводиться напруга $U = U_{1n}$ (фазне значення). При цьому по обмотці статора протікає струм холостого ходу

I_0 (обмотка ротора розімкнута). МРС первинної обмотки (обмотки статора) створює в магнітному колі асинхронної машини магнітне поле, що доцільно, як і в трансформаторах, розглядати як складене з наступних потоків: Φ_0 – основний магнітний потік, Φ_{d1} – потік розсіювання первинної обмотки.

Картина силових ліній цих потоків для ділянки магнітного кола машини представлена на рис. 9.2.

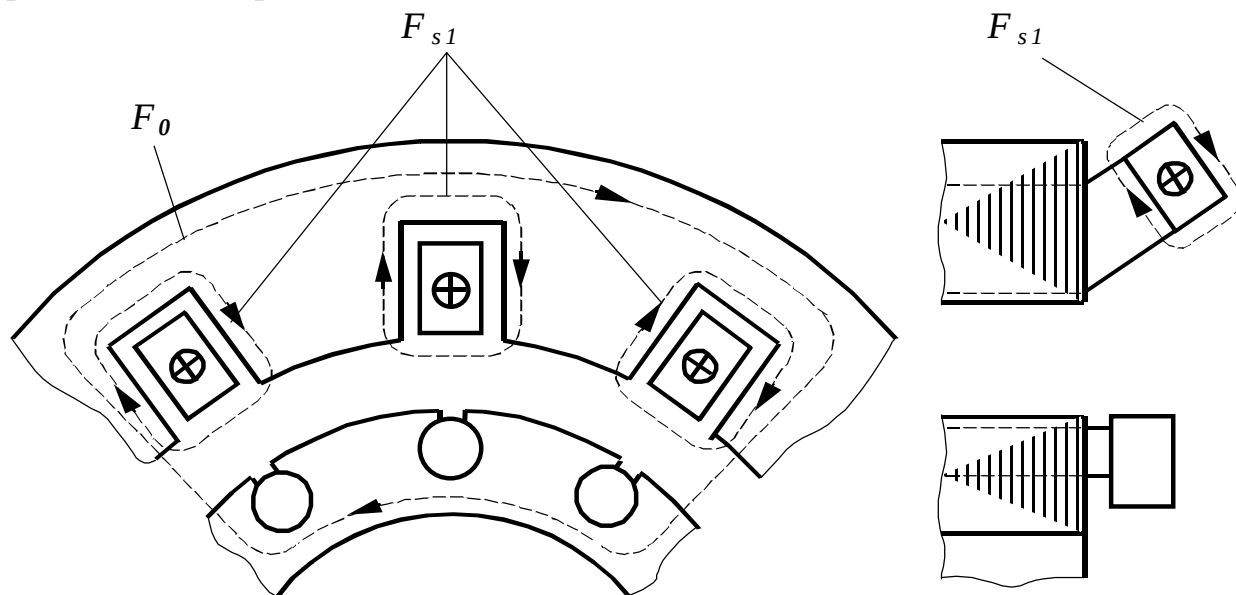


Рис. 9.2. Магнітні потоки асинхронної машини в режимі холостого ходу

Основний магнітний потік Φ_0 індукує в обмотці статора ЕРС E_1 , в обмотці ротора – ЕРС E_2

Потік розсіювання Φ_{s1} індукує в обмотці статора $E_{s1} = -jI_0x_1$.

Таким чином, як і в режимі холостого ходу трансформатора, для кіл статора і ротора рівняння рівноваги напруг можна записати у виді:

$$\left. \begin{aligned} \mathcal{U}_1 &= -\mathcal{E}_1 + I_0 z_1; \\ \mathcal{E}_2 &= \mathcal{U}_{20}, \end{aligned} \right\} \quad (9.1)$$

де z_1 – повний опір фази обмотки статора; $\mathcal{U}_{20}$ – напруга холостого ходу обмотки ротора.

Якісно режим холостого ходу асинхронної машини відрізняється від режиму холостого ходу трансформатора тим, що в асинхронній машині відносна величина струму холостого ходу значно більша і складає:

$\frac{I_0}{I_n} = (25 \div 35)\%$ для асинхронних машин середньої і великої потужності;

$\frac{I_0}{I_n} = (35 \div 60)\%$ для асинхронних машин малої потужності.

Відносно велике значення величини струму холостого ходу в асинхронній машині пояснюється тим, що на шляху проходження основного магнітного по-

току Φ_0 зустрічається повітряний зазор, що робить значний магнітний опір R_m проходженню цього потоку.

Діюче значення ЕРС, що індукуються основним магнітним потоком Φ_0 можна записати:

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= 4,44 w_1 f_1 \kappa_{обм.1} \Phi_0; \\ E_2 &= 4,44 w_2 f_1 \kappa_{обм.2} \Phi_0, \end{aligned} \right\} \quad (9.2)$$

де w_1 і w_2 – число послідовно з'єднаних витків фази обмотки статора і ротора; $\kappa_{обм.1}$ і $\kappa_{обм.2}$ – обмотувальні коефіцієнти перших гармонійних ЕРС статора і ротора.

$$\kappa_E = \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1 \cdot \kappa_{обм.1}}{w_2 \cdot \kappa_{обм.2}} - \text{коефіцієнт трансформації ЕРС асинхронної маши-}$$

ни.

б) коротке замикання

В цьому режимі до обмоток статора підводиться знижена напруга $U_{1к}$. Обмотка ротора замкнута накоротко. По обмотках статора і ротора протікають струми I_1 і I_2 . МРС статора F_1 і ротора F_2 в машині створюють магнітне поле, що як і в режимі короткого замикання трансформатора представимо потоками:

$\Phi_{ок}$ – основний магнітний потік режиму короткого замикання;

Φ_{s1} , Φ_{s2} – потоки розсіювання обмоток статора і ротора.

Картина силових ліній цих потоків представлена на рис. 9.3.

Основний магнітний потік в режимі короткого замикання $\Phi_{ок}$ індукує в обмотці статора ЕРС $E_{1к}$, в обмотці ротора ЕРС $E_{2к}$.

Магнітний потік розсіювання обмотки статора Φ_{s1} індукує в ній ЕРС розсіювання E_{s1} , магнітний потік розсіювання обмотки ротора Φ_{s2} – ЕРС розсіювання E_{s2} .

Рівняння рівноваги напруг для кожної фази статора і ротора запишемо у виді

$$\left. \begin{aligned} U_{1к} &= -E_{1к} + \dot{F}_1 z_1; \\ \dot{E}_{2к} &= \dot{F}_2 z_2, \end{aligned} \right\} \quad (9.3)$$

Рівняння магніторухілих сил (МРС) представимо у виді

$$\dot{F}_1 + \dot{F}_2 = \dot{F}_0. \quad (9.4)$$

Оскільки в режимі короткого замикання до обмотки статора підводиться знижена напруга, то намагнічуючим потоком можна знехтувати. Отже, рівняння МРС записується у такий спосіб:

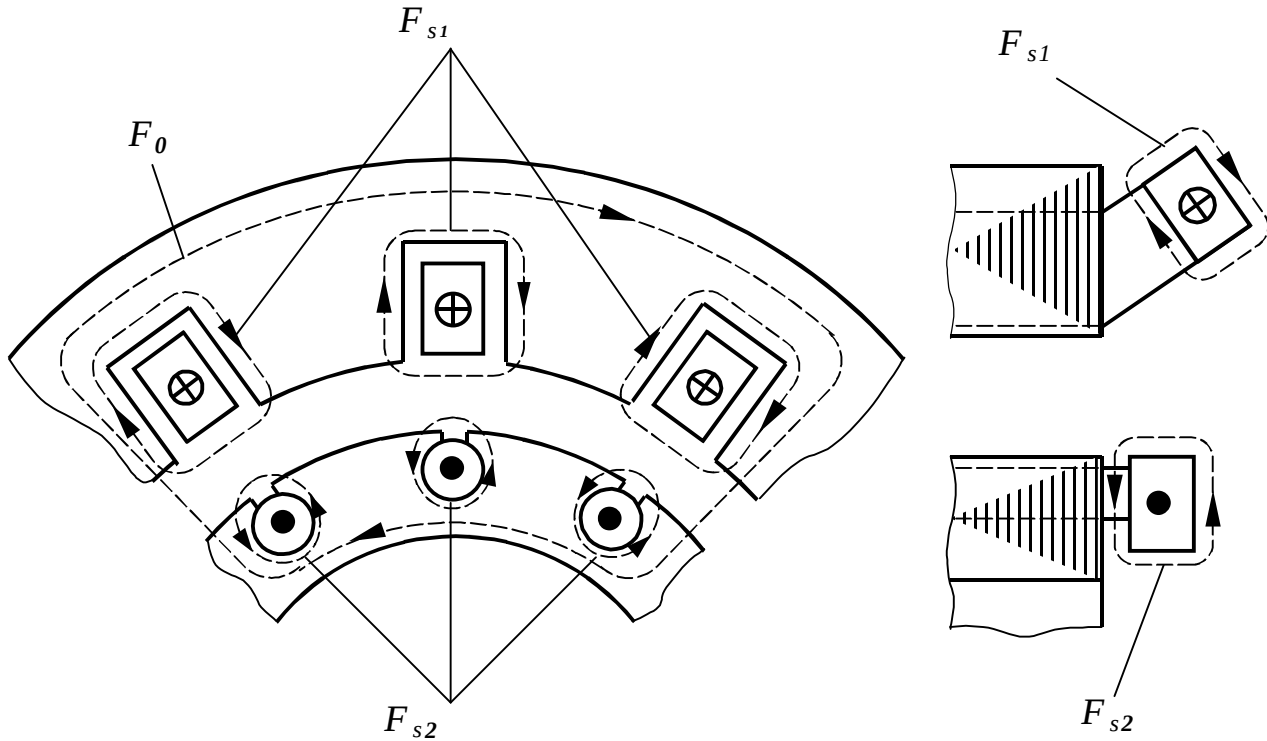


Рис. 9.3 Магнітні потоки асинхронної машини в режимі короткого замикання

$$\vec{\Phi}_1 + \vec{\Phi}_2 = 0, \quad (9.5)$$

або

$$\vec{\Phi}_1 = -\vec{\Phi}_2. \quad (9.6)$$

Маючи на увазі абсолютне значення цих МРС, можна записати наступний вираз

$$\frac{m_1 \sqrt{2}}{p} \cdot \frac{I_1 w_1 k_{об.1}}{p} = \frac{m_2 \sqrt{2}}{p} \cdot \frac{I_2 w_2 k_{об.2}}{p}, \quad (9.7)$$

де m_1 і m_2 – число фаз обмоток статора і ротора.

Звідси знаходимо, що

$$k_I = \frac{I_2}{I_1} = \frac{m_1 w_1 k_{об.1}}{m_2 w_2 k_{об.2}} \quad - \quad \text{коефіцієнт трансформації струмів асинхронної}$$

машини.

В машині з короткозамкнутим ротором число фаз обмотки ротора m_2 дорівнює числу стержнів обмотки.

Якісно режим короткого замикання асинхронної машини відрізняється від режиму короткого замикання трансформатора тим, що при повній підведе-

ній напрузі $U_1 = U_{1н}$ відносно значення струму короткого замикання значно менше, ніж у трансформатора і складає

$$\frac{I_{1к}}{I_{1н}} = 4 \div 7 .$$

У трансформаторів при повній підведеній напрузі

$$\frac{I_{1к}}{I_{1н}} > 20 .$$

в) приведена обмотка ротора

При побудові векторних діаграм і складанні електричної схеми заміщення доцільно, як і для трансформаторів, приводити параметри вторинних обмоток до параметрів первинної обмотки, тобто параметри обмотки ротора до параметрів обмотки статора.

Приведена обмотка ротора це така умовна обмотка, що має те ж число фаз, витків і розташування, що й обмотка статора.

При приведенні обмотки ротора до обмотки статора вважаємо, що енергетичні співвідношення в асинхронній машині не змінюються.

Приведені величини обмотки ротора через дійсні виражаються у такий спосіб:

$$\text{– приведена ЕРС} \quad E'_2 = E_2 \cdot \kappa_E = E_2 \cdot \frac{w_1 \cdot \kappa_{об.1}}{w_2 \cdot \kappa_{об.2}} = E_1 . \quad (9.8)$$

Якщо знехтувати намагнічуючим струмом, то приведений струм обмотки ротора

$$I'_2 = \frac{I_2}{\kappa_I} = I_2 \cdot \frac{m_2 w_2 \kappa_{об.2}}{m_1 w_1 \kappa_{об.1}} \approx I_1 \quad (9.9)$$

Приведений опір обмотки ротора через дійсний визначається з умови, що електричні втрати в обмотці ротора не залежать від її приведення

$$m_2 I_2^2 \cdot r_2 = m_1 (I'_2)^2 \cdot r'_2 ,$$

звідси

$$r'_2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{I_2}{I'_2} \right)^2 \cdot r_2 = \frac{m_2}{m_1} \left(\frac{m_1 w_1 \kappa_{об.1}}{m_2 w_2 \kappa_{об.2}} \right)^2 \cdot r_2 = \frac{w_1 \kappa_{об.1}}{w_2 \kappa_{об.2}} \times \frac{m_1 w_1 \kappa_{об.1}}{m_2 w_2 \kappa_{об.2}} \cdot r_2 = \kappa_E \cdot \kappa_I \cdot r_2 .$$

- приведений активний опір ротора

$$r'_2 = \kappa_E \cdot \kappa_I \cdot r_2 ; \quad (9.10)$$

- приведений індуктивний опір ротора

$$x'_2 = \kappa_E \cdot \kappa_I \cdot x_2. \quad (9.11)$$

2) навантажувальний режим роботи

В навантажувальному режимі роботи асинхронної машини при нерухомому роторі до обмоток статора підводиться напруга $U_{1н}$.

Обмотка ротора замкнута на навантажувальний опір z_∂ .

При цьому асинхронна машина являє собою трансформатор, що працює під навантаженням.

Для приведеної асинхронної машини основні рівняння навантажувального режиму мають такий же вид, що і у трансформатора, що працює під навантаженням.

Рівняння рівноваги напруг для кін обмоток статора і ротора запишуться у такий спосіб:

$$\left. \begin{aligned} \dot{U}_1 &= -\dot{E}_1 + \dot{I}_1 z_1; \\ \dot{E}'_2 &= \dot{I}'_2 z'_\partial. \end{aligned} \right\} \quad (9.12)$$

Рівняння магніторухійних сил

$$\dot{I}_1 + \dot{I}'_2 = \dot{I}_0 \quad (9.13)$$

Ці рівняння справедливі для кожної фази статора і ротора асинхронної машини, якщо навантажувальний режим симетричний.

Схема заміщення для однієї фази статора і ротора представляє таке ж електричне коло, як і для однієї фази трансформатора, що працює під навантаженням (рис. 9.4).

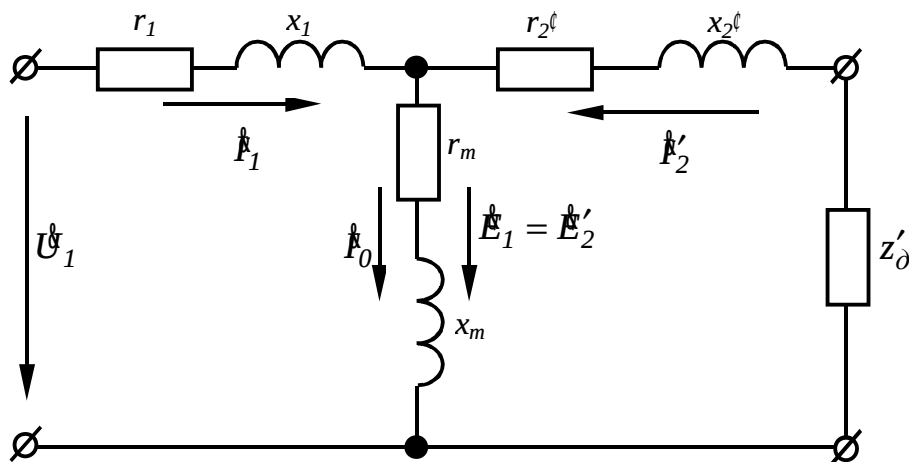


Рис. 9.4. Схема заміщення нерухомої асинхронної машини

На рисунку позначено r_1 і x_1 – параметри фази обмотки статора; r_2' і x_2' – параметри фази обмотки ротора; r_m і x_m – параметри кола намагнічування.

9.2 Основні співвідношення для асинхронної машини при обертовому роторі

Для обмотки статора при обертовому роторі асинхронної машини процеси відбуваються так само, як і при нерухомому роторі. Оскільки незалежно від частоти обертання ротора магнітне поле щодо обмотки статора обертається з незмінною частотою n_1 .

Тому рівняння напруг для кола обмотки статора запишеться так само, як і при нерухомому роторі, тобто

$$\mathcal{U}_1 = -\mathcal{E}_1 + \mathcal{I}_1 z_1. \quad (9.14)$$

Для обмотки ротора рівняння рівноваги напруг можна записати тільки в тому випадку, коли буде встановлено, як залежить від частоти обертання ЕРС і опір обмотки ротора.

Якщо ротор обертається з частотою n , а магнітне поле обертається в тому ж напрямку з частотою n_1 , то все відбувається так, якби ротор був нерухомий, а магнітне поле щодо нього оберталося б з частотою

$$n_2 = n_1 - n. \quad (9.15)$$

Отже, частоту ЕРС, що індукується в обмотці ротора при його обертанні можна виразити у такий спосіб

$$f_2 = p \cdot n_2,$$

де n_2 виражено в [об/с].

Або

$$f_2 = p(n_1 - n) = \underbrace{p}_{f_1} \cdot \underbrace{n_1}_{\frac{1}{S}} - \underbrace{p}_{f_1} \cdot \underbrace{n}_{\frac{1}{S}}.$$

Тобто

$$f_2 = f_1 \cdot S. \quad (9.16)$$

Звідси випливає, що частота ЕРС обмотки обертового ротора f_2 може бути виражена через частоту напруги на затискачах обмотки статора f_1 помножену на ковзання S .

Діючи значення ЕРС фази обмотки обертового ротора знаходимо з на-

ступного відомого виразу

$$E_{2s} = 4,44 w_2 f_{2\kappa_{об.2}} \cdot F_0 = \frac{4,44 w_2 f_{2\kappa_{об.2}} \cdot F_0}{E_2} \cdot S = E_2 \cdot S \quad (9.17)$$

Таким чином, ЕРС обертового ротора E_{2s} можна виразити через ЕРС нерухомого ротора E_2 помножену на ковзання S .

Установимо, як залежать опір контуру ротора від частоти його обертання.

Активний опір обмотки ротора r_2 можна вважати незалежним від частоти обертання ротора, якщо знехтувати залежністю цього опору від температури й ефекту витиснення струму в обмотці ротора.

Індуктивний опір фази обмотки ротора при її обертанні x_{2s}

$$x_{2s} = 2\pi f_2 L_{s2} = \frac{2\pi f_2 L_{s2}}{x_2} \cdot S = x_2 \cdot S, \quad (9.18)$$

де x_2 – індуктивний опір фази обмотки нерухомого ротора.

З огляду на отримані вирази, для випадку, коли в контурі ротора не включений додатковий опір, рівняння рівноваги напруг для контуру обмотки ротора для кожної фази запишеться у виді

$$\dot{E}_{2s} = \dot{I}_2 \cdot r_2 + j\dot{I}_2 x_{2s}. \quad (9.19)$$

Звідси, струм обмотки обертового ротора

$$\dot{I}_2 = \frac{\dot{E}_{2s}}{r_2 + jx_{2s}}. \quad (9.20)$$

Діюче значення струму ротора

$$I_2 = \frac{E_{2s}}{\sqrt{r_2^2 + x_{2s}^2}}. \quad (9.21)$$

Рівняння МРС обертової асинхронної машини можна записати, якщо установимо з якою частотою обертаються в просторі основні гармонійні МРС статора F_1 і ротора F_2 .

МРС статора F_1 обертається в просторі з частотою n_1 . Для того, щоб установити частоту обертання F_2 в просторі враховуємо наступні обставини: МРС F_2 обертається щодо ротора з частотою n_2 , а частота струму в роторі f_2 . Однак сам ротор обертається з частотою n . Отже, МРС F_2 обертається щодо нерухомої точки в просторі, тобто щодо статора, з частотою

$$(n_2 + n);$$

$$n_2 + n = n_1 \quad \text{1 2 3} \quad n + n = n_1$$

Таким чином, хвилі основних гармонійних МРС F_1 і F_2 обертаються в просторі з однаковими частотами.

Тому для обертової асинхронної машини рівняння МРС записується так само, як і для нерухомої машини

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_0,$$

або

$$\vec{F}_1 + \vec{F}_2 = \vec{F}_0. \quad (9.22)$$

9.3 Схема заміщення асинхронного двигуна при обертовому роторі

Перетворимо вираз 9.21 для струму обмотки обертового ротора, у такий спосіб

$$I_2 = \frac{E_2 \cdot S}{\sqrt{r_2^2 + (x_2 S)^2}} = \frac{E_2}{\sqrt{(r_2/S)^2 + x_2^2}}. \quad (9.23)$$

Звідси випливає, що струм обмотки обертового ротора можна виразити через ЕРС нерухомого ротора E_2 , індуктивний опір нерухомого ротора – x_2 і активний опір r_2/S . Це означає, що при обертовому роторі для кожної фази асинхронної машини схему заміщення можна представити так само як і для нерухомої асинхронної машини, з тією тільки різницею, що замість активного опору r_2 буде присутній змінний опір r_2/S .

В схемі заміщення (рис. 9.5) струм намагнічуючого контуру I_0 , є реальним струмом холостого ходу асинхронної машини при $S > 0$. Це є основним недоліком **Т – образної** схеми заміщення, оскільки всі струми в цій схемі заміщення зв'язані з величинами ковзання.

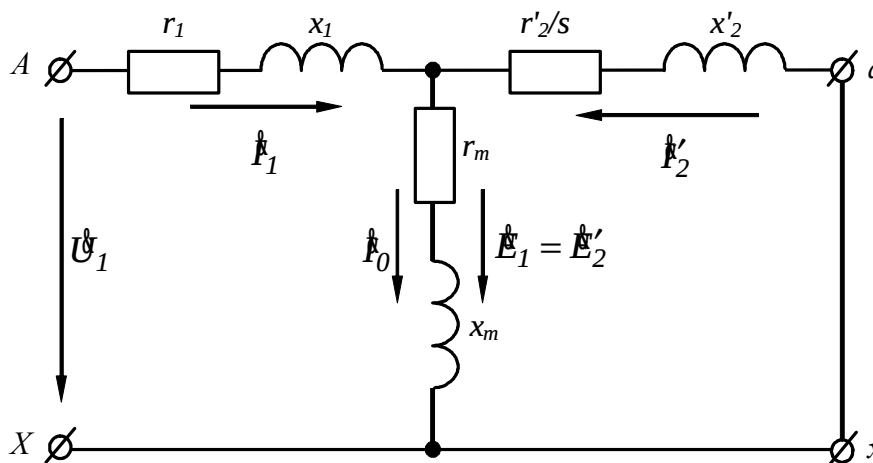


Рис. 9.5. Т – образна схема заміщення асинхронної машини

При розрахунках робочих режимів асинхронної машини, розрахунку робочих характеристик використовується **Γ – образна** схема заміщення (рис. 9.6).

В схемі заміщення (рис. 9.6) струм контуру намагнічування I_{00} – є струм синхронного ходу асинхронної машини (при $n = n_1$), коли $S = 0$. Це є основною перевагою цієї схеми.

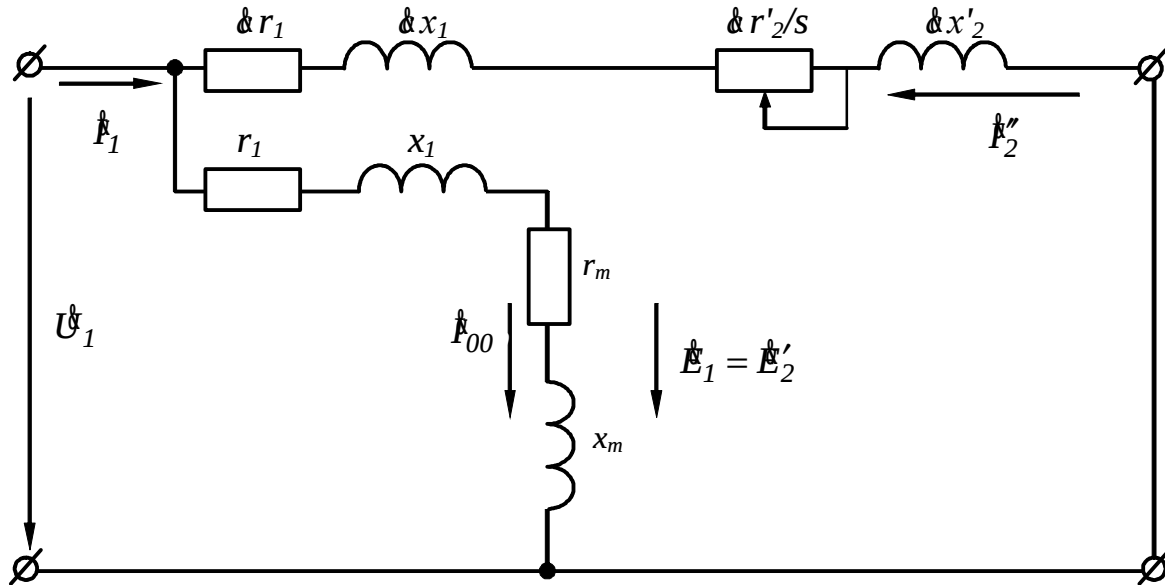


Рис. 9.6 Точна Γ – образна схема заміщення асинхронної машини

Точна схема заміщення (рис. 9.6) виходить перетворенням **T – образної** схеми заміщення (рис. 9.5).

Доведемо справедливність цього перетворення.

З **T – образної** схеми заміщення знаходимо, що

$$I_1 = \frac{U_1}{Z_1 + \frac{Z'_2 Z_m}{Z'_2 + Z_m}} = U_1 \frac{Z'_2 + Z_m}{Z_1 Z'_2 + Z_1 Z_m + Z'_2 Z_m}. \quad (9.24)$$

Струм контуру намагнічування I_{00} можна виразити з **T – образної** схеми заміщення (рис. 9.5), якщо прийняти значення $S = 0$.

При цьому впливає, що

$$r'_2/S = \infty.$$

У такий спосіб

$$I_{00} = \frac{U_1}{Z_1 + Z_m} = \frac{U_1}{Z_m (1 + Z_1/Z_m)} = \frac{U_1}{\kappa_1 Z_m}, \quad (9.25)$$

де $\kappa_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}$ – поправочний коефіцієнт для точної **Γ – образної** схеми заміщення.

В точній ***Г-образній*** схемі заміщення зв'язок між струмами записується у виді

$$\dot{I}_1 + \dot{I}_2'' = \dot{I}_{00}. \quad (9.26)$$

Звідси струм головного контуру

$$\begin{aligned} -\dot{I}_2'' = \dot{I}_1 - \dot{I}_{00} &= \dot{U}_1 \left(\frac{Z_2' + Z_m}{Z_1 \cdot Z_2' + Z_1 \cdot Z_m + Z_2' Z_m} - \frac{1}{Z_1 + Z_m} \right) = \\ &= \frac{\dot{U}_1}{Z_1 \left(1 + \frac{Z_1}{Z_m} \right) + Z_2' \left(1 + \frac{Z_1}{Z_m} \right)^2} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 c_1 + Z_2' c_1^2}. \end{aligned} \quad (9.27)$$

З виразу (9.27) для струму головного контуру очевидна справедливність зробленого перетворення електричної схеми заміщення.

При практичних розрахунках для асинхронних машин, як правило, приймають допущення, що c_1 для ***Г-образної*** схеми заміщення є дійсним числом, тобто

$$c_1 = 1 + \frac{Z_1}{Z_m}. \quad (9.28)$$

При цьому схему заміщення можна представити в слідуючому виді (рис. 9.7).

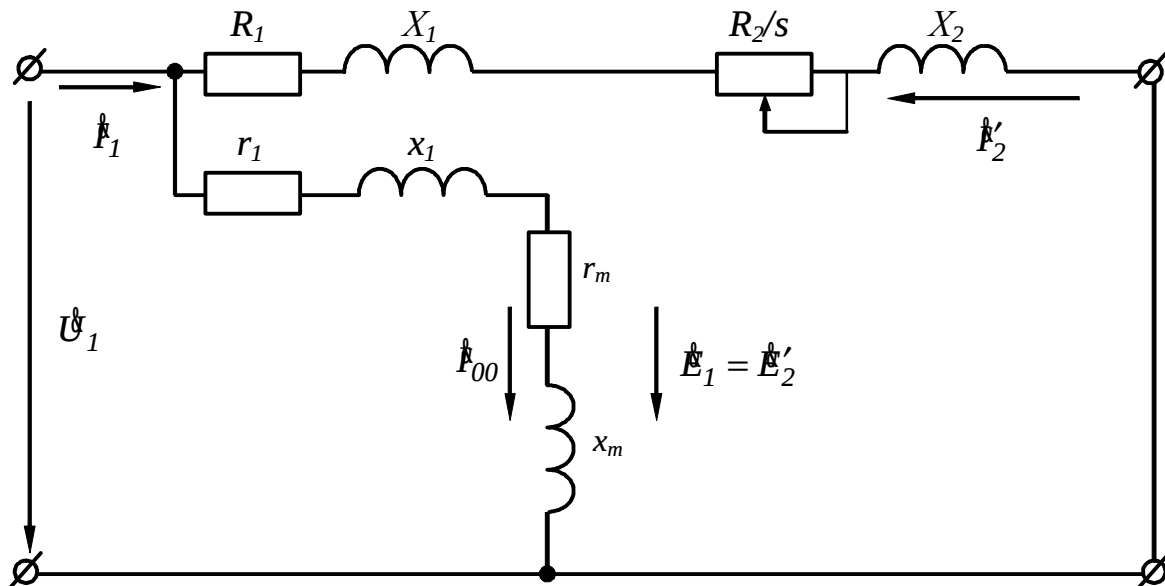


Рис. 9.7. Уточнена Г – образна схема заміщення асинхронної машини

На рисунку позначено: $R_1 = c_1 r_1$; $X_1 = c_1 x_1$; $R_2 = c_1^2 r_2'$; $X_2 = c_1^2 x_2'$; $I_2' = c_1 I_2''$.

З огляду на те, що для асинхронних машин нормального виконання $c_1 = 1,04$, $1,08$, у ряді випадків приймають $c_1 = 1$. При цьому користаються спрощеною схемою заміщення асинхронної машини.

Контрольні питання

1. В чому подібність і в чому розходження між асинхронним двигуном і трансформатором?
2. В чому полягає заміна обертового ротора еквівалентним йому нерухомим?
3. Т – образна електрична схема заміщення асинхронної машини з обертовим ротором, фізичний зміст її параметрів.
4. Г – образна електрична схема заміщення і зв'язок її параметрів з параметрами Т – образної схеми.

Глава 10. Електромагнітний момент і робочі характеристики асинхронних двигунів

10.1 Енергетична діаграма, втрати і ККД асинхронного двигуна

Основним режимом роботи асинхронних машин є режим в якості двигуна.

Розглянемо процес перетворення підведеної до асинхронного двигуна електричної потужності P_1 у механічну потужність P_2 , що **віддається корисно**, за допомогою енергетичної діаграми.

$$P_1 = \sqrt{3}U_{1л} \cdot I_{1л} \cdot \cos j_1 = 3U_{1\phi} \cdot I_{1\phi} \cos j_1, \quad (10.1)$$

де P_1 – електрична потужність на затискачах обмотки статора (вхідна потужність).

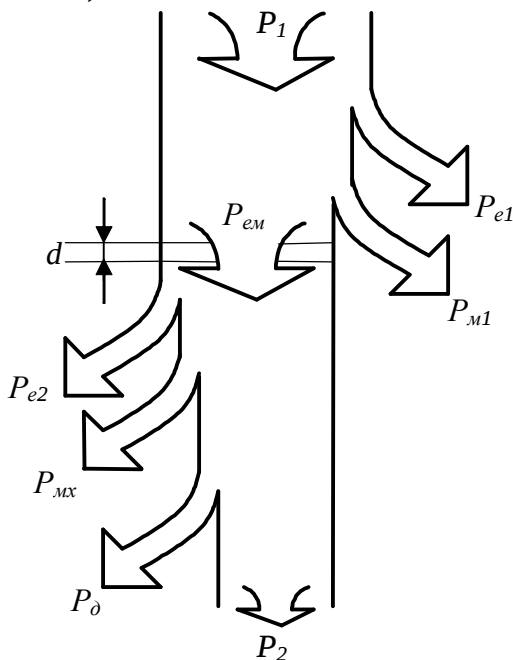


Рис. 10.1 Енергетична діаграма асинхронного двигуна

На шляху перетворення цієї потужності в статорі мають місце наступні втрати: $P_{e1} = m_1 I_{1\phi}^2 \cdot r_1$ – електричні втрати в обмотці статора, P_{m1} – магнітні втрати в пакеті стали статора, тобто втрати на гістерезис (перемагнічування) і втрати на вихрові струми.

Частина потужності, що залишилася, електромагнітним шляхом передається на ротор і являє собою так звану **електромагнітну потужність** P_{em}

$$P_{em} = P_1 - (P_{e1} + P_{m1}) \quad (10.2)$$

В роторі на шляху перетворення P_{em} мають місце наступні втрати:
електричні втрати в обмотці ротора

$$P_{e2} = m_2 I_{2\phi}^2 \cdot r_2 = 3(I'_{2\phi})^2 \cdot r'_2 \quad (10.3)$$

Частина потужності, що залишилася, називається повною **механічною потужністю** P'_2

$$P'_2 = P_{em} - P_{e2} \quad (10.4)$$

Втратами в сталі ротора нехтуємо, оскільки в номінальному режимі роботи частота перемагнічування сталі ротора невелика і складає (1, 3) Гц.

Корисна механічна потужність, що віддається, менше повної механічної потужності на величину втрат

$$P_{mx} + P_{\partial} = P_0, \quad (10.5)$$

де P_{mx} – механічні втрати на тертя в підшипниках, вентиляційні втрати і втрати на тертя щіток об контактні кільця:

P_{∂} – додаткові втрати, що представляють втрати в сталі конструктивних деталей від потоків розсіювання, а також втрати в сталі зубців статора і ротора через пульсації магнітного потоку в повітряному зазорі, що викликані наявністю зубців і пазів статора і ротора.

Механічні і додаткові втрати складають втрати холостого ходу P_0

$$P_2 = P'_2 - (P_{mx} + P_{\partial}). \quad (10.6)$$

ККД асинхронного двигуна визначається відношенням корисної потужності на валу двигуна до споживаної потужності

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

При визначенні ККД асинхронного двигуна з високою точністю можна вимірити споживану потужність P_1 , механічну потужність P_2 на валу асинхронного двигуна вимірити з високою точністю дуже складно. Тому, з огляду на те, що

$$P_1 = P_2 + \sum p,$$

де $\sum p = P_{e1} + P_{m.1} + P_{e2} + P_{mx} + P_{\partial}$ – (ці втрати піддаються обліку).

$$h = \frac{P_1 - \sum p}{P_1} = 1 - \frac{\sum p}{P_1}. \quad (10.7)$$

Для двигунів нормального виконання ККД складає (75÷90)%.

10.2 Електромагнітний момент асинхронного двигуна

При роботі асинхронного двигуна в сталому режимі, тобто $n = const$, його електромагнітний момент M_{em} врівноважується гальмовим моментом, створюваним робочим механізмом M_2 , і моментом, що відповідає втратам холостого ходу P_0 .

У такий спосіб рівняння рівноваги моментів

$$M_{em} = M_2 + M_0, \quad (10.8)$$

де $M_2 = \frac{P_2}{\omega}$; $M_0 = \frac{P_0}{\omega}$; $\omega = 2\pi n$ [рад/с] – кутова частота обертання ротора.

Електромагнітний момент асинхронного двигуна утвориться в результаті взаємодії обертового магнітного поля, утвореного обмоткою статора зі струмом, що протікає по обмотці ротора.

Оскільки це поле обертається з частотою n_1 , тобто з кутовою частотою $\omega_1 = 2\pi n_1$ [рад/с], то очевидно, що

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1}. \quad (10.9)$$

Звідси

$$P_{em} = M_{em} \cdot \omega_1. \quad (10.10)$$

З іншого боку, з енергетичної діаграми (10.1)

$$P_{em} = P_2 + P_0 + p_{e2} = \underbrace{M_2 \omega_1}_{1 \cdot 2 \cdot 3} + \underbrace{M_0 \omega_1}_{1 \cdot 2 \cdot 3} + p_{e2} = M_{em} \omega_1 + p_{e2}. \quad (10.11)$$

Прирівнюючи рівняння (10.10) і (10.11) для P_{em} , маємо

$$M_{em} \omega_1 = M_{em} \omega + p_{e2}. \quad (10.12)$$

Звідси знаходимо два наступних рівняння:

1) рівняння для ковзання S

$$M_{em} (\omega_1 - \omega) = p_{e2};$$

$$\underbrace{M_{em}}_{1 \cdot 2 \cdot 3} \omega_1 \underbrace{\frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1}}_{1 \cdot 2 \cdot 3} = p_{e2};$$

$$S = \frac{p_{e2}}{P_{em}}. \quad (10.13)$$

2) рівняння для електромагнітного моменту

$$M_{em} = \frac{p_{e2}}{\omega_1 - \omega} = \frac{m_1 (I_2')^2 \cdot r_2'}{\frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \omega_1} = \frac{m_1 (I_2')^2 \cdot \frac{r_2'}{S}}{\omega_1}. \quad (10.14)$$

З уточненої Γ – *образної* схеми заміщення (рис. 9.7) випливає:

$$r_2' = \frac{R_2}{c_1^2};$$

$$I_2' = c_1 I_2'' = \frac{c_1 U_1}{\sqrt{\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2}}.$$

Звідси

$$M_{em} = \frac{m_1 U_1^2 \frac{R_2}{S}}{w_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]},$$

$$M_{em} = \frac{m_1 p U_1^2 \frac{R_2}{S}}{2pf_1 \left[\left(R_1 + \frac{R_2}{S}\right)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]}, \quad (10.15)$$

оскільки $w_1 = 2pn_1 = \frac{2pf_1}{p}$.

З отриманого рівняння (10.15) випливає, що обертальний момент M_{em} асинхронного двигуна пропорційний квадрату підведені до двигуна напруги U_1^2 , зворотно пропорційний частоті цієї напруги f_1 , а також залежить від величини опорів обмоток статора і ротора.

10.3 Механічні характеристики асинхронної машини

Теорія електричного приводу при вивченні поведінки електричного двигуна, що працює під навантаженням, широко використовує залежності $M_{em}=f(S)$ або $M_{em}=f(n)$, $n=f(M_{em})$ які називаються механічними характеристиками.

Розрізняють *природні* і *штучні* механічні характеристики асинхронного двигуна.

Природна механічна характеристика буде тоді, коли в колі обмотки статора або ротора відсутні які-небудь додаткові опори. Щоб одержати графічне представлення природної механічної характеристики проаналізуємо рівняння електромагнітного моменту (10.15).

В момент включення асинхронного двигуна в мережу, коли частота його обертання $n=0$, $S=1$. При цьому асинхронний двигун розвиває пусковий момент

$$M_n = \frac{mp U_1^2 R_2}{2pf_1 \left[(R_1 + R_2)^2 + (X_1 + X_2)^2 \right]} = \frac{m_1 p U_1^2 R_2}{2pf_1 (R_k^2 + X_k^2)}, \quad (10.16)$$

де $R_k = (R_1 + R_2)$ – активний опір режиму короткого замикання асинхронного двигуна (див. рис. 9.7);

$X_k = (X_1 + X_2)$ – індуктивний опір режиму короткого замикання асинхронного двигуна.

По мірі розгону асинхронного двигуна після його включення в мережу, тобто зі зростанням частоти обертання ротора, ковзання S зменшується за значенням, представляючи собою деякий позитивний дріб. Підставляючи ці значення S у вираз (10.15) знайдемо, що спочатку зі зменшенням ковзання електромагнітний момент двигуна збільшується, і при $S = S_m$ він досягає максимуму, тобто $M_{em} = M_{em,max}$.

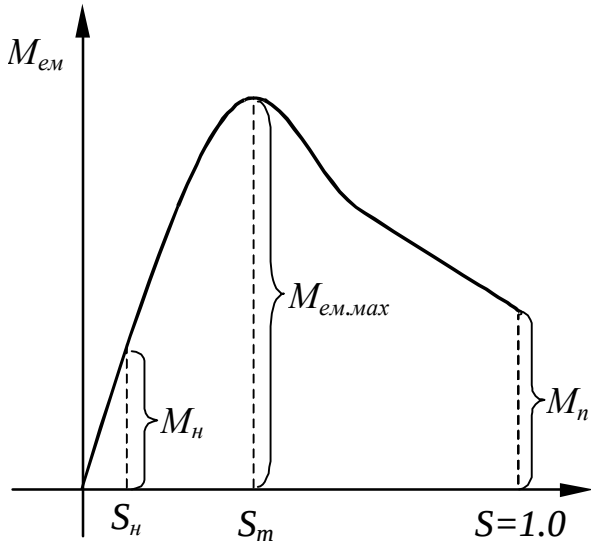


Рис. 10.2. Природна механічна характеристика асинхронного двигуна

При подальшому зменшенні S електромагнітний момент зменшується і при

$$S = 0 ; \quad M_{em} = 0$$

З цього випливає, що природна механічна характеристика асинхронного двигуна $M_{em} = f(S)$ має вид (див. рис. 10.2).

Щоб установити, при яким значенні ковзання S_m електромагнітний момент досягає $M_{em,max}$ необхідно вирішити рівняння $\frac{dM_{em}}{dS} = 0$. Рішення цього рівняння

дає наступні результати

$$S_m = \pm \frac{R_2}{\sqrt{R_1^2 + X_k^2}} . \quad (10.17)$$

Підставивши значення критичного ковзання (по 10.17) у вираз електромагнітного моменту (10.15), після ряду перетворень одержимо рівняння максимального моменту

$$M_{max} = \frac{m_1 p U_1^2}{4 p f_1 \left[\pm R_1 + \sqrt{R_1^2 + X_k^2} \right]} . \quad (10.18)$$

Для асинхронних машин загального призначення активний опір обмотки статора R_1 набагато менше індуктивного опору режиму короткого замикання: $R_1 \ll X_k$. Тому, нехтуючи значенням R_1 , одержимо спрощений вираз критичного ковзання

$$S_m \approx \pm \frac{R_2}{X_k} ,$$

і максимального моменту

$$M_{em.max} = \pm \frac{m_1 p U_1^2}{4p f_1 X_k} . \quad (10.19)$$

Знак "+" у виразах (10.17 – 10.19) відноситься до режиму двигуна, а знак "-" до генераторного режиму.

На мал.10.3 показана механічна характеристика асинхронної машини $M = f(S)$ при $U_1 = const$. На цій характеристиці зазначені зони, що відповідають різним режимам роботи: режим двигуна ($0 < S \leq 1$), коли електромагнітний момент M_{em} є обертовим; генераторний режим ($-\infty < S < 0$) і гальмовий режим ($1 < S < +\infty$), коли електромагнітний момент є гальмуючим.

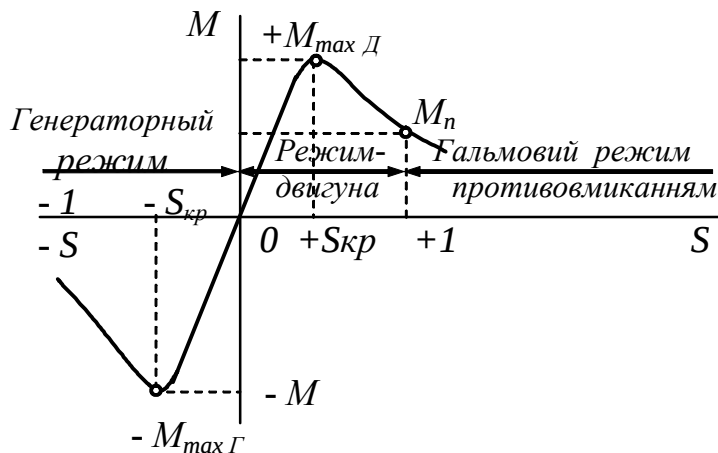


Рис. 10.3. Механічна характеристика асинхронної машини

З (10.15), (10.16) і (10.18) видно, що електромагнітний момент асинхронного двигуна, а також його пусковий і максимальний моменти пропорційні квадрату напруги, що підводиться до обмотки статора: $M \equiv U_1^2$. В той же час аналіз виразу (10.18) показує, що значення критичного ковзання не залежить від

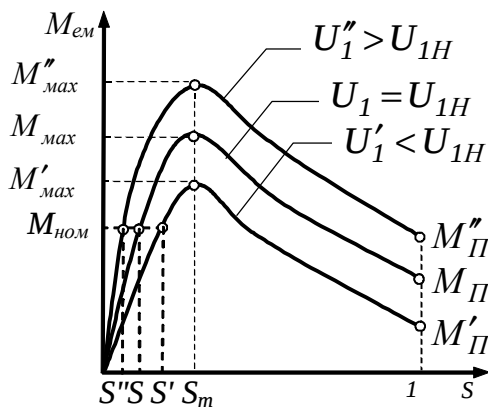


Рис. 10.4. Вплив напруги на вид механічної характеристики асинхронного двигуна

напруги U_1 . Це дає нам можливість побудувати механічні характеристики $M_{em} = f(S)$ для різних значень напруги U_1 (рис. 10.4), з яких випливає, що коливання напруги мережі U_1 щодо його номінального значення U_{1H} супроводжується не тільки зміною максимального і пускового моментів, але і зміною частоти обертання ротора. Зі зменшенням напруги мережі частота обертання ротора знижується (ковзання збільшується). Напруга U_1 впливає на значення максимального моменту M_{max} , а також на перевантажувальну здатність двигуна $l = M_{max}/M_n$.

Так, якщо напруга U_1 понизилася на

30%, тобто $U_1 = 0,7U_n$, то максимальний момент двигуна зменшиться більш ніж удвічі: $M'_{max} = (0,7)^2 M_{max} = 0,49M_{max}$. На скільки ж зменшиться перевантажувальна здатність двигуна? Якщо, наприклад, при номінальній напрузі мережі перевантажувальна здатність $l = M_{max}/M_n = 2$, то при зниженій напрузі на 30% перевантажувальна здатність двигуна $l' = M'_{max}/M_n = 0,49M_{max}/M_n = 0,49 \times 2 = 0,98$, тобто двигун не в змозі нести навіть номінальне навантаження.

Для асинхронного двигуна з фазним ротором можна одержати штучні механічні характеристики введенням в коло обмотки ротора додаткового активного опору.

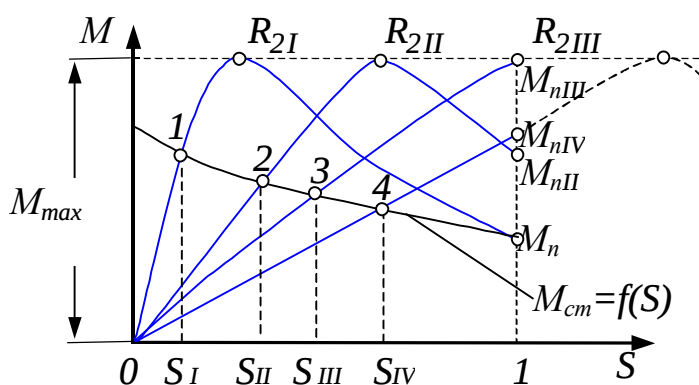


Рис. 10.5 Вплив активного опору в колі обмотки ротора на механічну характеристику асинхронного двигуна

Як випливає з (10.18), значення максимального моменту двигуна не залежить від активного опору ротора R_2 . Що ж стосується критичного ковзання S_m , то, як це видно з (10.17), воно пропорційне опору R_2 . Таким чином, якщо в асинхронному двигуні поступово збільшувати активний опір кола ротора, то значення максимального моменту буде залишатися незмінним, а критичне ковзання $S_m = \frac{R_2 + R_0}{X_k}$ буде збільшуватися (рис. 10.5).

При цьому пусковий момент двигуна M_{II} зростає зі збільшенням опору R_2 до деякого значення. На малюнку це відповідає опору R_{2III} , при якому пусковий момент дорівнює максимальному. При подальшому збільшенні опору R_2 пусковий момент зменшується. Аналіз графіків $M_{em} = f(S)$, приведених на рис. 10.5, також показує, що зміна опору в колі ротора R_2 супроводжується зміною частоти обертання: зі збільшенням R_2 ковзання збільшується, тобто частота обертання зменшується (точки 1, 2, 3, 4).

Таким чином, аналізуючи вирази (10.15 – 10.19) можна зробити наступні висновки:

1. Електромагнітний момент асинхронного двигуна пропорційний квадрату напруги U_1^2 ;
2. Критичне ковзання S_m , при якому електромагнітний момент асинхронного двигуна, тим більший, чим більше значення опору в колі ротора R_2 ;
3. Значення максимального електромагнітного моменту $M_{em,max}$ не залежить від значення опору в колі ротора R_2 ;
4. Електромагнітний момент M_{em} зворотно пропорційний реактивному опору X_k .

10.4 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Експлуатаційні властивості асинхронного двигуна визначаються його робочими характеристиками.

Робочі характеристики асинхронного двигуна (рис. 10.6) являють собою графічно виражені залежності частоти обертання n , ККД h , корисного моменту (моменту на валу) M_2 , коефіцієнта потужності $\cos j_1$ і струму статора I_1 від корисної потужності P_2 при $U_1 = \text{const}$ і $f_1 = \text{const}$

Розглянемо ці характеристики як зняті експериментально (рис. 10.6).

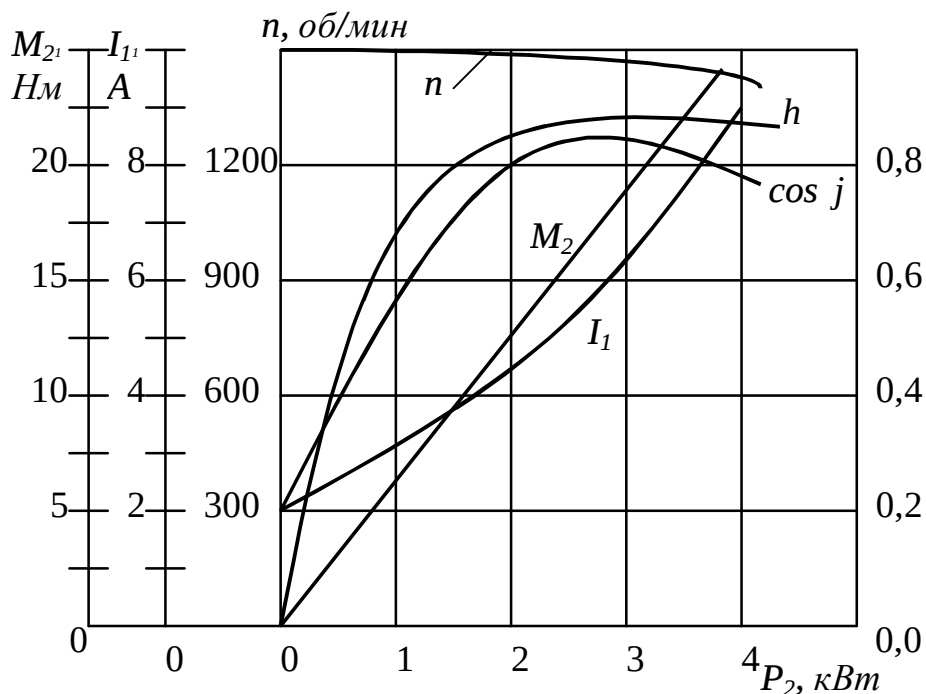


Рис. 10.6 Робочі характеристики асинхронного двигуна

Швидкісна характеристика $n = f(P_2)$. Частота обертання ротора асинхронного двигуна

$$n = n_1 (1 - S).$$

Ковзання по (10.13)

$$S = P_{e2} / P_{эм}, \quad (10.20)$$

тобто ковзання двигуна, а отже, і його частота обертання визначається відношенням електричних втрат в роторі до електромагнітної потужності $P_{эм}$. Нехтуючи електричними втратами в роторі в режимі холостого ходу можна прийняти $P_{e2} = 0$, а тому $S_0 = 0$ і $n_0 \gg n_1$. В міру збільшення навантаження на валу відношення (10.20) росте, досягаючи значень 0,01 – 0,08 при номінальному навантаженні. Відповідно до цього залежність $n = f(P_2)$ являє собою криву, слабо нахилену до осі абсцис.

Залежність $M_2 = f(P_2)$. Залежність корисного моменту на валу двигуна M_2 від корисної потужності P_2 визначається виразом

$$M_2 = P_2 / \omega = 60 P_2 / (2\pi n) = 9,55 P_2 / n, \quad (10.21)$$

де P_2 – корисна потужність, Вт; $\omega = 2\pi n / 60$ – кутова частота обертання ротора.

З цього виразу випливає, що якщо $n = \text{const}$, то графік $M_2 = f(P_2)$ представляє собою пряму лінію. Але в асинхронному двигуні зі збільшенням навантаження P_2 частота обертання ротора зменшується, а тому корисний момент на валу M_2 зі збільшенням навантаження зростає трохи швидше навантаження, а отже графік $M_2 = f(P_2)$ має криволінійний характер.

Залежність $\cos j_1 = f(P_2)$. В зв'язку з тим, що струм статора має реактивну (індуктивну) складову, необхідну для створення магнітного поля в статорі, коефіцієнт потужності асинхронного двигуна менше одиниці. Найменше значення коефіцієнта потужності відповідає режиму холостого ходу. Пояснюється це тим, що струм холостого ходу I_0 при будь-якому навантаженні залишається практично незмінним. Тому при малих навантаженнях двигуна струм статора невеликий і в значній частині є реактивним ($I_1 \gg I_0$). В результаті цього зсув по фазі струму статора I_1 щодо напруги U_1 являється значним ($j_1 = j_0$), лише трохи менше 90° . Коефіцієнт потужності асинхронних двигунів в режимі холостого ходу, як правило, не перевищує 0,2. При збільшенні навантаження на валу двигуна росте активна складова струму I_1 і коефіцієнт потужності зростає, досягаючи найбільшого значення (0,80–0,90). Подальше збільшення навантаження супроводжується зменшенням $\cos j_1$, що пояснюється зростанням індуктивного опору ротора ($X_2 \propto S$) за рахунок збільшення ковзання, а отже, і частоти струму в роторі.

Асинхронний двигун з конкретними номінальними даними при експлуатації може навантажуватися різним образом і працювати в діапазоні навантажень від холостого ходу до номінального. Тому потрібно, щоб він мав досить високий ККД і коефіцієнт потужності не тільки при номінальній, але і при неповному навантаженні, що складає більш 0,5 номінальної. Зі збільшенням ККД зменшується споживана двигуном активна потужність $P_1 = P_2 / \eta$; зі збільшенням коефіцієнта потужності зменшується споживана ним повна потужність $S_1 = P_1 / \cos j_1$ за рахунок зниження реактивної потужності $Q_1 = S_1 \sin j_1 = P_1 \tan j_1$. І те й інше приводить до зменшення струму, що споживається з мережі, $I_1 = S_1 / (m_1 U_1) = P_2 / (m_1 U_1 \eta \cos j_1)$, повної потужності встановлених на електричних станціях синхронних генераторів і втрат в трансформаторах і електричних мережах при передачі електричної енергії, – в кінцевому рахунку зменшуючи вартість експлуатації двигуна.

Асинхронні двигуни проектують таким чином, щоб ККД і $\cos j_1$ мали максимуми при $P_2 = (0,5, 0,8) P_{2н}$. ККД має максимум в області, де постійні

втрати ($P_{ст}$ і $P_{мх}$) змінним втратам – електричним (P_{e1} і P_{e2}). Коефіцієнт корисної дії має положистий максимум в області $(0,5 \div 0,8)P_{2н}$, тому що більшість асинхронних двигунів в електроприводах експлуатуються при таких навантаженнях.

Важливими характеристиками асинхронного двигуна є кратність пускового моменту

$$\kappa_n = \frac{M_n}{M_H} = 1 \div 1,7$$

і перевантажувальна здатність асинхронного двигуна по моменту

$$K_M = \frac{M_{ем.мах}}{M_H} = 2 \div 2,5.$$

Контрольні питання

1. Які види втрат мають місце в асинхронному двигуні?
2. Чому магнітні втрати в сердечнику ротора не враховують?
3. На які види втрат впливають величина повітряного зазору і товщина пластин сердечника статора?
4. Енергетична діаграма активної потужності асинхронного двигуна – фізичний зміст і розрахунок постійних і змінних втрат.
5. ККД асинхронного двигуна – виведення формули, залежності ККД від навантаження, максимальний ККД і його залежність від співвідношення між постійними і змінними втратами.
6. Виведення формули електромагнітного моменту асинхронної машини й аналіз його значення від параметрів живильної мережі й обмоток статора і ротора.
7. Механічна характеристика асинхронної машини і її обґрунтування.
8. Максимальний і пусковий моменти асинхронного двигуна і їхня залежність від напруги, частоти мережі й активного опору в колі ротора; перевантажувальна здатність двигуна.
9. Порівняння значень пускового моменту асинхронних двигунів з фазним і короткозамкнутим роторами.
10. Пояснити вид робочих характеристик асинхронного двигуна.

Глава 11. Кругові діаграми асинхронної машини

11.1 Поняття кругової діаграми асинхронної машини

Розглянуті раніше робочі характеристики можуть бути отримані розрахунковим шляхом. В основі цього розрахунку лежить використання кругової діаграми асинхронної машини. Раніше (§9.3), при розгляді T - образної схеми заміщення асинхронної машини, було встановлено, що струм обмотки статора визначається по виразу

$$\dot{I}_1 = \dot{U}_1 \frac{Z_m + Z'_2}{Z_1 Z_m + Z'_2 (Z_1 + Z_m)} \quad (11.1)$$

В загальному виді цей вираз можна представити у такий спосіб: з огляду на, те що Z_1 і Z_m не залежать від ковзання S , а опір $Z'_2 = r'_2 + jx'_2 S$ – залежить від ковзання S

$$\dot{I}_1 = \frac{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 S}{\dot{U}_1 + \dot{U}_2 S} \quad (11.2)$$

Тут прийнято $U_1 = const.$

З теорії змінних струмів відомо, що рівняння такого виду при $S = var$ представляє коло. Таким чином, геометричне місце кінця вектора струму статора $\dot{I}_1$ при зміні ковзання асинхронного двигуна представляє окружність. Це має місце тільки для асинхронних двигунів з одинарною “білячою” кліткою, у якій параметри схеми заміщення не змінюються при зміні значення струмів. В двокліткових і глибокопазних асинхронних двигунів геометричне місце кінця вектора струму $\dot{I}_1$ при $S = var$ не є окружністю, а представляє криву більш високого порядку.

Круговою діаграмою асинхронної машини називають геометричне місце кінця вектора струму $\dot{I}_1$ при $S = var$, із усіма додатковими побудовами, необхідними для розрахунку робочих характеристик.

В приведеному виразі (5.1) в знаменнику представлений еквівалентний опір схеми заміщення. Таким чином, кругова діаграма асинхронної машини заснована на використанні схеми заміщення. В тому випадку, коли за основу прийнята **T - образна** чи точна **Γ - образна** схема заміщення, кругова діаграма називається **точною**. Якщо за основу прийнята уточнена Γ - образна схема заміщення, кругова діаграма називається **уточненою**. Найбільш простою по побудові є спрощена кругова діаграма, у якій за основу прийнята спрощена Γ - **образна** схема заміщення.

11.2 Обґрунтування спрощеної кругової діаграми асинхронного двигуна

Зі спрощеної Γ -*образної* схеми заміщення асинхронного двигуна випливає, що співвідношення між струмами цієї схеми записуються у виді:

$$\dot{I}_1 = \dot{I}_{00} + (-\dot{I}_2'') . \quad (11.3)$$

Звідси випливає, що для того, щоб одержати діаграму струму $\dot{I}_1$, необхідно розглянути діаграму струму намагнічуючого контуру $\dot{I}_{00}$, і діаграму струму головного кола $(-\dot{I}_2'')$ при зміні ковзання S .

Струм намагнічуючого контуру, визначається по виразу:

$$\dot{I}_{00} = \frac{\dot{U}_1}{Z_1 + Z_m} . \quad (11.4)$$

В цьому виразі при $U_1 = const$ опори Z_1 і Z_m не залежать від значення ковзання S . Таким чином, діаграма струму не змінюється при зміні ковзання асинхронного двигуна і може бути представлена в наступному виді (рис. 11.1).

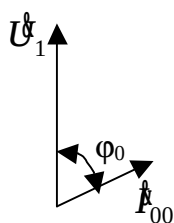


Рис. 11.1. Векторна діаграма для кола намагнічування асинхронного двигуна

Струм головного контуру $\dot{I}_2''$, згідно схеми заміщення асинхронного двигуна, визначається за виразом:

$$-\dot{I}_2'' = \frac{\dot{U}_1}{\left(r_1 + \frac{r_2'}{S}\right) + j(x_1 + x_2')} \quad (11.5)$$

Діаграма струму головного контуру при зміні ковзання являє собою коло з діаметром $U_1/(x_1 + x_2')$. Тому її можна представити у такий спосіб (рис. 11.2).

Будь-яка точка “ D ”, взята на колі, відповідає деякому значенню струму I_2'' при визначеному значенні ковзання S .

Характерними точками на діаграмі є:

- 1) точка “ O ”, що відповідає значенню ковзання $S=0$;
- 2) точка “ K ”, що відповідає значенню ковзання $S = 1$; відрізок OK розташовується стосовно вектора напруги U_1 під кутом

$$j_K = \arctg \frac{x_1 + x_2'}{r_1 + r_2'} .$$

- 3) точка “ T ”, що відповідає значенню ковзання $S = \pm \infty$; відрізок OT розташовується стосовно вектора напруги під кутом

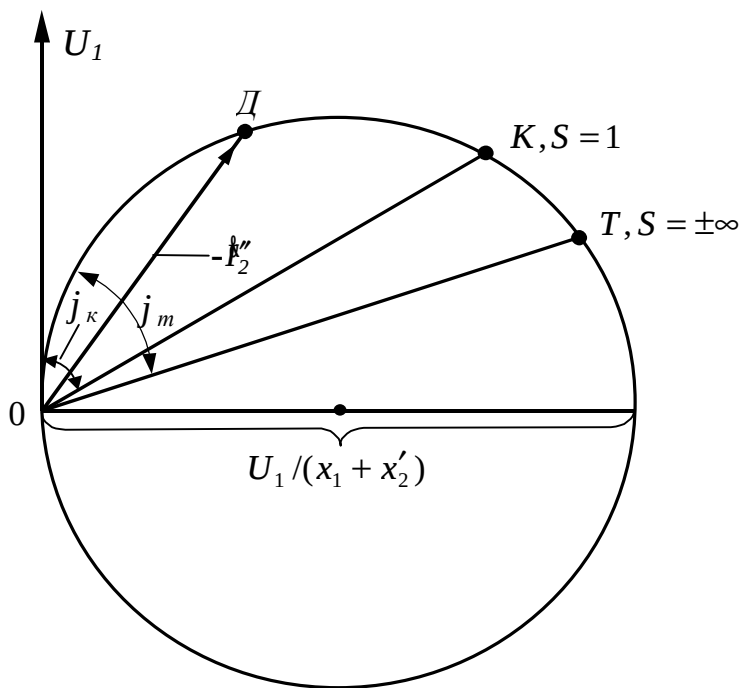


Рис. 11.2 Векторна діаграма для головного контуру асинхронного двигуна

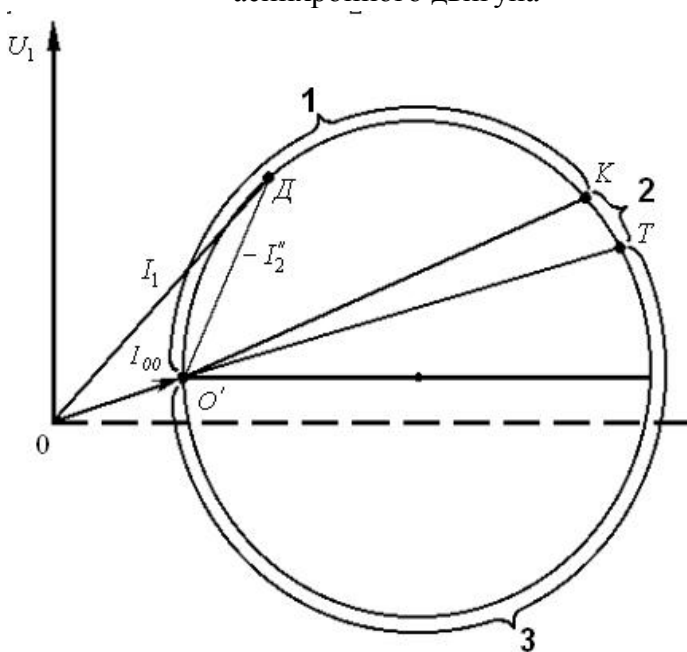


Рис. 11.3 Спрощена кругова діаграма асинхронного двигуна: 1 – режим двигуна; 2 – режим електромагнітного гальмування; 3 – генераторний режим.

$$j_T = \arctg \frac{x_1 + x'_2}{r_1}.$$

Для того, щоб одержати діаграму струму $\dot{I}_1$, необхідно поєднати діаграми струмів $\dot{I}_{00}$ (рис. 11.1) і $(-\dot{I}_2'')$ (рис. 11.2).

Деякі точки D , взятій на круговій діаграмі, відповідає значення струму статора I_1 при визначеному значенні ковзання S_1 .

Нанесемо на діаграму (рис. 11.3) точки:

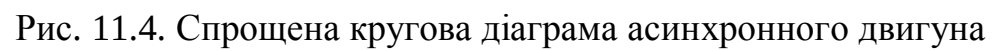
$$\begin{aligned} O', S &= 0; \\ K, S &= 1; \\ T, S &= \pm\infty. \end{aligned}$$

Отримана діаграма визначає всі режими роботи асинхронної машини:

- режим двигуна
 $1 \leq S < 0;$
- генераторний режим
 $- \infty < S < 0;$
- режим електромагнітного гальма
 $1 \leq S < + \infty$

11.3 Розрахунок робочих характеристик асинхронного двигуна по спрощеній круговій діаграмі

Розглянемо розрахунок характеристик, заснованих на використанні спрощеної кругової діаграми асинхронної машини. Кругова діаграма представлена на рис. 11.4



а. Потужність, що підводиться P_1 ,

$$P_1 = m_1 U_1 I_1 \cos j_1, \quad (11.6)$$

де m_1 – число фаз обмотки статора.

При незмінній напрузі, що підводиться $U_1 = \text{const}$

$$P_1 \sim I_1 \cos j_1,$$

тобто

$$P_1 \sim I_{1a},$$

де I_{1a} – активна складова струму статора.

Розглянемо деяку точку “Д”, взятую на круговій діаграмі. Цій точці відповідає конкретне значення струму статора I_1 .

$$I_{1a} = Da \cdot m_1,$$

де m_1 – масштаб струму.

Звідси випливає, що для точки “Д”, тобто при деякій значенні ковзання S

$$P_1 \sim Da \cdot m_1,$$

або

$$P_1 = m_1 U_1 Da m_1 = Da \cdot m_p, \quad (11.7)$$

де $m_p = m_1 U_1 m$ – масштаб потужності.

Таким чином, вісь абсцис, що визначає значення P_1 , є лінією підведеної потужності і позначається $P_1 = 0$.

б. Електромагнітна потужність P_{em}

$$P_{em} = m_1 \left(I_2' \right)^2 \frac{r_2'}{S}. \quad (11.8)$$

З теорії змінного струму відомо, що якщо геометричне місце кінця вектора струму є колом, то лінія потужності являє собою лінію проведену через такі дві точки на колі, в яких ця потужність дорівнює нулю.

Електромагнітна потужність дорівнює нулю при наступних значеннях ковзання:

1. При $S = 0$ (точка $O\phi$), оскільки при синхронному ході асинхронної машини $I_2' = 0$.

2. При $S = \text{¥}$ (точка T), що впливає безпосередньо з виразу (11.8).

Таким чином, лінія $O\text{€}T$ є лінією електромагнітної потужності і позначається $P_{em} = 0$.

Для деякої точки “ D ”, взятої на круговій діаграмі

$$P_{em} = D\text{€} \cdot m_p . \quad (11.9)$$

Електромагнітний момент

$$M_{em} = P_{em} / w_1 .$$

Так як $w_1 = \text{const}$, то звідси випливає, що $M_{em} = 0$.

Отже, лінія $O\text{€}T$ є одночасно і лінією електромагнітного моменту і позначається $M_{em} = 0$.

З огляду на це, для точки “ D ”

$$M_{em} = D\text{€} \cdot m_p / w_1 = D\text{€} \cdot m_M , \quad (11.10)$$

де $m_M = m_p / w_1$ – масштаб моменту.

в. Повна механічна потужність P_{mx}

$$P_{mx} = m_1 \left(I_2' \right)^2 \cdot r_2' \cdot \frac{1-S}{S} . \quad (11.11)$$

Точки, у яких повна механічна потужність дорівнює нулю, наступні:

1. При $S = 0$ (точка $O\text{€}$), оскільки при синхронному ході асинхронної машини $I_2\text{€} = 0$.

2. При $S = 1$ (точка K), що впливає безпосередньо з виразу (5.11).

Звідси випливає, що лінія $O\text{€}K$ є лінією повної механічної потужності і позначається $P_{mx} = 0$. Для деякої точки “ D ”

$$P_{mx} = D\text{€} \cdot m_p .$$

г. Втрати синхронного ходу P_{00}

$$P_{00} = m_1 I_{00} U_1 \cos j_0 \sim I_{00} \cos j_0 , \quad (11.12)$$

$$P_{00} = O'O'' m_p . \quad (11.13)$$

При синхронному ході асинхронної машини мають місце, головним чином, магнітні втрати. Тому можна записати:

$$P_{00} = P_{m.1} .$$

На спрощеній векторній діаграмі $p_{м.1}$ приймаються незалежними від частоти обертання асинхронної машини, тобто для деякої точки “Д”

$$p_{м.1} = ad \cdot m_p = O'O''m_p. \quad (11.14)$$

д. Електричні втрати ($p_{e.1} + p_{e.2}$)

З енергетичної діаграми випливає, що

$$P_{мх} = P_1 - P_{м.1} - (P_{e.1} + P_{e.2}). \quad (11.15)$$

Звідси

$$(P_{e.1} + P_{e.2}) = P_1 - P_{мх} - P_{м.1}.$$

Таким чином, для деякої точки “Д”

$$(P_{e.1} + P_{e.2}) = (Da - Dc - ad).$$

З енергетичної діаграми електричні втрати в роторі можна виразити у такий спосіб:

$$P_{e.2} = P_{ем} - P_{мх}.$$

Для деякої точки “Д”

$$P_{e.2} = (Dв - Dc) m_p = cv^x m_p. \quad (11.16)$$

Відповідно для цієї точки

$$P_{e.1} = (cd - vc) m_p = vd^x m_p. \quad (11.17)$$

Розглянемо, яким чином визначається положення точки “Т” на круговій діаграмі. Експериментально одержати значення струму статора при ковзанні $S = \pm \infty$ не представляється можливим.

Тому положення цієї точки на круговій діаграмі визначається по співвідношенню відрізків

$$\frac{\kappa_1 \kappa_2}{\kappa_1 \kappa} = \frac{P_{e.1}}{P_{e.к}} = \frac{m_1 \left(I_2' \right)^2 \cdot r_1}{m_1 \left(I_2' \right)^2 \cdot r_к} = \frac{r_1(75^\circ C)}{r_к(75^\circ C)}. \quad (11.18)$$

е. Механічні і додаткові втрати ($P_{мх} + P_d$)

При реальному холостому ході асинхронної машини зі значенням струму статора I_0 , в асинхронній машині мають місце втрати холостого ходу

$$P_0 = P_{mx} + P_\partial. \quad (11.19)$$

Щоб визначити ці втрати по круговій діаграмі, необхідно відкласти вектор струму реального холостого ходу $\dot{I}_0$. Цей вектор розташований вище вектора струму синхронного холостого ходу $\dot{I}_{00}$.

Для деякої точки “Д” при конкретному значенні ковзання асинхронного двигуна

$$P_{mx} + P_\partial = cf \cdot m_p. \quad (11.20)$$

ж. Потужність, що корисно віддається P_2

З енергетичної діаграми випливає, що сумарні втрати асинхронного двигуна

$$\dot{a}P = P_{m,1} + (P_{e,1} + P_{e,2}) + P_{mx} + P_\partial.$$

Для деякої точки “Д”

$$\dot{a}P = af m_p. \quad (11.21)$$

З огляду на те, що $P_2 = P_1 - \dot{a}P$ для розглянутої точки “Д” знаходимо

$$P_2 = (Da - af) m_p = Df m_p. \quad (11.22)$$

Таким чином, лінія НК визначає рівень потужності P_2 і є лінією потужності, що корисно віддається, $P_2 = 0$.

з. Коефіцієнт корисної дії h

Коефіцієнт корисної дії асинхронного двигуна можна одержати безпосередньо з кругової діаграми

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

Отже, для деякої точки “Д” ККД дорівнює

$$h = \frac{Df \cdot m_p}{Da \cdot m_p} = \frac{Df}{Da}. \quad (11.23)$$

Однак, при побудові робочих характеристик користуються шкалою ККД, що будується у такий спосіб:

а) лінія KO продовжується вправо вгору до перетину з віссю абсцис в точці L ;

б) проводиться пряма через точку L ($h = 100\%$) паралельно осі ординат, вона представляє лінію $\dot{a}P = 0$;

в) вище кола струмів паралельно осі абсцис між лініями

$\dot{a}P = 0$ і $P_2 = 0$ проводиться пряма таким чином, щоб відрізок зручно поділявся на десять рівних частин.

Для визначення значення ККД у точці “Д” проводиться пряма LD до перетину зі шкалою ККД. Точка перетину визначає значення коефіцієнта корисної дії.

и. Коефіцієнт потужності асинхронного двигуна $\cos j_1$

Для розрахунку $\cos j_1$ користуються шкалою, що будується у такий спосіб: на осі ординат відкладається відрізок, що зручно поділяється на десять частин. На цьому відрізку, як на радіусі, будується допоміжна четверть кола.

Для визначення $\cos j_1$ необхідно знайти перетин вектора струму $\dot{I}_1$, або його продовження, із зазначеною четвертю кола. Проекція цієї точки перетину на вісь ординат дає значення $\cos j_1$.

к. Ковзання асинхронного двигуна S

Ковзання асинхронного двигуна можна визначити безпосередньо з кругової діаграми, використовуючи залежність

$$S = \frac{P_{e.2}}{P_{em}}. \quad (11.24)$$

Отже, для деякої точки “Д”

$$S = \frac{вс}{Дв}. \quad (11.25)$$

Однак, при розрахунку робочих характеристик користаються шкалою ковзань. Вона будується у такий спосіб:

а) проводиться пряма через точку O ($S = 0$) паралельно осі ординат, вона представляє лінію електричних втрат у роторі $P_{e.2} = 0$;

б) проводиться відрізок між лініями $P_{e.2} = 0$ і $P_{mx} = 0$, причому цей відрізок повинний бути паралельним лінії $P_{em} = 0$ і зручно поділитися на сто частин.

Для визначення значення ковзання необхідно знайти точку перетину вектора $(-\dot{I}_2)$ або його продовження зі шкалою ковзання. Точка перетину визначає значення ковзання.

л. Перевантажувальна здатність асинхронного двигуна k_m

Раніше було визначено, що

$$\kappa_M = \frac{M_{em.max}}{M_n}.$$

Нехай на круговій діаграмі точка “Д” відповідає номінальному режиму роботи асинхронного двигуна, тобто

$$I_1 = I_{1n}.$$

Тоді

$$M_n = D \cdot \epsilon \cdot M_M, \quad (11.26)$$

де M_M – масштаб моменту.

Для того, щоб визначити значення $M_{em.max}$, необхідно з центра кола, тобто з точки G опустити перпендикуляр на лінію $M_{em} = 0$ до перетину з колом струмів у точці G^ℓ . З точки G^ℓ опустити перпендикуляр на вісь абсцис і в точці “ ϵ ” одержимо відрізок пропорційний $M_{em.max}$.

$$M_{em.max} = G^\ell \cdot y^\ell \cdot m_M. \quad (11.27)$$

У такий спосіб

$$\kappa_M = G^\ell \cdot y^\ell / D \cdot \epsilon. \quad (11.28)$$

При розрахунку робочих характеристик необхідно знайти значення S , $\cos j$, h , M_{em} для ряду значень потужності P_2 . Як правило, приймають наступні значення потужності P_2 : 0; 0,25 P_n ; 0,5 P_n ; 0,75 P_n ; 1,0 P_n ; 1,25 P_n .

Якщо точка D на окружності струмів відповідає номінальному режиму роботи асинхронного двигуна, то відрізок $D\epsilon$ розбивають на зазначені вище співвідношення, і отримані точки зносять на окружність струмів паралельно лінії $P_{em} = 0$.

Для точок, отриманих на окружності струмів відповідно часткам P_n , знаходимо значення величин, необхідних для побудови робочих характеристик.

11.4 Побудова кругової діаграми по експериментальним даним

Як правило, при розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна, спрощена кругова діаграма будується за даними експериментів холостого ходу і короткого замикання.

Дослід холостого ходу виконують при $U_1 = U_{1n}$ і $f_1 = 50$ Гц.

З урахуванням схеми з'єднання обмоток статора визначають:

$U_{1\phi}$ – фазне значення підведеної напруги;

$I_{0\phi}$ – фазне значення струму холостого ходу;

P_0 – потужність холостого ходу.

Обчислюють:

$$\cos j_0 = \frac{P_0}{3U_{1\phi}I_{0\phi}} - \text{коефіцієнт потужності при холостому ході.}$$

Дослід короткого замикання виконують при зниженій напрузі, щоб виключити перегрів обмоток.

З урахуванням схеми з'єднання обмоток статора визначають:

$U_{1\kappa\phi}$ – фазне значення підведеної напруги;

$I_{1\kappa\phi}$ – фазне значення струму обмотки статора при короткому замиканні;

P_κ – потужність короткого замикання.

Визначають:

$$\cos j_\kappa = \frac{P_\kappa}{3U_{1\kappa\phi}I_{1\kappa\phi}} - \text{коефіцієнт потужності при короткому замиканні;}$$

$$I_{1\kappa\phi} = \frac{U_{1\phi}}{U_{1\kappa\phi}} \cdot I_{1\phi} - \text{струм короткого замикання, приведений до номінальної напруги;}$$

$$r_\kappa = \frac{P_\kappa}{3I_{1\kappa\phi}^2} - \text{активний опір короткого замикання.}$$

По отриманим даним побудову спрощеної кругової діаграми виконують в наступній послідовності:

- 1) будується прямокутна система координат, а по осі ординат у довільному масштабі – вектор $U_{1\phi}$;
- 2) вибирається масштаб струму m_1 і під кутом j_0 відносно вектора напруги $U_{1\phi}$ відкладається вектор струму холостого ходу $I_{0\phi}$, а під кутом j_κ вектор струму ($I_{1\kappa\phi}$);
- 3) з'єднуються кінці векторів $I_{0\phi}$ (точка O') і $I_{1\kappa\phi}$ (точка K). Відрізок $O'K$ поділяється навпіл і з його середини будується перпендикуляр до перетину з лінією, що проходить через точку O' паралельно осі абсцис (точка G). Точка G є центром кола струмів;
- 4) радіусом рівним GK чи GO' проводиться окружність;
- 5) для знаходження положення точки T ($S = \pm \%$), визначаємо співвідношення відрізків

$$\frac{\kappa_{1K2}}{\kappa_{1K}} = \frac{r_1(75^\circ C)}{r_\kappa(75^\circ C)}.$$

- 6) виконується розрахунок робочих характеристик асинхронного двигуна за методикою, викладеної раніше, використовуючи спрощену кругову діаграму.

Зауваження: на спрощеній круговій діаграмі, побудованій по експериментальним даним, відсутня точка синхронного ходу, тобто не будується вектор

струму I_{00} . Отже, на цій круговій діаграмі нехтують механічними і додатковими втратами:

$$P_{mx} + P_{\partial} = 0.$$

Тому лінія $O\ell K$ буде одночасно як лінією $P_2 = 0$, так і лінією $P_{mx} = 0$.

11.5 Уточнена кругова діаграма

При розрахунку робочих характеристик для асинхронних двигунів малої потужності використовують уточнену кругову діаграму (рис. 11.5). Вона відрізняється від розглянутої раніше спрощеної кругової діаграми (рис. 11.4) тим, що точка G лежить на прямій, поверненій проти годинникової стрілки на кут α стосовно прямої, що проходить через точку $O\ell$ паралельно осі абсцис.

Кут α визначається за виразом:

$$\alpha = \arctg \frac{I_0 r_1}{U_{1H}} \quad (11.29)$$

З приведенного виразу для кута α очевидно, що уточнена кругова діаграма має сенс тільки для асинхронних двигунів малої потужності (до 10 кВт), у яких значення струму холостого ходу I_0 велике і значна величина активного опору обмотки статора r_1 (оскільки вона виконана тонким проводом).

Зауваження: для точки D $P_{em} = D e^{\phi} m_p$.

11.6 Аналітичний метод розрахунку робочих характеристик асинхронних двигунів

Розглянутий графічний метод розрахунку робочих характеристик асинхронних двигунів із застосуванням кругової діаграми має істотний недолік – необхідність побудови цієї діаграми і неминучу неточність як при побудові, так і при її наступному використанні, зв'язаній з додатковими побудовами, вимірами відрізків і т.п. Аналітичний метод розрахунку робочих характеристик не передбачає яких-небудь графічних зображень і вимірів, а деяке збільшення обсягу математичних обчислень за умови застосування найпростішої обчислювальної техніки не викликає ніяких труднощів.

Аналітичний метод розрахунку заснований на схемі заміщення асинхронного двигуна (рис. 9.7 при $C_1 = 1$ – спрощена схема заміщення). Вихідними при цьому є паспортні дані двигуна (P_n , U_{1H} , n_n) і результати виконання дослідів холостого ходу і короткого замикання (див. § 11.4).

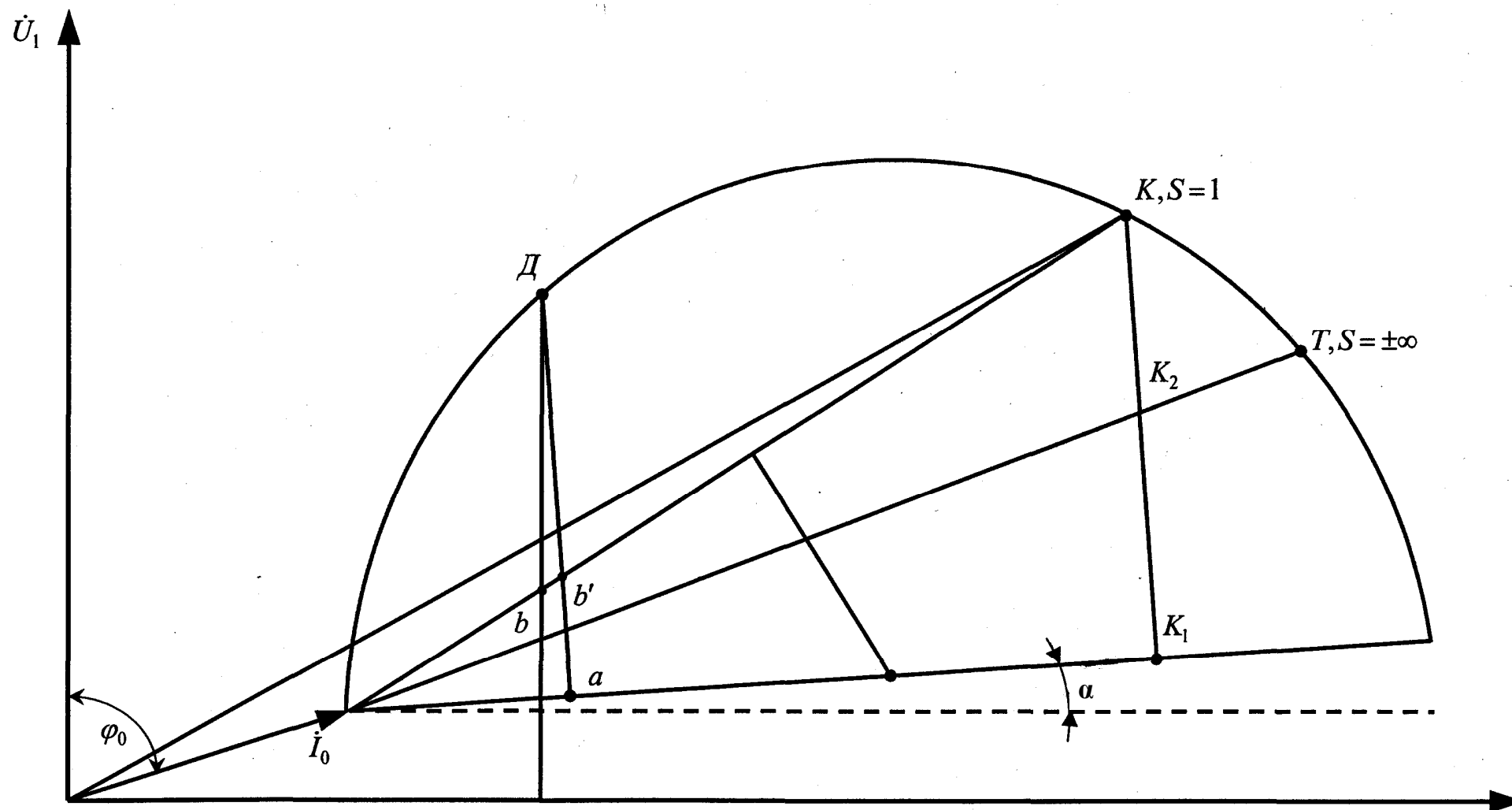


Рис. 11.5. До побудови уточненої кругової діаграми асинхронного двигуна

Розрахунок ведуть в наступному порядку:

Визначають приведений активний опір обмотки ротора (Ом)

$$r'_2 = r_k - r_1, \quad (11.30)$$

критичне ковзання

$$S_m \approx r'_2 / x_k, \quad (11.31)$$

іномінальне ковзання

$$S_n = (n_1 - n) / n_1. \quad (11.32)$$

Задавшись рядом значень ковзання (всього 6-7 значень, в тому числі номінальне S_n і критичне S_m), визначають необхідні для побудови робочих характеристик величини.

Еквівалентний активний опір, (Ом)

$$r_{ек} = r_1 + r'_2 / S. \quad (11.33)$$

Еквівалентний повний опір робочого (головного) контуру схеми заміщення (Ом)

$$Z_{ек} = \sqrt{r_{ек}^2 + x_k^2}. \quad (11.34)$$

Коефіцієнт потужності робочого контуру схеми заміщення

$$\cos j_2 = r_{ек} / Z_{ек}. \quad (11.35)$$

Приведений струм ротора (А)

$$I'_2 = U_1 / Z_{ек} \quad (11.36)$$

і його активна і реактивна складові (А)

$$I'_{2a} = I'_2 \cos j_2; \quad (11.37)$$

$$I'_{2p} = I'_2 \sin j_2. \quad (11.38)$$

Активна і реактивна складові струму статора (А)

$$I_{1a} = I_{oa} + I'_{2a}; \quad (11.39)$$

$$I_{1p} = I_{0p} + I'_{2p}. \quad (11.40)$$

Тут $I_{oa} = I_o \cos j_0$ - активна складова струму холостого ходу; $I_{op} = I_o \sin j_2$ - реактивна складова цього струму.

Струм в обмотці статора, (А)

$$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}. \quad (11.41)$$

Коефіцієнт потужності двигуна

$$\cos j_1 = I_{1a} / I_1. \quad (11.42)$$

Електричні втрати в обмотці статора (Вт)

$$P_{e1} = m_1 I_1^2 \cdot r_1. \quad (11.43)$$

Електромагнітну потужність (Вт)

$$P_{em} = P_1 - (P_m + P_{e1}). \quad (11.44)$$

Магнітні втрати (Вт)

$$P_m = P'_0 - P_{mx}, \quad (11.45)$$

де $P'_0 = P_m + P_{mx} = P_0 - m_1 I_0^2 r_1$.

Електромагнітний момент (Н · м)

$$M_{em} = P_{em} / \omega_1. \quad (11.46)$$

Електричні втрати в роторі (Вт)

$$P_{e2} = S P_{em}. \quad (11.47)$$

Додаткові втрати (Вт)

$$P_o = 0,005 P_1. \quad (11.48)$$

При розрахунку додаткових втрат при номінальній потужності

$$P'_0 = P_0 b^2, \quad (11.49)$$

де $b = I_1 / I_{1n}$ - коефіцієнт навантаження.

Корисна потужність двигуна (Вт)

$$P_2 = P_{em} - (P_{e2} + P_{mx} + P_0), \quad (11.50)$$

де P_{mx} – механічні втрати, Вт; їх визначають з досліду холостого ходу (якщо графік $P'_0 = f(U)$ продовжити до перетину з віссю ординат ($U_1 = 0$), то одержимо величину втрат (P_{mx}).

Коефіцієнт корисної дії

$$h = P_2 / P_1 = 1 - \Sigma P / P_1. \quad (11.51)$$

Частота обертання (об/хв)

$$n = n_1 (1 - S). \quad (11.52)$$

Корисний момент (момент на валу) двигуна (Н · м)

$$M_2 = 9,55 P_2 / n. \quad (11.53)$$

Результати розрахунків зводять в таблицю, а потім будують робочі характеристики.

При проектуванні асинхронних двигунів розрахунок робочих характеристик виконують на підставі схеми заміщення рис. 9.7. При цьому повинні бути

відомі: $r_1; r'_2; x_1; x'_2; x_m; c_1 \approx 1 + \frac{x_1}{x_m}; I_{c.p} \approx I_m; I_{c.a} \approx \frac{P_{m1} \cdot 10^3 + 3I_m^2 r_1}{3U_1}$ (реактивна й

активна складові струму при синхронній частоті обертання); магнітні втрати в статорі P_{m1} ; пульсаційні і поверхневі втрати в зубцях статора і ротора P_{m0} ; механічні втрати P_{mx} .

Розрахунки рекомендується робити в порядку, зазначеному в табл. 11.1.

Таблиця 11.1

Розрахунки для визначення робочих характеристик

№ п/п	Формули	Од. вим.	S ₁	S ₂	...	S _n
1	$c_1^2 r'_2 / S$	Ом				
2	$R = c_1 r_1 + c_1^2 r'_2 / S$	Ом				
3	$X = c_1 x_1 + c_1^2 x'_2$	Ом				

№ п/п	Формули	Од. вим.	S ₁	S ₂	...	S _n
4	$Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	Ом				
5	$\cos j_2' = R / Z$	—				
6	$\sin j_2' = X / Z$	—				
7	$I_2'' = U_1 / Z$	А				
8	$I_2' = c_1 I_2''$	А				
9	$I_{1a} = I_{c.a} + I_2'' \cos j_2'$	А				
10	$I_{1p} = I_{c.p} + I_2'' \sin j_2'$	А				
11	$I_1 = \sqrt{I_{1a}^2 + I_{1p}^2}$	А				
12	$\cos j_1 = I_{1a} / I_1$	—				
13	$P_1 = 3U_1 I_{1a} \cdot 10^{-3}$	кВт				
14	$P_{e1} = 3I_1^2 r_1 \cdot 10^{-3}$	кВт				
15	$P_{e2} = 3I_2'^2 r_2' \cdot 10^{-3}$	кВт				
16	$P_0'' = P_{m1} + P_{md} + P_{mx}$	кВт				
17	$P_{доб} = 0,005 P_{1н} (I_1 / I_{1н})^2$	кВт				
18	$\sum P = P_{e1} + P_{e2} + P_0'' + P_{доб}$	кВт				
19	$h = 1 - \sum P / P_1$	—				
20	$P_2 = P_1 - \sum P$	кВт				

При розрахунках по приведеним у таблиці формулам потрібно задаватися значеннями ковзання приблизно в межах $S = (0,2 \div 1,3) S_n$.

Контрольні питання

1. Які існують методи одержання даних для побудови робочих характеристик асинхронних двигунів?
2. Чим обмежується застосування методу безпосереднього навантаження?
3. Поняття кругової діаграми асинхронної машини.
4. Поняття точної кругової діаграми асинхронної машини.
5. Поняття уточненої кругової діаграми асинхронної машини.
6. Поняття спрощеної кругової діаграми і її обґрунтування.
7. Порядок побудови кругової діаграми по дослідним даним.
8. На чому заснований аналітичний метод розрахунку робочих характеристик асинхронного двигуна?

Глава 12. Пуск і регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів

12.1 Загальні відомості

Пускові властивості асинхронних двигунів, як і інших типів електричних двигунів, оцінюють за наступними показниками:

1. Кратність пускового струму I_n/I .
2. Кратність пускового моменту $\frac{M_n}{M_n}$.
3. Тривалість пуску t_n [с.].
4. Економічність пускової операції, з погляду витрат на устаткування й експлуатаційні витрати.

Ці показники залежать від двох факторів:

- 1) від конструкції, тобто типу двигуна;
- 2) від способу пуску.

Вплив конструкції на показники пуску виявляються в наступному:

- асинхронний двигун з фазним ротором має гарні показники пуску, оскільки введення активного опору в коло ротора забезпечує малі пускові струми і великий пусковий момент;

- асинхронні двигуни з короткозамкнутим ротором поступаються у цьому відношенні двигунам з фазним ротором. Однак вони є більш дешевими у виробництві і більш надійними в експлуатації.

Вплив способів пуску на перераховані вище показники розглянемо нижче.

12.2 Пуск двигунів з фазним ротором

Поліпшити перераховані вище показники пуску, це значить – зменшити пускові струми I_n і збільшити пусковий момент M_n . Для двигуна з фазним ротором зменшити пускові струми можна включенням в контур обмотки ротора активного або реактивного опору, тому що пусковий струм двигуна без додаткових опорів в контурі обмотки ротора

$$I_{n.дв} = \frac{U_{n.д}}{Z_k}, \quad (12.1)$$

де $z_k = \sqrt{r_k^2 + x_k^2}$ - опір короткого замикання асинхронного двигуна.

Однак, включення реактивного опору в контур обмотки ротора зменшує значення пускового моменту M_n . Тому єдиним способом пуску асинхронного двигуна з фазним ротором є реостатний пуск, що припускає, що при пуску двигуна в контур обмотки його ротора включається активний опір пускового реостата R_n .

Значення цього опору вибирається таким, щоб при пуску двигун розвивав максимальний електромагнітний момент

$$M_n = M_{em.max}.$$

Це буде мати місце за умови, що

$$S_m = \frac{R_2 + R_n}{X_k} = 1.0. \quad (12.2)$$

Принципова схема пуску асинхронного двигуна з фазним ротором представлена на рис. 12.1, а.

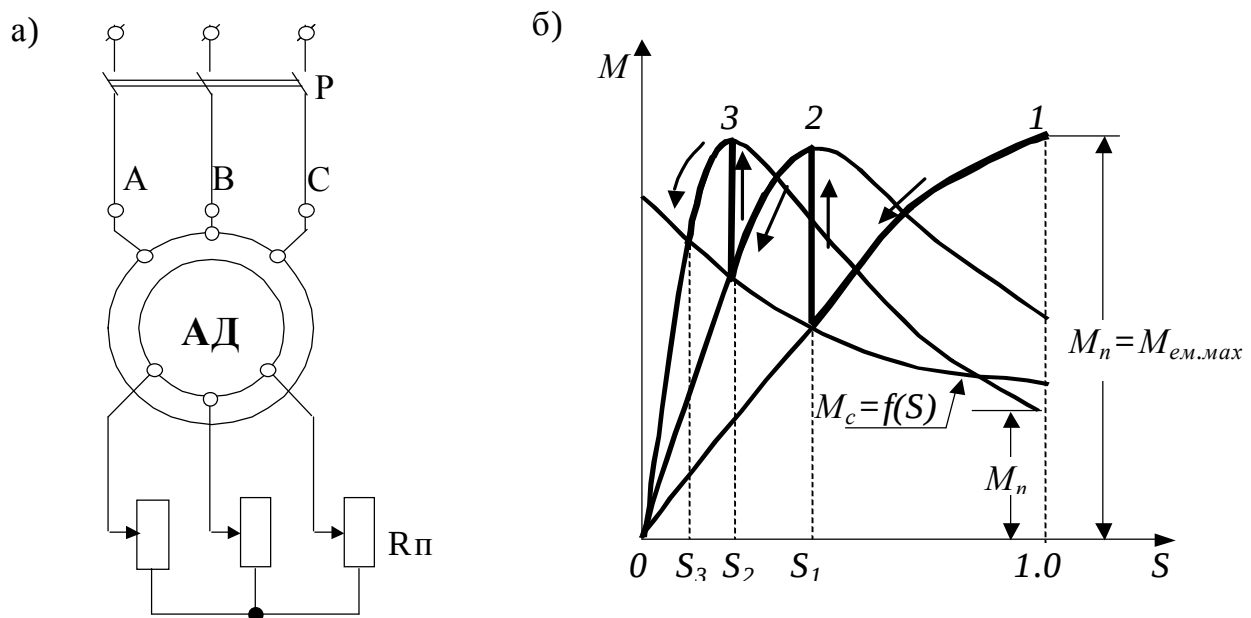


Рис. 12.1 Схема включення (а) і графіки пускового моменту (б) асинхронного двигуна з фазним ротором

Розглянемо процес пуску асинхронного двигуна з фазним ротором, використовуючи штучні механічні характеристики рис. 12.1, б, розглянуті раніше. При вмиканні рубильника P в колі обмотки ротора ввімкнений повний опір пускового реостата. При цьому двигун розганяється по штучній механічній характеристиці „1”, розвиваючи максимальний пусковий момент.

Стала частота обертання асинхронного двигуна при розгоні по штучній механічній характеристиці „1” визначається рівновагою обертового моменту двигуна M_{em} і гальмового моменту, створюваного навантаженням M_c .

Залежність $M_c = f(S)$ визначається типом робочого механізму. Тому цю залежність приводимо у виді деякої типової кривої.

Рівність $M_{em} = M_c$ визначає значення ковзання S_1 на штучній механічній характеристиці „1”.

Після досягнення двигуном сталої частоти обертання на характеристиці „1”, проводиться вимкнення однієї ступені пускового реостата. При цьому дви-

гун переходить на штучну механічну характеристику „2”, тобто його момент практично миттєво збільшується.

Штучна механічна характеристика „2” визначається величиною опору пускового реостата, що залишився, в колі обмотки ротора.

Стала частота обертання двигуна на характеристиці „2” визначається значенням ковзання S_2 , що виходить при перетинанні штучної механічної характеристики „2” з характеристикою $M_c = f(S)$. Пуск двигуна закінчується, коли цілком вимкнений опір пускового реостата і контур обмотки ротора закорочується накоротко. При цьому двигун виходить на природну механічну характеристику. Стала частота обертання двигуна на природній механічній характеристиці визначається ковзанням S_3 . На цій характеристиці M_n менше M_c . Це означає, що якби асинхронний двигун запускався при закороченому роторі, тобто без пускового реостата, то він не зміг би розігнатися.

Пускові реостати асинхронних двигунів з фазним ротором випускаються з металевими ступенями опорів. Однак асинхронні двигуни великої потужності запускаються за допомогою рідинних реостатів. При цьому забезпечується плавний пуск цих двигунів, оскільки число ступенів опорів у цих реостатів дорівнює нескінченності.

12.3 Пуск двигунів з короткозамкнутим ротором

Ці двигуни запускаються при повній або зниженій напрузі. В залежності від того, яким способом забезпечується зниження напруги, розрізняють ряд способів пуску асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором.

а) пряме вмикання в мережу

Принципова схема і графіки зміни струму і моменту при пуску представлені на рис. 12.2.

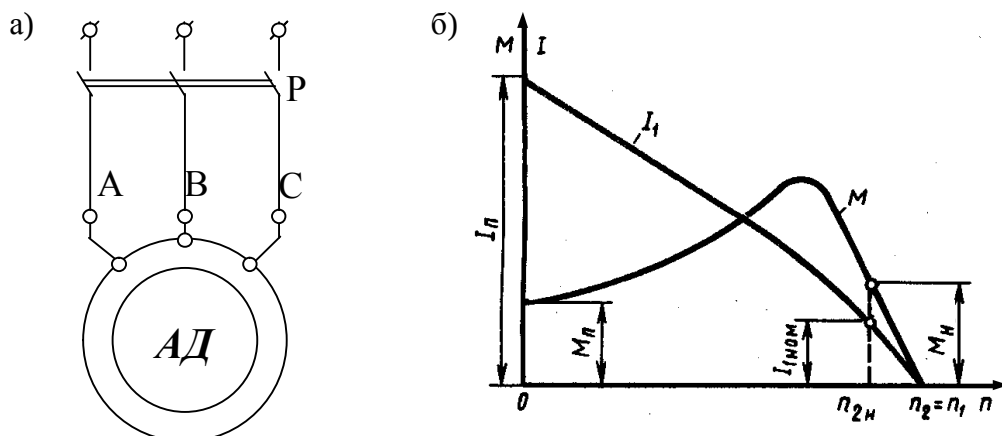


Рис. 12.2 Схема прямого вмикання в мережу (а) і графіки зміни струму і моменту при пуску (б) асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором

Цей спосіб пуску відрізняється економічністю, тому що не вимагає спеціального пускового устаткування. Однак, він має істотний недолік: в момент вмикання в мережу мають місце значні пускові струми. Якщо $U_{ф.д.} = U_m$, то

$$I_n = \frac{U_m}{Z_K},$$

Цим способом як правило, запускаються двигуни до 100 кВт, у яких

$$\frac{I_n}{I_n} = 5 \div 6.$$

Однак, з ростом потужності живильних мереж в даний час, запускаються двигуни вже і більшої потужності.

б) реакторний пуск

При цьому способі пуску в момент вмикання двигуна в мережу в кожен фазу обмотки статора вмикаються індуктивні опори (реактори). Принципова схема цього способу пуску представлена на рис. 12.3, а.

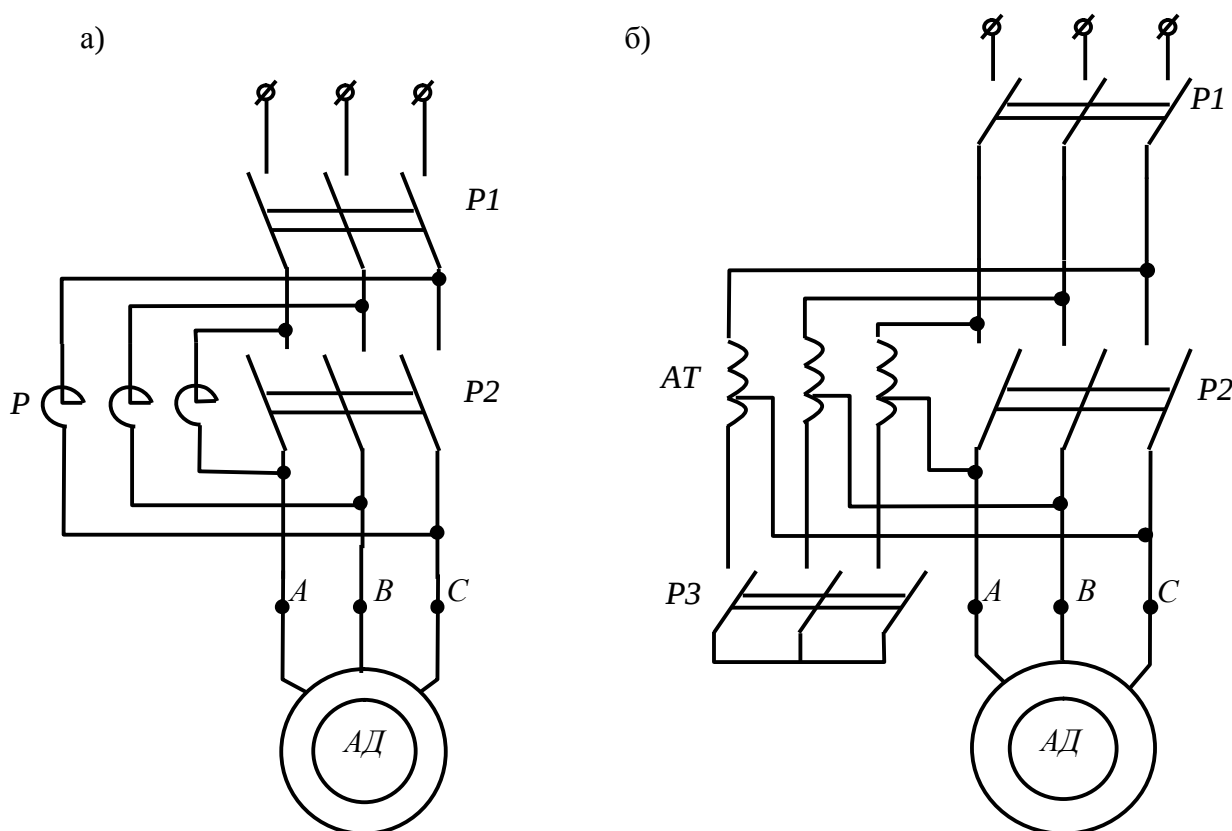


Рис.12.3 Схеми реакторного (а) і автотрансформаторного (б) способів пуску асинхронних двигунів з короткозамкнутим ротором

Пуск двигуна виконується при вимкненому рубильнику P_2 . При вмиканні рубильника P_1 , за рахунок індуктивності реакторів пусковий струм I_n в мережі

обмежується значенням

$$I_{nm} = \kappa_{nm} I_n ,$$

де κ_{nm} - коефіцієнт кратності пускового струму, що допускається, в мережі;

I_n – пусковий струм двигуна при прямому вмиканні.

Після досягнення двигуном сталої частоти обертання вмикається рубильник P_2 , тобто до двигуна підводиться повна напруга.

Цей спосіб пуску має наступні недоліки:

- 1) вимагає спеціального устаткування (реактора);
- 2) зменшується пусковий момент двигуна.

Тому що $I_{n.\partial} = I_{nm} = \kappa_{nm} I_n$ пусковий момент двигуна при реакторному пуску

$$M_{np} = \frac{m_1 I_{n.\partial}^2 r_2'}{w_1} = \frac{m_1 \kappa_{nm}^2 I_n^2 r_2'}{w_1} = M_n \kappa_{nm}^2 , \quad (12.3)$$

де $M_n = \frac{m_1 I_n^2 r_2'}{w_1}$ – пусковий момент двигуна при прямому вмиканні в мережу.

Наприклад: $\kappa_{nm} = 0,7$.

$$M_{np} = 0,49 M_n .$$

Отже, таким способом можна пускати асинхронні двигуни тільки в тому випадку, якщо гальмовий момент, створюваний навантаженням при прямому вмиканні невеликий.

в) автотрансформаторний спосіб пуску

При пуску двигуна через понижуючий автотрансформатор (рис. 12.3, б) спочатку вмикають рубильник P_3 , що з'єднує обмотки автотрансформатора зіркою, а потім вмикають рубильник P_1 і двигун виявляється ввімкненим на знижену напругу

$$U_{\phi.\partial} = \frac{U_{m.\phi}}{\kappa_{AT}} , \quad (12.4)$$

де κ_{AT} - коефіцієнт трансформації автотрансформатора. При цьому пусковий струм двигуна визначається виразом:

$$I_{n.\partial} = \frac{U_{\phi.\partial}}{z_K} = \frac{U_{\phi.m}}{\kappa_{AT} z_K} . \quad (12.5)$$

Пусковий струм в мережі

$$I_{n.m} = \frac{I_{n.d}}{\kappa_{AT}} = \frac{U_{\phi.m}}{\kappa_{AT}^2 Z_K} = \frac{1}{\kappa_{AT}^2} I_n, \quad (12.6)$$

де $I_n = \frac{U_{\phi.m}}{Z_K}$ – пусковий струм при прямому вмиканні.

Після першого розгону ротора двигуна рубильник P_3 вимикають і автотрансформатор перетворюється в реактор. При цьому напруга на затискачах обмотки статора трохи підвищується, але все-таки залишається менше номінальної. Вмиканням рубильника P_2 на двигун подається повна напруга мережі.

Таким чином, пусковий струм в мережі при автотрансформаторному пуску зменшується в κ_{AT}^2 разів в порівнянні з прямим пуском.

Недоліками цього способу пуску, як і попереднього, є:

- 1) необхідність у додатковому устаткуванні (автотрансформатор);
- 2) зменшення пускового моменту в квадрат зниження напруги, тому що

$$M_n \equiv (U_o)^2, \quad (12.7)$$

тобто пусковий момент двигуна зменшується в κ_{AT}^2 разів у порівнянні з прямим пуском.

з) пуск асинхронного двигуна перемиканням обмоток статора з зірки на трикутник

Цей спосіб пуску застосовується в тому випадку, коли в паспорті двигуна зазначені два значення номінальної напруги: наприклад 220/380 В.

Отже, при живленні асинхронного двигуна від мережі 220 В в процесі пуску його обмотку статора вмикають зіркою, потім, після того як він набере обороти, обмотку перемикають на трикутник. При цьому фазна напруга двигуна зростає в $\sqrt{3}$ раз. Принципова схема пуску представлена на малюнку 12.4, а.

Перед пуском перемикач Π ставиться в положення “пуск”. При цьому обмотка статора з'єднується зіркою. Потім вмикається рубильник P . Після досягнення двигуном сталої частоти обертання перемикач Π ставиться в положення “робота”. При цьому обмотка статора з'єднується трикутником.

Визначимо, у яким співвідношенні знаходяться пускові струми в мережі, якщо двигун спочатку запускають при з'єднанні обмоток статора зіркою, а також при пуску асинхронного двигуна, коли обмотки з'єднані трикутником.

Приймаємо наступні позначення:

U_m – лінійна напруга мережі;

$I_{n.d.Y}, I_{n.d.D}$ – пускові струми двигуна при з'єднанні обмоток статора зіркою і трикутником.

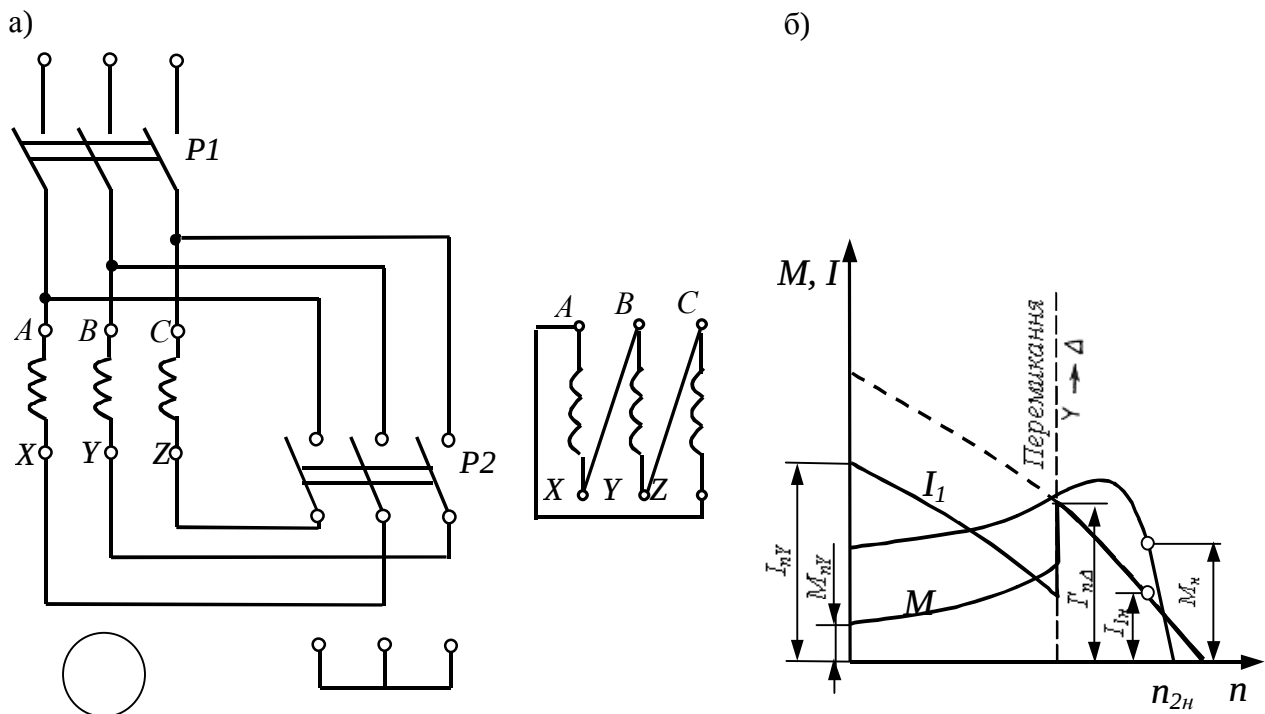


Рис. 12.4 Схема вмикання (а) і графіки зміни моменту і струму (фазного) при пуску (б) асинхронного двигуна з короткозамкнутим ротором перемиканням обмотки статора з зірки на трикутник

Якщо обмотка статора з'єднана зіркою, то

$$I_{n.\partial.Y} = I_{n.m.Y} = \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot z_K}. \quad (12.8)$$

Якщо обмотка статора з'єднана трикутником, то

$$I_{n.m.D} = \sqrt{3} I_{n.\partial.D} = \frac{\sqrt{3} U_M}{Z_K}. \quad (12.9)$$

Звідси випливає, що

$$\frac{I_{n.m.Y}}{I_{n.m.D}} = \frac{U_M}{\sqrt{3} \cdot z_K} \cdot \frac{z_K}{\sqrt{3} \cdot U_M} = \frac{1}{3}, \quad (12.10)$$

де I_{ncY}, I_{ncD} – пускові струми мережі при з'єднанні обмоток “У” і “Д”, тобто пусковий струм мережі зменшується при такому способі пуску в три рази, у порівнянні з прямим пуском.

Пусковий момент

$$M_n \sim (U_{n.\partial.})^2 = \left(\frac{U_M}{\sqrt{3}} \right)^2 = \frac{1}{3}, \quad (12.11)$$

тобто пусковий момент зменшується в три рази.

12.4 Короткозамкнуті асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками

Прагнення зберегти простоту і надійність в роботі двигунів з короткозамкнутим ротором, але додати їм кращі пускові характеристики, привело до створення асинхронних двигунів з особливою конструкцією ротора: двигуни з глибокими пазами на роторі і двигуни з двома короткозамкнутими клітками на роторі.

Двигун із глибокими пазами на роторі. Від звичайного асинхронного двигуна цей двигун відрізняється тим, що в нього пази ротора зроблені у виді вузьких глибоких щілин, в які вкладені стержні обмотки ротора, що представляють собою вузькі смуги. По обидва боки ці стержні приварені до замикаючого кільця. Як правило, глибокий паз має співвідношення розмірів $h_{\Pi}/b_{\Pi}=9/10$, де h_{Π}, b_{Π} – висота і ширина паза.

В момент вмикання двигуна, коли частота струму в роторі має найбільше значення ($f_2=f_1$), індуктивний опір нижньої частини кожного стержня значно більший верхньої. Пояснюється це тим, що нижня частина стержня зчеплена з великим числом магнітних силових ліній поля розсіювання (рис. 12.5,а). На малюнку 12.5, б показаний графік розподілу густини пускового струму в стержні ротора з глибокими пазами по висоті стержня. З цього графіка випливає, що майже весь струм ротора проходить по верхній частині стержня, поперечний переріз якого набагато менше перетину всього стержня. Це рівноцінно збільшенню активного опору стержня ротора, що, як відомо, сприяє росту пускового моменту двигуна і деякому обмеженню пускового струму.

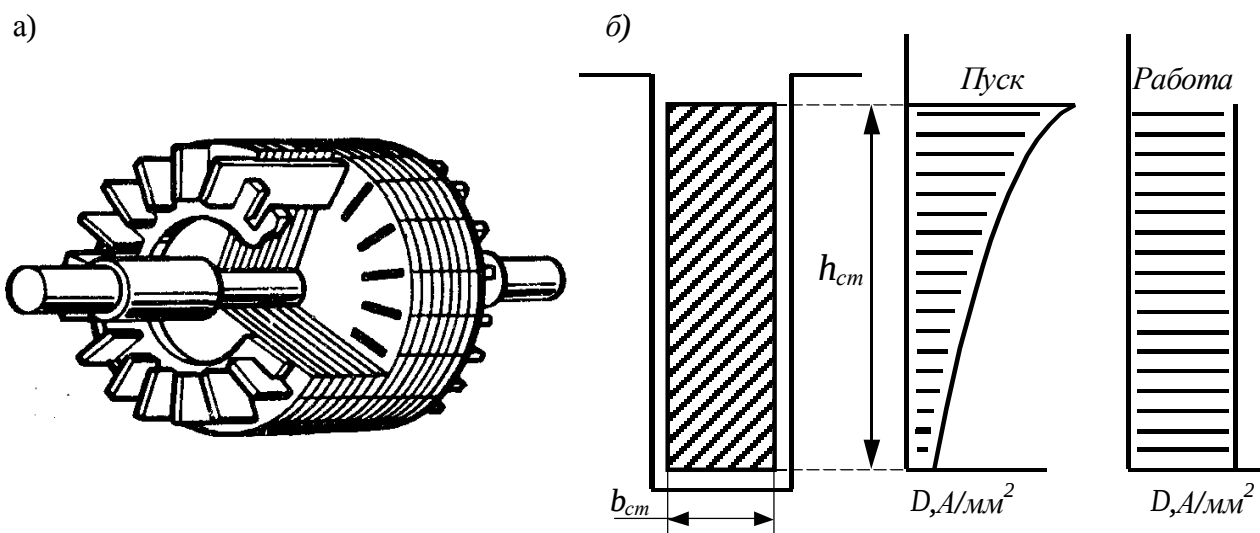


Рис.12.5 Ротор із глибокими пазами: а – будова; б - розподіл густини струму ротора по висоті стержня при пуску і при роботі двигуна

Таким чином, двигун із глибокими пазами на роторі має сприятливе співвідношення параметрів: великий пусковий момент при порівняно невеликому

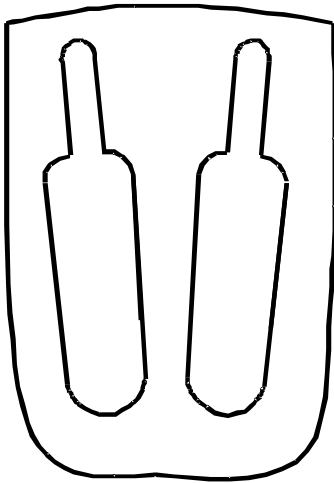


Рис.12.6.Пляшкова форма стержнів ротора

пусковому струмі. В міру наростання частоти обертання ротора частота струму в роторі спадає ($f_2 = sf_1$). В зв'язку з цим зменшується індуктивний опір обмотки ротора ($x_2 @ f_2$). Розподіл густини струму по висоті стержня в цьому випадку стає більш рівномірним, що веде до зменшення активного опору ротора. При роботі двигуна з номінальною частотою обертання, коли $f_2 \ll f_1$, процес “витиснення” струму практично припиняється і двигун працює, як звичайний короткозамкнений.

Ефект витиснення струму добре проявляється при пазах пляшкової форми (рис. 12.6).

В цьому випадку “витиснення” струму відбувається в верхню частину паза, що має меншу площу перетину, а отже, більший активний опір. Застосування пазів пляшкової форми дозволяє скоротити висоту пазів, а отже, зменшити діаметр ротора в порівнянні з глибокопазним ротором.

Двигун із двома клітками на роторі. Ще кращими пусковими властивостями володіє асинхронний двигун із двома короткозамкнутими клітками на роторі (рис. 12.7,а): робочою кліткою 1, стержні якої розташовані в нижньому шарі, пусковою кліткою 2, стержні якої розташовані в верхньому шарі, ближче до повітряного зазору. Стержні пускової клітки, як правило, виконують з латуні або бронзи – матеріалів що мають більш високий, ніж у міді, активний опір. Індуктивний опір пускової клітки невеликий тому що її стержні розташовані поблизу повітряного зазору і до того ж із двох сторін мають повітряні щілини (рис. 12.7,а). Стержні робочої клітки виконують з міді, і в порівнянні зі стержнями пускової клітки вони мають більшу площу перетину. Це забезпечує робочій клітці малий активний опір. Але індуктивний опір робочої клітки більший, ніж у пускової особливо в початковий період пуску, коли частота струму в роторі порівняно велика ($f_2 \approx f_1$).

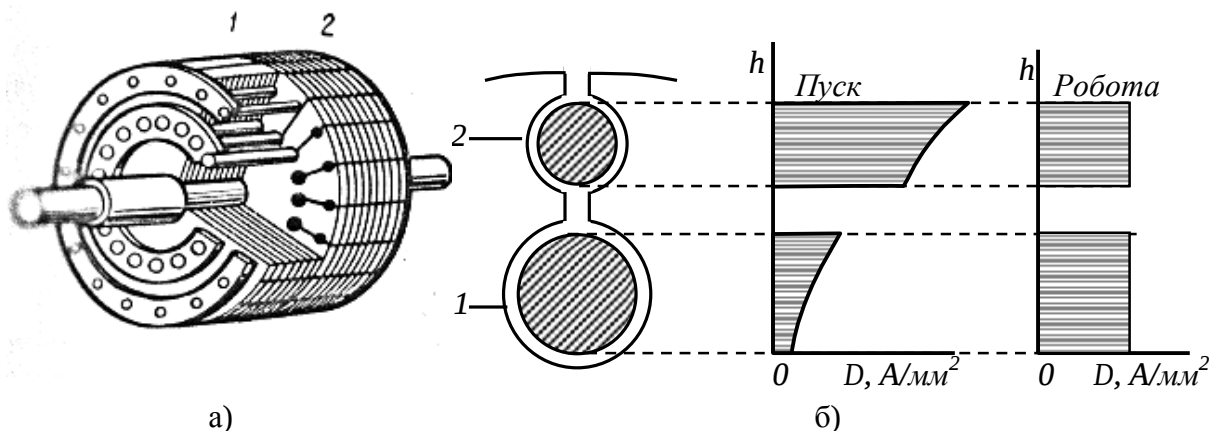


Рис.12.7 Двоклітковий ротор: а – будова ; б - розподіл густини струму в робочій і пусковій клітках при пуску і роботі двигуна.

В момент пуску двигуна струм ротора проходить в основному по верхній (пусковий) клітці, що має малий індуктивний опір. При цьому густину струму в стержнях пускової клітки більше густини струму в стержнях робочої клітки (рис. 12.7, б). Підвищений активний опір цієї клітки забезпечує двигуну значний пусковий момент при зниженому пусковому струмі. В міру збільшення частоти обертання ротора зменшується частота струму в роторі, при цьому індуктивний опір робочої клітки зменшується, і розподіл густини струму в стержнях пускової і робочої кліток стає майже однаковим. У підсумку відбувається перерозподіл обертового моменту між клітками: якщо в початковий період пуску момент створювався головним чином струмами пускової клітки, то по закінченні періоду пуску обертовий момент створюється в основному струмами робочої клітки. Тому що активні опори кліток ротора неоднакові, то залежність $M = f(S)$ цих кліток зображується різними кривими (рис. 12.8).

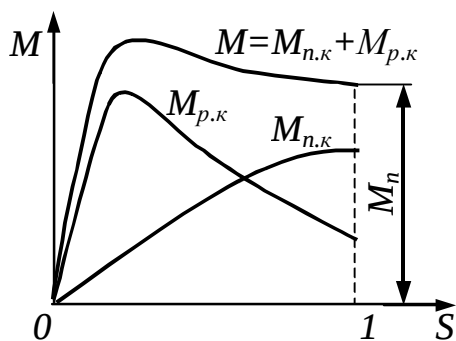


Рис. 12.8. Механічна характеристика двокліткового асинхронного двигуна

Максимальне значення моменту пускової клітки внаслідок її підвищеного активного опору зміщено у бік ковзань, близьких до одиниці. Обертові моменти від обох кліток спрямовані в одну сторону, тому результуючий момент двигуна дорівнює сумі моментів пускової $M_{п.к.}$ і робочої $M_{р.к.}$ кліток $M = M_{п.к.} + M_{р.к.}$.

Двигуни з двома клітками на роторі в порівнянні з асинхронними двигунами звичайної конструкції мають підвищену вартість, що пояснюється складністю конструкції.

12.5 Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів

Загальні відомості. Регульовальні властивості асинхронних двигунів, як і інших типів електричних двигунів, мають важливе значення, оскільки в електроприводах потрібне регулювання частоти обертання.

Регульовальні властивості асинхронних двигунів характеризуються наступними показниками:

1. Діапазоном регулювання частоти обертання

$$\frac{n_{max}}{n_{min}}.$$

2. Характером регулювання частоти обертання, тобто плавне чи ступінчасте.

3. Економічністю регульовальної операції з погляду витрат на устаткування і наступні експлуатаційні витрати.

За цими показниками асинхронні двигуни істотно поступаються двигунам постійного струму.

Незважаючи на це в асинхронних двигунів є можливість регулювання частоти обертання. Це впливає з виразу:

$$S = \frac{n_1 - n}{n_1} \Rightarrow n = n_1(1 - S). \quad (12.12)$$

Звідси очевидні два класи регулювання частоти обертання:

1-й клас регулювання заснований на зміні частоти обертання магнітного поля $n_1 = \frac{60 f_1}{p} [\text{об} / \text{мин}]$.

При такому регулюванні частоти обертання коефіцієнт корисної дії асинхронних двигунів залишається досить високим.

2-й клас регулювання заснований на зміні ковзання S .

При такому регулюванні частоти обертання коефіцієнт корисної дії асинхронних двигунів буде тим менше, чим більше ковзання S , оскільки втрати в роторі пропорційні ковзанню $P_{e.2} = SP_{em}$.

Зазначені два класи регулювання частоти обертання асинхронних двигунів містять в собі ряд способів.

Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів зміною числа пар полюсів обмотки статора. Цей спосіб регулювання частоти обертання дає ступінчасте регулювання. Так, при промисловій частоті $f_1 = 50$ Гц в залежності від числа пар полюсів можна одержати наступні частоти обертання:

p	1	2	3	4	5
n_1	3000	1500	1000	750	600

Змінити число полюсів в обмотці статора можна або укладанням на статорі двох обмоток з різним числом полюсів, або укладанням на статорі однієї обмотки, конструкція якої дозволяє шляхом перемикання котушкових груп одержувати різне число полюсів. Останній спосіб набув найбільшого застосування.

Принцип перетворення чотирьохполюсної обмотки в двополюсну (для однієї фази) показаний на рис. 12.9: при послідовному узгодженому з'єднанні двох котушок магнітне поле, що збуджується ними утворює чотири полюси (рис. 12.9, а); при послідовному зустрічному (рис. 12.9, б) або паралельному з'єднанні (рис. 12.9, в) - два полюси.

Таким чином, принцип утворення полюсної обмотки, що перемикається, заснований на тому, що кожна фаза обмотки поділяється на частини (котушкові групи), змінюючи схему з'єднання яких одержують різне число полюсів.

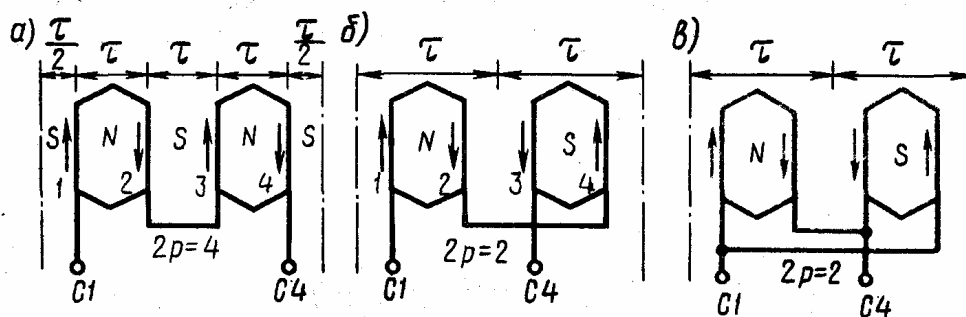


Рис. 12.9 Схема вмикання обмотки статора на різне число полюсів.

Можливі два режими роботи асинхронних двигунів з полюсними обмотками, що перемикаються:

Режим постійного моменту (рис. 12.10, а) при перемиканні двигуна з однієї частоти обертання на іншу обертовий момент на валу двигуна M_2 залишається незмінним, а потужність P_2 змінюється пропорційно частоті обертання n

$$P_2 = 0.105 M_2 \times n; \quad (12.13)$$

Режим постійної потужності (рис. 12.10, б) – при перемиканні двигуна з однієї частоти обертання на іншу потужність P_2 залишається приблизно однакою, а момент на валу M_2 змінюється відповідно зміні частоти обертання n :

$$M_2 = 9.55 P_2 / n. \quad (12.14)$$

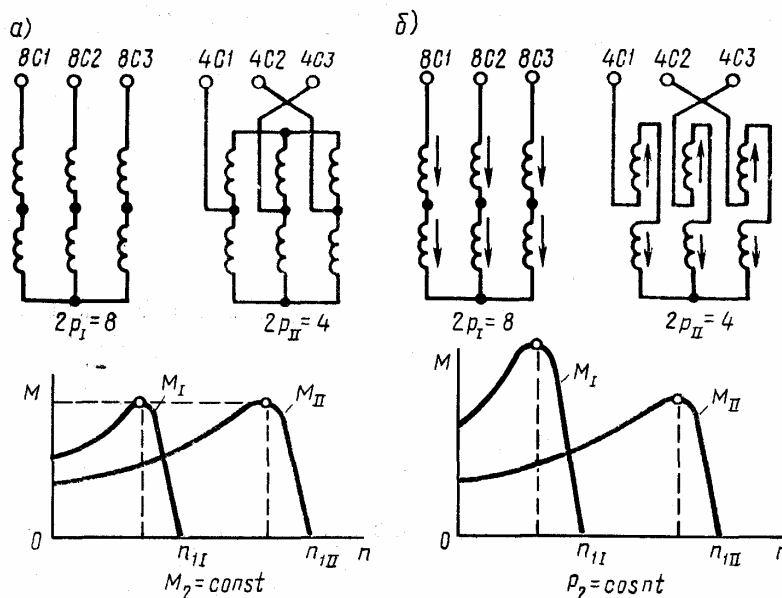


Рис.12.10 Схеми перемикавання числа полюсів і механічні характеристики в режимах постійного моменту (а) і постійної потужності (б)

Регулювання частоти обертання зміною частоти струму в статорі. Цей спосіб регулювання (частотне регулювання) заснований на зміні синх-

ронної частоти обертання $n_1 = 60 f_1 / p$.

Для здійснення цього способу регулювання необхідне джерело живлення двигуна змінним струмом з регульованою частотою. Такими джерелами можуть застосовуватися електромашинні або напівпровідникові перетворювачі частоти. Щоб регулювати частоту обертання достатньо змінити частоту струму f_1 . Але зі зміною частоти $f_1 = w_1 p / (2p)$ буде змінюватися і максимальний момент. Тому для збереження незмінними перевантажувальної здатності, коефіцієнта потужності і ККД двигуна на необхідному рівні необхідно одночасно зі зміною частоти f_1 змінювати і напругу живлення U_1 . Характер одночасної зміни f_1 і U_1 залежить від закону зміни моменту навантаження і визначається рівнянням

$$U_1' / U_1 = (f_1' / f_1) \sqrt{M' / M}, \quad (12.15)$$

де U_1 і M – напруга і момент при частоті f_1 ; U_1' і M' – напруга і момент при частоті f_1' .

Якщо частота обертання двигуна регулюється за умови сталості моменту навантаження ($M = M' = \text{const}$), то напругу, що підводиться до двигуна необхідно змінювати пропорційно зміні частоти струму:

$$U_1' = U_1 f_1' / f_1. \quad (12.16)$$

При цьому потужність двигуна збільшується пропорційно наростанню частоти обертання. Якщо ж регулювання виконується за умови сталості потужності двигуна ($P_{em} = M w_1 = \text{const}$), то напругу, що підводиться, варто змінювати відповідно до закону

$$U_1' = U_1 \sqrt{f_1' / f_1}. \quad (12.17)$$

Частотне регулювання двигунів дозволяє плавно змінювати частоту обертання в широкому діапазоні (до 12:1). Однак джерела живлення з регульованою частотою здорожують установку. Тому частотне регулювання до останнього часу застосовувалося в основному для одночасного регулювання групи двигунів, що працюють в однакових умовах (наприклад, рольгангових двигунів). Але завдяки розвитку силової напівпровідникової техніки в останні роки створені пристрої регулювання асинхронними двигунами.

Використання асинхронних двигунів, укомплектованих такими пристроями для частотного регулювання, найбільше доцільно в пожежо- і вибухонебезпечних середовищах (хімічна і нафтопереробна промисловість), де застосування колекторних двигунів неприпустимо.

Регулювання частоти обертання зміною підведеної напруги.

Цим способом можна регулювати частоту обертання асинхронних двигунів, як з фазним, так і з короткозамкнутим ротором. Збільшення напруги, що підводиться до двигуна викликає ріст частоти обертання. Однак діапазон регулювання частоти обертання виходить невеликим, що пояснюється вузькою зоною усталеної роботи двигуна, обмеженим значенням критичного ковзання і неприпустимістю значного перевищення номінального значення напруги. Останнє пояснюється тим, що з перевищенням номінальної напруги виникає небезпека надмірного перегріву двигуна, викликаного різким збільшенням електричних і магнітних втрат. В той же час зі зменшення напруги U_1 двигун втрачає перевантажувальну здатність, що, як відомо, пропорційна квадрату напруги мережі (§ 4.1)

$$M_{em} \sim U_1^2.$$

Отже, якщо знімати механічну характеристику асинхронного двигуна при різних значеннях напруги (U_1), що підводиться до двигуна вона буде представлена сімейством кривих (рис. 12.11).

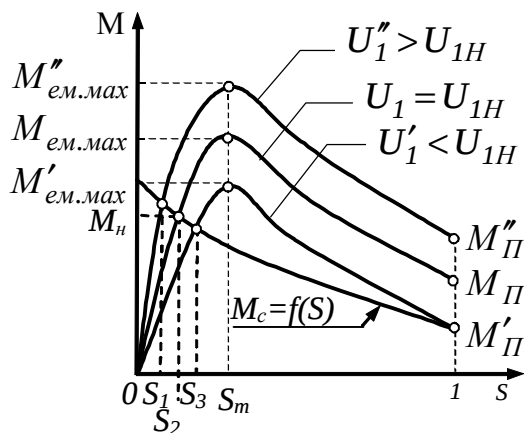


Рис. 12.11 Вплив напруги на вид механічної характеристики асинхронного двигуна

В точці перетину характеристик $M_{em} = f(s)$ і $M_c = f(s)$ має місце рівновага обертального моменту двигуна і статичного моменту опору навантаження при конкретному значенні напруги, що підводиться до двигуна, тому ковзання S_1 , S_2 , S_3 і т.д. визначають сталу частоту обертання асинхронного двигуна.

З приведених характеристик випливає:

1. При плавній зміні напруги, що підводиться до двигуна, його частота обертання змінюється плавно.

2. Діапазон зміни частоти обертання відповідає діапазону зміни ковзання

$$0 < S \leq S_m.$$

Даний спосіб регулювання частоти обертання асинхронних двигунів має наступні істотні недоліки:

- 1) вимагає дорогого джерела живлення з регульованою напругою;
- 2) при зменшенні напруги, що підводиться до двигуна, зменшується ККД двигуна.

Вузький діапазон регулювання і неекономічність (необхідність у додаткових пристроях) обмежує область застосування цього способу регулювання частоти обертання асинхронних двигунів.

Регулювання частоти обертання асинхронного двигуна зміною активного опору в контурі фазного ротора. Раніше було встановлено, що в асинхронних двигунах з фазним ротором можна одержувати штучні механічні характеристики введенням додаткового опору в контур обмотки ротора.

Якщо відома характеристика моменту опору на валу асинхронного двигуна, то можна вказати значення ковзань S_1, S_2, S_3, S_4 , що відповідають сталій частоті обертання асинхронного двигуна, при конкретних значеннях опорів R_0 в контурі обмотки ротора двигуна з фазним ротором (див. рис. 10.5).

Механічні характеристики асинхронного двигуна, побудовані для різних значень активного опору контуру обмотки ротора, показують, що зі збільшенням активного опору ротора зростає ковзання, що відповідає заданому навантажувальному моменту. Частота обертання двигуна при цьому зменшується. Залежність ковзання (частоти обертання) від активного опору контуру обмотки ротора виражається формулою

$$S = m_1 I_2'^2 r_2' / (w_1 M_{em}). \quad (12.18)$$

Практично зміна активного опору контуру обмотки ротора досягається включенням в контур обмотки ротора регулювального реостата, подібного до пускового реостата (див. рис. 12.1), але розрахованого на тривалий режим роботи. Електричні втрати в роторі пропорційні ковзанню ($P_{e2} = SP_{em}$), тому зменшення частоти обертання (збільшення ковзання) супроводжується ростом електричних втрат в контурі обмотки ротора і зниженням ККД двигуна.

Розглянутий спосіб регулювання має ще і той недолік, що ділянка механічної характеристики, що відповідає усталеній роботі двигуна, при введенні в контур обмотки ротора додаткового опору стає більш положистою і коливання навантажувального моменту на валу двигуна супроводжуються значними змінами частоти обертання ротора.

Але незважаючи на зазначені недоліки, розглянутий спосіб регулювання частоти обертання широко застосовується в асинхронних двигунах з фазним ротором. В залежності від конструкції регулювального реостата цей спосіб регулювання частоти обертання може бути плавним (при плавній зміні опору регулювального реостата) чи ступінчастим (при ступінчастій зміні опору регулювального реостата).

Спосіб забезпечує регулювання частоти обертання в широкому діапазоні, що визначається діапазоном зміни ковзання ($0 < S \leq 1$), але тільки униз від синхронної частоти обертання. Разом з тим він забезпечує двигуну поліпшені пускові властивості.

Контрольні питання

1. Якими показниками характеризуються пускові властивості асинхронних двигунів?
2. Які достоїнства і недоліки пускових властивостей асинхронних двигунів?
3. Як краще, з погляду поліпшення пускових властивостей, зменшити пусковий струм: зниженням напруги, що підводиться до двигуна чи збільшенням активного опору в контурі обмотки ротора?
4. Які достоїнства і недоліки пуску асинхронних двигунів безпосереднім включенням у мережу?
5. Які існують способи пуску асинхронних двигунів при зниженій напрузі?
6. В чому сутність ефекту витиснення струму і чому він виникає при пуску двигуна і майже зникає при його роботі?
7. Чому пляшкова форма паза ротора сприяє кращому прояву ефекту витиснення струму?
8. Чому при частотному регулюванні частоти обертання одночасно з частотою струму необхідно змінювати напругу?

Глава 13. Особливі режими роботи асинхронних машин

13.1 Індукційний регулятор напруги і фазорегулятор

Асинхронну машину з фазним ротором часто використовують як джерело живлення споживачів з регульованою напругою. При цьому асинхронна машина може працювати **індукційним** регулятором напруги або **фазорегулятором**.

Індукційний регулятор напруги являє собою асинхронну машину з фазним ротором, призначену для плавного регулювання напруги. Розглянемо роботу трифазного індукційного регулятора, що одержав переважне застосування. Ротор індукційного регулятора загальмований за допомогою черв'ячної передачі, що не тільки утримує його в заданому положенні, але і дозволяє плавно повертати його щодо статора. Обмотки статора і ротора мають автотрансформаторний зв'язок (рис. 13.1, а), тому індукційний регулятор іноді називають поворотним автотрансформатором.

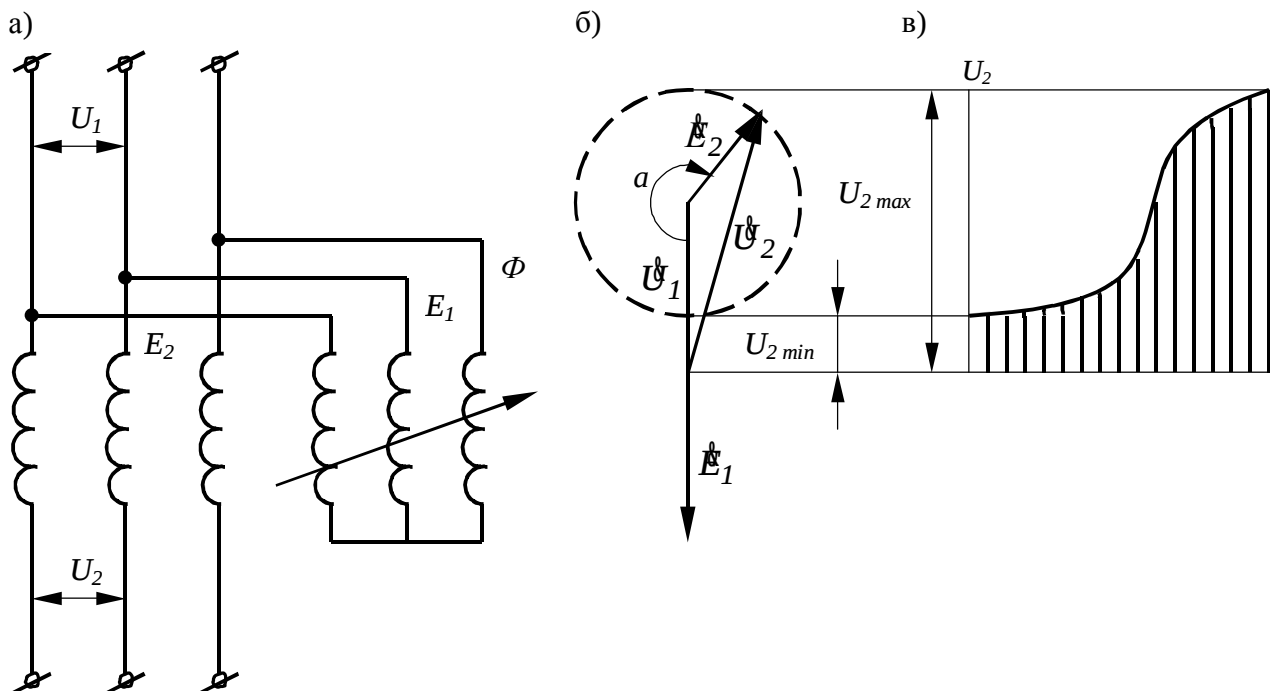


Рис. 13.1 Схема з'єднання (а) і векторні діаграми (б, в) індукційного регулятора

Напруга U_1 підводиться до обмотки ротора, при цьому ротор створює обертове магнітне поле, що наводить в обмотці ротора ЕРС

$$\vec{E}_1 = -\vec{U}_1,$$

а в обмотці статора – ЕРС $\vec{E}_2$.

Фазовий зсув цих ЕРС відносно один одного залежить від взаємного просторового положення осей обмоток статора і ротора, обумовленого кутом α . При $\alpha = 0$ осі обмоток збігаються, поле що обертається одночасно зчіплюється з обома обмотками і ЕРС $\vec{E}_1$ та $\vec{E}_2$ збігаються по фазі (при цьому $\vec{E}_2$ і $\vec{U}_1$ знаходяться в протифазі). При $\alpha = 180$ ел. град. ЕРС $\vec{E}_1$ і $\vec{E}_2$ виявляються в протифазі

($\dot{E}_2$ і $\dot{U}_1$ збігаються по фазі). Якщо знехтувати внутрішніми спадами напруги, то напруга на виході індукційного регулятора визначається геометричною сумою

$$\dot{U}_2 = \dot{U}_1 + \dot{E}_2. \quad (13.1)$$

При повороті ротора кінці векторів $\dot{E}_2$ і $\dot{U}_2$ описують коло (рис. 13.1, б), при цьому $\dot{U}_2$ змінюється $\dot{U}_{2min} = \dot{U}_1 - \dot{E}_2$ при $\alpha = 0$ до $\dot{U}_{2max} = \dot{U}_1 + \dot{E}_2$ при $\alpha = 180$ ел. град. (рис. 13.1, в)

Якщо число витків обмотки статора і ротора однакові, то при $\alpha = 180$ ел.град. $U_{2max} = 2U_1$, а при $\alpha = 0$ ел. град. $U_{2min} = 0$.

Поворот ротора здійснюється вручну штурвалом або дистанційним включенням виконавчого двигуна.

Недоліком приведеної схеми індукційного регулятора є те, що при повороті ротора змінюється фаза вихідної напруги.

Індукційні регулятори застосовуються у тих випадках, коли необхідне плавне регулювання напруги, наприклад при лабораторних дослідженнях.

Фазорегулятор призначений для зміни фази вторинної напруги щодо первинної при незмінній вторинній напрузі.

Він може бути виконаний на базі асинхронної машини з фазним ротором, у якої ротор загальмований, однак вручну або за допомогою приводного двигуна може повертатися на кут 360° . На відміну від індукційного регулятора обмотки статора і ротора фазорегулятора електрично не з'єднані одна з одною, тобто мають трансформаторний зв'язок (рис. 13.2, а) тому фазорегулятор іноді називають **поворотним трансформатором**.

Якщо знехтувати спадом напруги у власних опорах обмоток статора і ротора можна записати

$$\dot{U}_1 = -\dot{E}_1 \text{ і } \dot{E}_2 = \dot{U}_2$$

де U_1 – напруга, що підводиться з боку обмотки статора; U_2 – вихідна напруга, що знімається з затисків обмотки ротора.

Фазорегулятори застосовуються в пристроях автоматики (для фазового керування) і вимірювальній техніці (для перевірки ватметрів і лічильників).

13.2 Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі

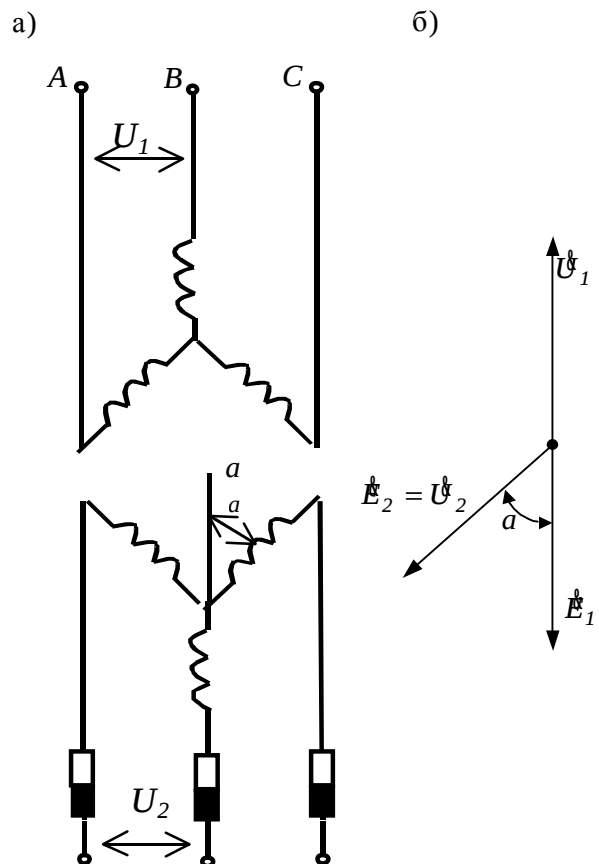


Рис. 13.2 Схема з'єднання (а) і векторна діаграма (б) фазорегулятора

В ряді випадків виникає необхідність живлення трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі. При живленні асинхронного двигуна від однофазної мережі, його обмотка статора не розвиває обертового моменту при пуску. Це пояснюється тим, що обмотка статора створює не обертове магнітне поле, а пульсуюче. При цьому пусковий момент $M_n = 0$, а обертальний момент не дорівнює нулю.

Для одержання обертового магнітного поля при живленні від однофазної мережі необхідно струми в фазах обмотки статора зсунути в часі по одній із схем рис. 13.3.

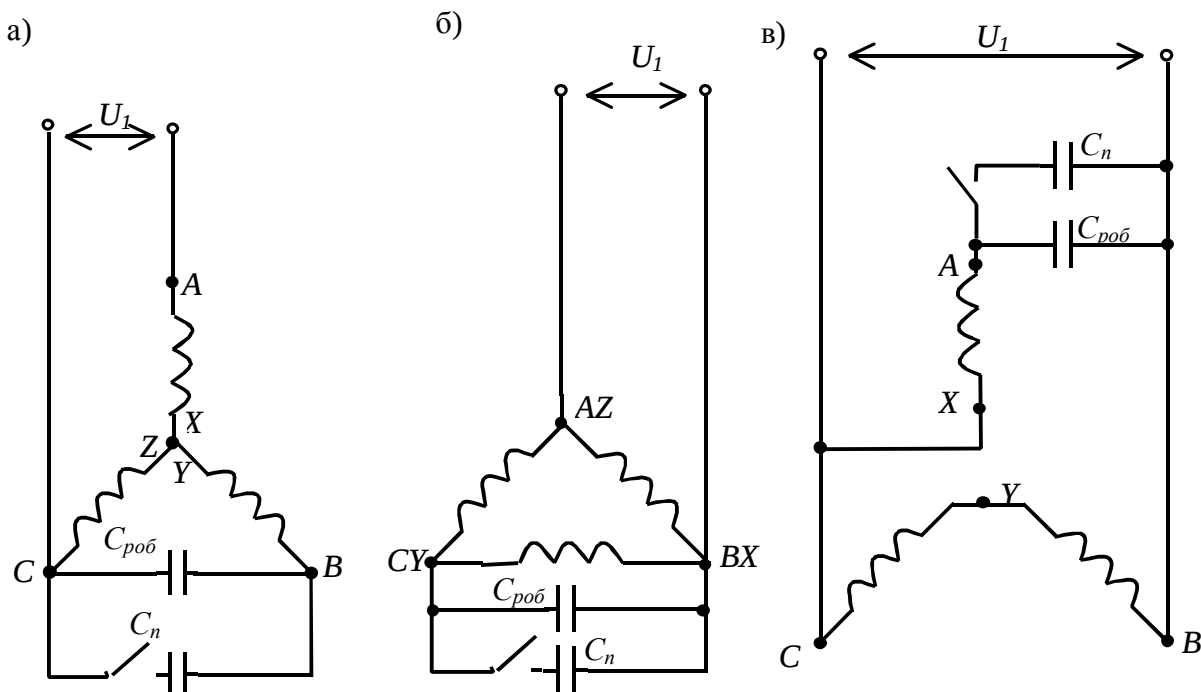


Рис. 13.3 Схеми з'єднання обмотки статора трифазного асинхронного двигуна при вмиканні його в однофазну мережу

Значення робочої ємності $C_{роб.}$ (мкФ) при частоті змінного струму 50 Гц можна орієнтовно визначити по одній з формул:
для схеми, зображеної на рис. 13.3, а

$$C_{роб.} \approx 2700 I_1 / U_c \text{ [мкФ]}; \quad (13.2)$$

на рис. 13.3, б

$$C_{роб.} \approx 2800 I_1 / U_c \text{ [мкФ]}; \quad (13.3)$$

на рис. 13.3, в

$$C_{роб.} \approx 4800 I_1 / U_c \text{ [мкФ]}. \quad (13.4)$$

Тут I_1 – номінальний (фазний) струм в обмотці статора, А; U_c – напруга

однофазної мережі, В.

Якщо пуск двигуна відбувається при значному навантаженні на валу, то паралельно до робочої ємності $C_{роб.}$ варто включити пускову ємність

$$C_n = (2,5 \div 3,0)C_{роб.} \quad (13.5)$$

При визначенні напруги на конденсаторі, при вмиканні двигуна по одній з розглянутих схем, необхідно враховувати: при вмиканні двигуна за схемою (рис. 13.3, а) напруга на конденсаторі $U_\kappa = 1,3U_c$, а при вмиканні двигуна по схемах (рис. 13.3. б, в) ця напруга дорівнює $U_\kappa = 1,15U_c$.

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

Контрольні питання

1. У чому розходження між схемами з'єднання індукційного регулятора напруги і фазо-регулятора?
2. Призначення й область застосування індукційного регулятора.
3. Призначення й область застосування фазорегулятора.
4. Особливості роботи трифазних асинхронних двигунів від однофазної мережі, схеми включення.

Розділ 3. Синхронні машини

Синхронні машини – це безколекторні машини змінного струму. По своїй будові вони відрізняються від асинхронних машин лише конструкцією ротора, що може бути явнополюсним і неявнополюсним. Що ж стосується властивостей, то синхронні машини відрізняються синхронною частотою обертання ротора при будь-якій навантаженні, а також можливістю регулювання коефіцієнта потужності, установлюючи його таким, при якому робота синхронної машини стає найбільш економічною. Синхронні машини оборотні і можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Синхронні генератори складають основу електротехнічного устаткування електростанцій, тобто практично вся електроенергія виробляється синхронними генераторами. Одинична потужність сучасних синхронних генераторів досягає мільйона кіловат і більше. Синхронні двигуни застосовуються головним чином для приводу пристроїв великої потужності. Такі двигуни по своїм техніко-економічним показникам перевершують двигуни інших типів. У великих електроенергетичних установках синхронні машини іноді використовуються як компенсатори – генератори реактивної потужності, що дозволяють підвищити коефіцієнт потужності всієї установки.

Глава 14. Типи і конструктивні елементи синхронних машин

14.1 Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин

Синхронною називається безколекторна машина змінного струму, частота обертання ротора якої знаходиться в строго постійному відношенні до частоти живильної мережі

$$n = n_1 = \frac{60 f}{p}, \text{об / хв.} \quad (14.1)$$

Конструктивно синхронна машина складається з двох частин: нерухомої – статора, обертової – ротора.

Статор синхронної машини конструктивно не відрізняється від статора асинхронної машини. Якщо синхронна машина трифазна, то на статорі розташовується трифазна обмотка, яка називається **обмоткою якоря**.

На роторі синхронної машини розташовується обмотка котра через два контактних кільця живиться від джерела постійного струму, що називається **збудником**. Ця обмотка називається **обмоткою збудження**. Вона призначена для створення магнітного потоку Φ_0 в машині. Потужність збудника складає (0,3 ÷ 3)% від номінальної потужності P_n синхронної машини. Збудник, як правило розташовується на одному валу із синхронною машиною. Існують і інші способи збудження синхронних машин, наприклад - живлення обмотки збудження від мережі змінного струму через випрямляч.

По конструктивному виконанню ротора синхронні машини поділяють на два типи: явнополюсні і неявнополюсні.

Явнополюсні синхронні машини. Схематично конструкція явнополюсної синхронної машини представлена на рис. 14.1.

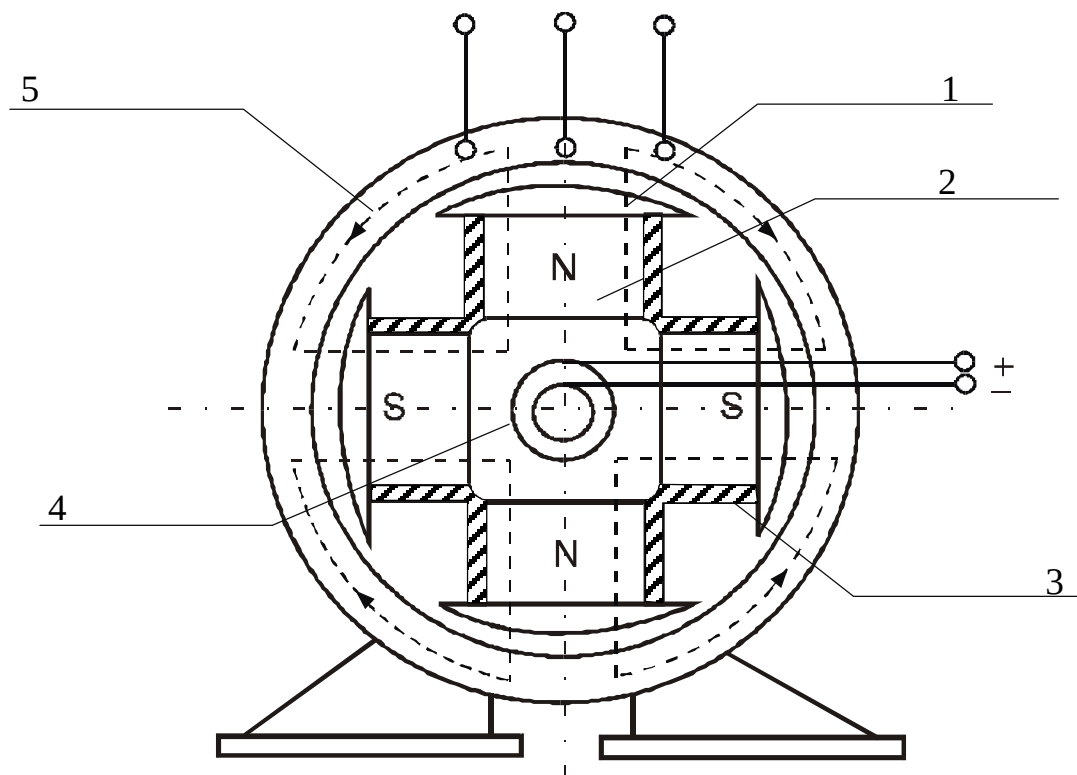


Рис. 14.1 Конструкція явнополюсної синхронної машини: 1 – полюсний наконечник; 2 – сердечник полюса; 3 – котушка обмотки збудження; 4 – контактні кільця; 5 – статор

Сердечник полюса виконується шихтованим з окремих листів електротехнічної сталі товщиною 1-2 мм. Полюсний наконечник виконується суцільним і кріпиться до сердечника за допомогою гвинтів. На полюсах ротора розташовуються котушки обмотки збудження. Вони підключаються до джерела постійного струму таким чином, щоб на роторі утворилися полюси полярності, що переміщуються

$$N - S; N - S; N - S; \dots$$

Ширина полюсного наконечника стосовно полюсного поділку, як правило, складає

$$\frac{\theta_n}{\tau} = 0,45 \div 0,55 .$$

Тому ці синхронні машини ще називають неповнополюсними або синхронні машини з явновираженими полюсами.

З виразу 14.1 для частоти обертання синхронної машини випливає, що в

залежності від числа пар полюсів, при $f = 50$ Гц частота обертання ротора може бути представлена рядом:

$$3000; 1500; 1000; 750; \dots \quad [\text{об/хв.}].$$

Однак явнополюсні синхронні машини виконуються на частоті обертання, що не перевищують 1000 об/хв. Це пояснюється тим, що при більш високих частотах обертання не забезпечується механічна міцність ротора.

Найбільш великі явнополюсні синхронні машини – *гідрогенератори*, тобто генератори гідравлічних електростанцій, що приводяться в обертання, тихохідною гідравлічною турбіною. Як правило, гідрогенератори мають вертикальне розташування вала з опорним підшипником. При цьому діаметр ротора у великих гідрогенераторах досягає 20 м при осьовій довжині 1,7 м.

Горизонтальне розташування вала в гідрогенераторах зустрічається рідко.

Неявнополюсні синхронні машини Типовою неявнополюсною синхронною машиною є генератор теплової електростанції, що приводиться в обертання швидкохідною паровою турбіною. Ці генератори називаються *турбогенераторами*. Ротор турбогенератора виконується із суцільного сталевого кування діаметром до 1,1-1,15 м і довжиною до 7,5 м. Схематично конструкція синхронної машини з неявновираженими полюсами представлена на рис. 14.2.

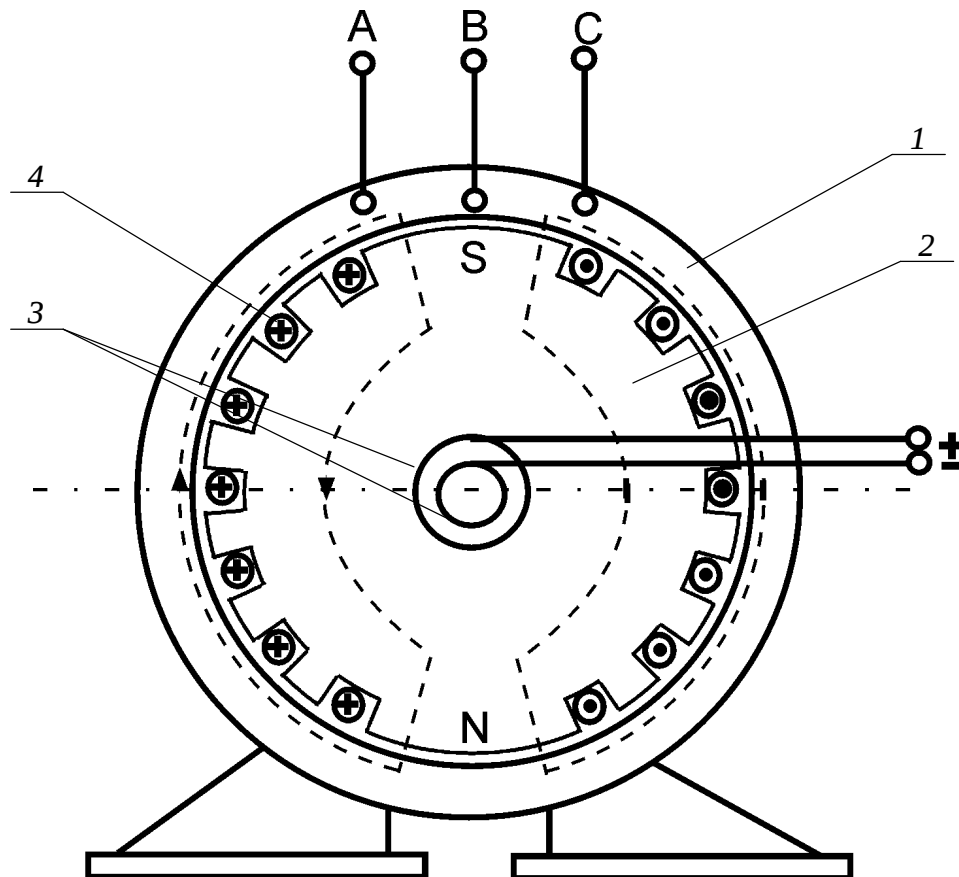


Рис. 14.2 Конструкція неявнополюсної синхронної машини: 1 – статор; 2 – ротор; 3 – контактні кільця; 4 – обмотка збудження

На зовнішній поверхні ротора 2 фрезеруються пази, в які укладається обмотка збудження 4. У пазах вона закріплюється сталевими клинами, а по торцях сталевими бандажами. Така конструкція ротора забезпечує високу механічну міцність.

Турбогенератори, як правило, виконуються двополюсними з горизонтальним розташуванням вала. Тому їхня частота обертання складає

$$n = \frac{60 f}{P} = \frac{60 \times 50}{1} = 3000 \text{ об / хв.} \quad (14.2)$$

Живлення обмотки збудження 4 здійснюється через контактні кільця 3 від джерела постійної напруги.

Турбогенератори мають складну систему охолодження. У великих машинах обмотка якоря охолоджується водою, що тече по порожнистих провідниках обмотки. Обмотка збудження охолоджується воднем по замкнутому циклу.

Обернена синхронна машина. Цей тип синхронної машини відрізняється від попередніх тем, що полюси та обмотка збудження розташовуються на статорі, а трифазна обмотка якоря на роторі. При цьому вона через три контактних кільця з'єднується з зовнішнім електричним колом.

У оберненому виконанні випускаються синхронні машини малої потужності. Така конструкція диктується необхідністю уніфікації синхронних машин з машинами постійного струму, тобто статор синхронної машини і машини постійного струму виконуються в однаковому конструктивному виконанні.

Синхронні машини випускаються серійно: як синхронні двигуни, синхронні генератори і синхронні компенсатори. Синхронні двигуни загальнопромислового призначення випускаються на потужності до 10000 кВт і напругою до 6-10 кВ.

Синхронні генератори загальнопромислового призначення випускаються на потужності до 3200 кВА і напругою до 6,3 кВ.

Генератори електричних станцій випускають як гідро- і турбо- генератори. Гідрогенератори випускаються на потужності понад 600000 кВА., турбогенератори 1200000 кВА.

14.2 Принцип дії синхронного генератора

Принцип дії синхронного генератора розглянемо на двополюсній моделі синхронної машини (рис. 14.3).

При вмиканні обмотки збудження на джерело постійного струму, вона створює магнітне поле. Оскільки це поле утворене постійним струмом, то воно нерухомо в просторі щодо полюсів ротора. На кожному полюсній поділці в повітряному зазорі індукція розподіляється по синусоїдальному закону (рис. 14.4).

Якщо ротор не приведений в обертання, в обмотці якоря ЕРС не індукуються. Коли ротор приводиться в обертання приводним двигуном (турбіною),

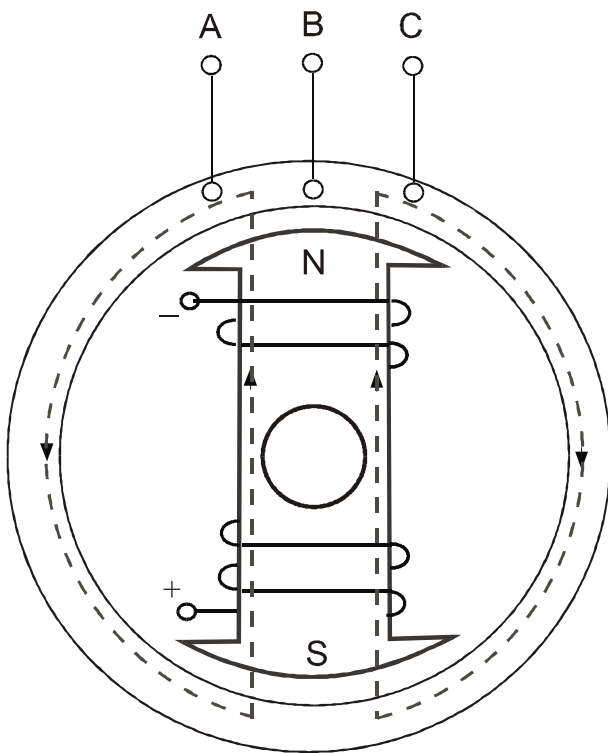


Рис.14.3 Модель двополусної синхронної машини

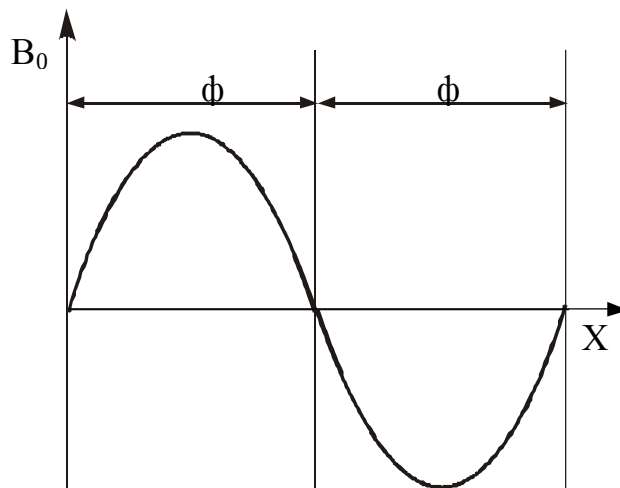


Рис. 14.4 Розподіл магнітної індукції в повітряному зазорі

силові лінії поля збудження перетинають провідники обмотки якоря і індукують у них ЕРС. Діюче значення ЕРС фази обмотки якоря визначається виразом

$$E_{\phi} = 4,44 w_{\phi} f K_{об} \Phi_0 , \quad (14.3)$$

де w_{ϕ} – число послідовно з'єднаних витків у фазі обмотки якоря; $f = \frac{pn}{60}$ – частота ЕРС, Гц; p – число пар полюсів ротора; n – частота обертання ротора, об/хв; Φ_0 – магнітний потік порушення на полюсному поділці, Вб; $K_{об}$ – обмотувальний коефіцієнт обмотки якоря.

Відповідно до приведеної залежності, значення ЕРС і, відповідно, вихідна напруга генератора залежить від двох факторів:

1. Значення магнітного потоку Φ_0 на полюсному поділці, що регулюється струмом збудження.
2. Частоти обертання ротора n .

Як правило, в генераторах загальпромислового призначення частота входної напруги $f = 50$ Гц, отже, у залежності від числа пар полюсів машини частота обертання ротора повинна бути певною, тобто відповідати наступному ряду

P	1	2	3	4
$n, \text{ об/хв}$	3000	1500	1000	750

Таким чином, в синхронних генераторах регулювати значення ЕРС обмотки якоря і відповідно, вихідну напругу можна тільки зміною струму збудження.

Напрямок обертання ротора повинний бути таким, щоб на затискачах обмотки якоря утворився прямий порядок переміжування фаз *A, B, C*.

Контрольні питання

1. Поясніть будову явнополюсного і неявнополюсного роторів.
2. Поясніть будову оберненої синхронної машини.
3. Поясніть принцип дії синхронного генератора.

Глава 15. Реакція якоря і векторні діаграми синхронного генератора

15.1 Поняття реакції якоря

Синхронні машини широко використовуються як генератори змінного струму, тому цей режим синхронних машин вивчається детально.

При роботі синхронного генератора в режимі холостого ходу затискачі обмотки якоря розімкнуті. В цьому режимі в магнітному колі машини існує тільки поле, створене обмоткою збудження під дією магніторушійної сили (МРС) F_0 . На кожному полюсній поділці в повітряному зазорі між статором і ротором утвориться магнітний потік Φ_0 , що називається **основним магнітним потоком**. Він визначає значення ЕРС обмотки якоря.

В навантажувальному режимі обмотка якоря підключена до навантаження. При цьому в обмотці якоря протікає струм I , що створює власне магнітне поле під дією МРС обмотки якоря F_a . Це поле взаємодіє з полем збудження, чи підсилюючи або послабляючи поле збудження, або ж спотворюючи його форму. В результаті цієї взаємодії в генераторі, що працює під навантаженням, утвориться результуюче магнітне поле під дією результуючої МРС

$$\mathbb{F}_p = \mathbb{F}_0 + \mathbb{F}_a. \quad (15.1)$$

Характер реакції якоря в синхронному генераторі залежить від наступних факторів:

1. Величини навантаження генератора, тобто значення струму I .
2. Роду навантаження, тобто чи є навантаження чисто активним, чисто індуктивним, чисто ємнісним або змішаним.
3. Конструкції синхронного генератора – явнополюсна чи неявнополюсна.

При обліку реакції якоря виходять з наступних положень:

1. Вважаємо, що МРС реакції якоря $F_a = f(x)$ розподілена на кожному полюсній поділці по синусоїдальному закону (вищими гармонійними МРС реакції якоря нехтуємо, оскільки вони істотно послабляються укороченням кроку обмотки якоря, скосом пазів в осьовому напрямку і наявністю значного зазору між статором і ротором).

2. Вісь полюсів поля реакції якоря завжди розташовується по осі тієї фази, струм у який в даний момент часу має максимальне значення. Це дозволяє правильно орієнтувати осі полів реакції якоря і збудження, якщо умовно вважати їх існуючими самостійно.

3. Провідники обмотки якоря, у яких в даний момент часу індукується максимальне значення ЕРС, розташовані по осі полюсів ротора.

15.2 Реакція якоря синхронного генератора в граничних випадках навантаження

Як правило навантаження синхронного генератора змішане, тобто активно-індуктивне або активно-ємнісне. Але щоб зрозуміти характер реакції якоря в цих випадках, необхідно спочатку установити її характер в граничних випадках навантаження:

- 1) при чисто активному навантаженні;
- 2) при чисто індуктивному навантаженні;
- 3) при чисто ємнісному навантаженні.

Активне навантаження ($y = 0$). Нехай навантаження синхронного генератора активне, з невеликою ємнісною складовою, для компенсації внутрішньої індуктивності генератора. У цьому випадку струм якоря синхронного генератора I збігається по фазі з ЕРС E_0 (рис. 15.1), що індукується в обмотці якоря полем збудження синхронного генератора.

Установимо характер реакції якоря для цього випадку навантаження генератора. Представимо магнітне коло двополусної синхронної машини в розгорнутому виді (рис. 15.2).

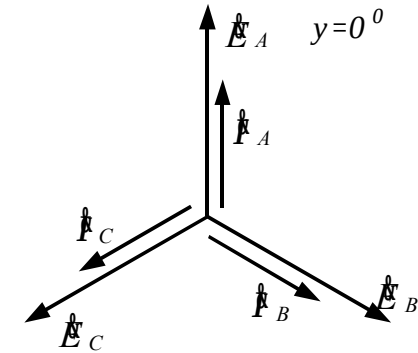


Рис. 15.1. Векторна діаграма синхронного генератора при чисто активному навантаженні

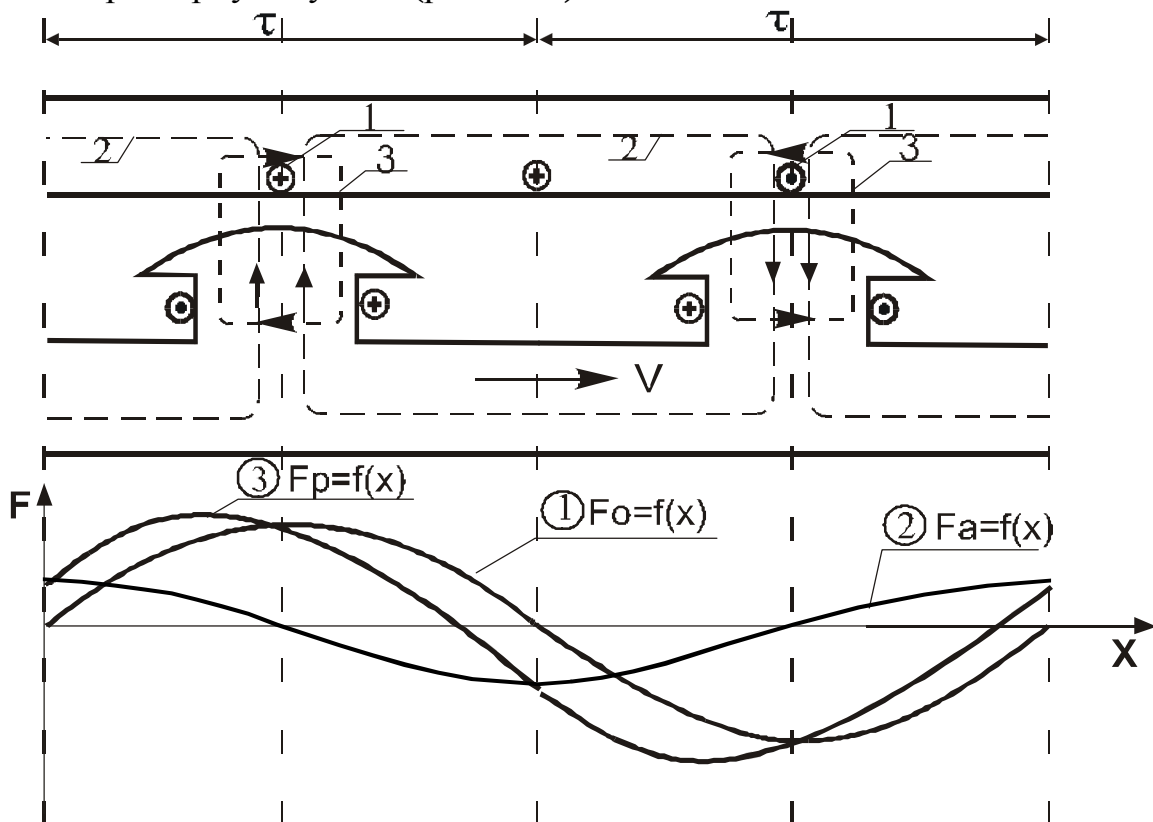


Рис. 15.2 Реакція якоря синхронного генератора при чисто активному навантаженні:
1 – провідники з максимальним значенням ЕРС і струму; 2 – магнітні силові лінії поля збудження; 3 – магнітні силові лінії поля реакції якоря

Як відзначалося раніше, провідники обмотки якоря, у яких в даний момент часу індукується максимальне значення ЕРС розташовані по осі полюсів ротора. Напрямок ЕРС в цих провідниках визначається за правилом правої руки, з огляду на напрямок руху полюсів ротора (показано стрілкою).

Оскільки в даному випадку навантаження струм обмотки якоря збігається по фазі з ЕРС, то провідники з максимальним значенням ЕРС будуть одночасно і провідниками з максимальним значенням струму.

Представимо магнітні силові лінії навколо провідників обмотки якоря з максимальним значенням струму (магнітні силові лінії поля реакції якоря).

З картини силових ліній поля реакції якоря видно:

1. В роторі магнітні силові лінії реакції якоря йдуть поперек осі полюсів, тому таку реакцію якоря називають *поперечною*.

2. Вісь полюсів поля реакції якоря приходиться на середину міжполюсного простору полюсів ротора.

З огляду на ці обставини, орієнтуємо відповідно криві розподілу перших гармонік МРС збудження і реакції якоря.

Амплітуда першої гармоніки МРС обмотки збудження приходиться на середину полюсів ротора, причому знак амплітуди приймаємо з урахуванням напрямку магнітних силових ліній поля збудження.

Відповідно амплітуду першої гармоніки кривої розподілу МРС реакції якоря орієнтуємо по осі між полюсного простору полюсів ротора, також з урахуванням напрямку магнітних силових ліній поля реакції якоря.

Підсумовуючи ординати кривих $F_0 = f(x)$ і $F_a = f(x)$ знаходимо криву розподілу першої гармоніки результуючої МРС $F_p = f(x)$,

$$\vec{F}_p = \vec{F}_0 + \vec{F}_a .$$

Зіставляючи криві (1) і (3) можна зробити наступний висновок: оскільки ці криві відрізняються по амплітуді і по фазі, то при переході генератора від режиму холостого ходу, коли в магнітному колі діє тільки МРС F_0 , до навантажувального режиму, коли в магнітному колі діє МРС F_p , вихідна напруга синхронного генератора також буде змінюватися по амплітуді і по фазі. Це відбудеться в результаті зміни структури поля і значення магнітного потоку на кожному полюсному поділці через дію поперечної реакції якоря. Оскільки в даному випадку вся реакція якоря поперечна, можна записати

$$F_a = F_{aq} , \quad (15.2)$$

де F_{aq} – МРС поперечної реакції якоря.

Таким чином, вплив МРС реакції якоря F_a на МРС збудження F_0 при чисто активному навантаженні викликає спотворення результуючого поля машини: магнітне поле машини послабляється під краєм полюса, що набігає, і підсилюється під краєм полюса, що збігає. Внаслідок насичення магнітного кола ре-

зультуюче магнітне поле машини трохи послабляється. Пояснюється це тим, що розмагнічування полюсних наконечників під набігаючим краєм, і ділянок зубцового шару статора, що знаходяться над ним, відбувається безперешкодно, а підмагнічування країв полюсних наконечників, що збігають, і ділянок зубцового шару статора, що знаходяться над ними, обмежується магнітним насиченням цих елементів магнітного кола. У підсумку результуючий магнітний потік машини послабляється, тобто магнітна система трохи розмагнічується. Це веде до зменшення ЕРС машини E .

Індуктивне навантаження ($\gamma = +90^\circ$). При чисто індуктивному навантаженні генератора струм якоря I_A відстає по фазі від ЕДС E_0 на кут $\gamma = 90^\circ$ (рис. 15.3).

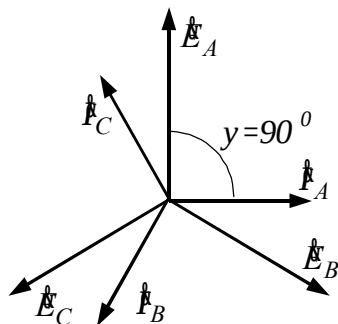


Рис. 15.3 Векторна діаграма синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні

Цей випадок навантаження генератора принципово відрізняється від попереднього випадку тим, що провідники обмотки якоря з максимальним значенням струму будуть зміщені щодо провідників обмотки якоря з максимальним значенням ЕРС на кут 90° убік відставання, тобто в цих провідниках струм досягне максимального значення лише після повороту ротора уперед на 90° щодо його положення, що відповідає максимуму ЕРС E_0 .

Магнітні силові лінії поля збудження і реакції якоря йдуть головним чином по шляху з найменшим магнітним опором, тобто по сталі.

З врахуванням цього представляємо магнітне коло двополюсного генератора і картину розподілу магнітних силових ліній полів збудження і реакції якоря для даного випадку навантаження (рис. 15.4).

З картини силових ліній поля реакції якоря видно:

1. У роторі силові лінії поля реакції якоря в даному випадку розташовуються уздовж осі полюсів, отже, реакція якоря називається подовжньою. Оскільки напрямок магнітних силових ліній поля реакції якоря протилежний напрямку магнітних силових ліній поля збудження, реакція якоря, називається **подовжньо-розмагнічуючою**.

2. Вісь полюсів реакції якоря розташовується по осі полюсів ротора, тобто осі полюсів поля збудження і реакції якоря збігаються.

З огляду на (1) і (2) представляємо криві розподілу МРС обмотки збудження $F_0 = f(x)$ і реакції якоря $F_a = f(x)$.

Підсумовуючи ординати кривих (1) і (2) знаходимо криву розподілу результуючої МРС $F_p = f(x)$.

Зіставляючи криві $F_0 = f(x)$ і $F_a = f(x)$ відзначаємо, що вони протилежні по фазі і відрізняються по амплітуді.

Це означає, що при переході від холостого ходу до чисто індуктивного навантаження відбувається ослаблення магнітного поля генератора під ді-

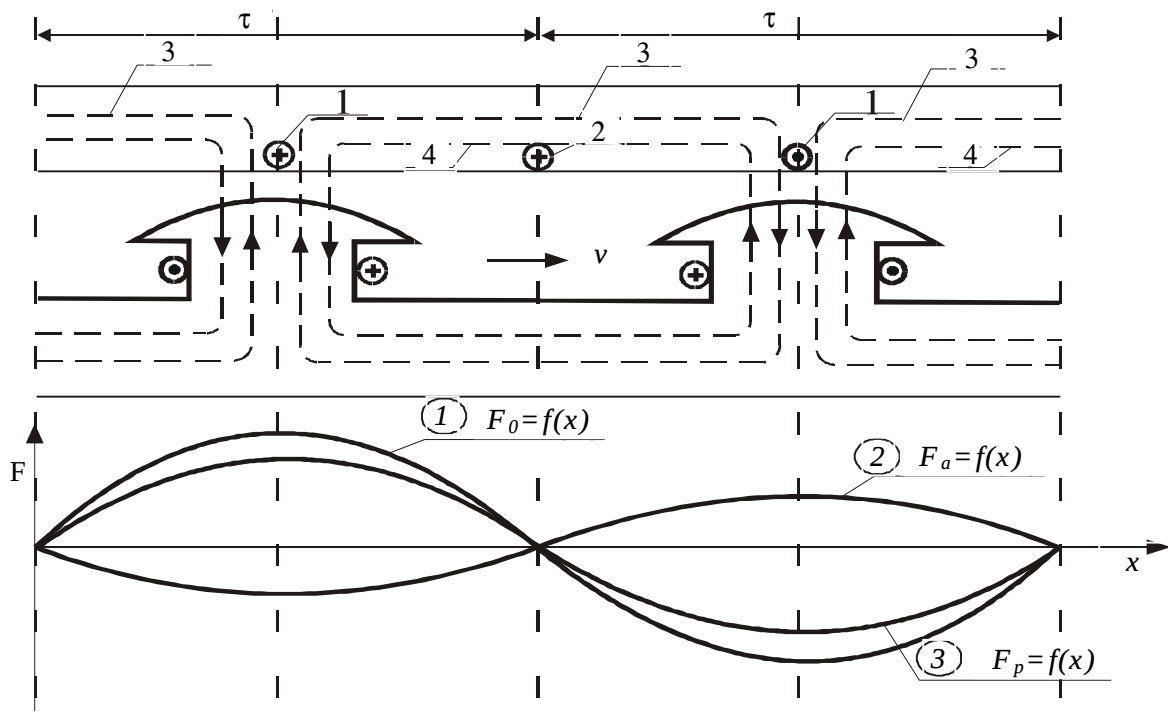


Рис. 15.4 Реакція якоря синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні: 1 – провідники з максимальним значенням ЕРС; 2 – провідники з максимальним значенням струму; 3 – магнітні силові лінії поля збудження 4 – магнітні силові лінії поля реакції якоря

єю поздовжньо-розмагнічуючої реакції якоря. Відбувається зменшення магнітного потоку на кожному полюсному поділку і, відповідно, знижується вихідна напруга генератора.

Оскільки в даному випадку навантаження вся реакція якоря є поздовжньо-розмагнічуючою, її МРС записується у такий спосіб:

$$F_a = -F_{ad} , \quad (15.3)$$

де F_{ad} - МРС поздовжньої реакції якоря.

На відміну від реакції якоря при активному навантаженні в розглянутому випадку магнітне поле не спотворюється.

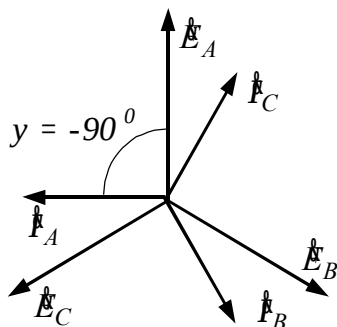


Рис. 15.5 Векторна діаграма синхронного генератора при чисто ємнісному навантаженні

Ємнісне навантаження ($y = -90^\circ$). При чисто ємнісному навантаженні генератора струм якоря I випереджає по фазі ЕРС E_0 на кут $y = -90^\circ$. На векторній діаграмі цей випадок представлений на рис. 15.5.

Цей випадок відрізняється від попереднього тем, що провідники з максимальним значенням струму зміщені щодо провідників з максимальним значенням ЕРС на кут 90° убік випередження, тобто струм досягне свого максимуму раніш, ніж ЕРС.

З врахуванням цього представляємо магнітне коло двополюсного синхронного генератора і розподіл магнітних силових ліній полів збудження і реакції

ції якоря для даного випадку навантаження (рис. 15.6)

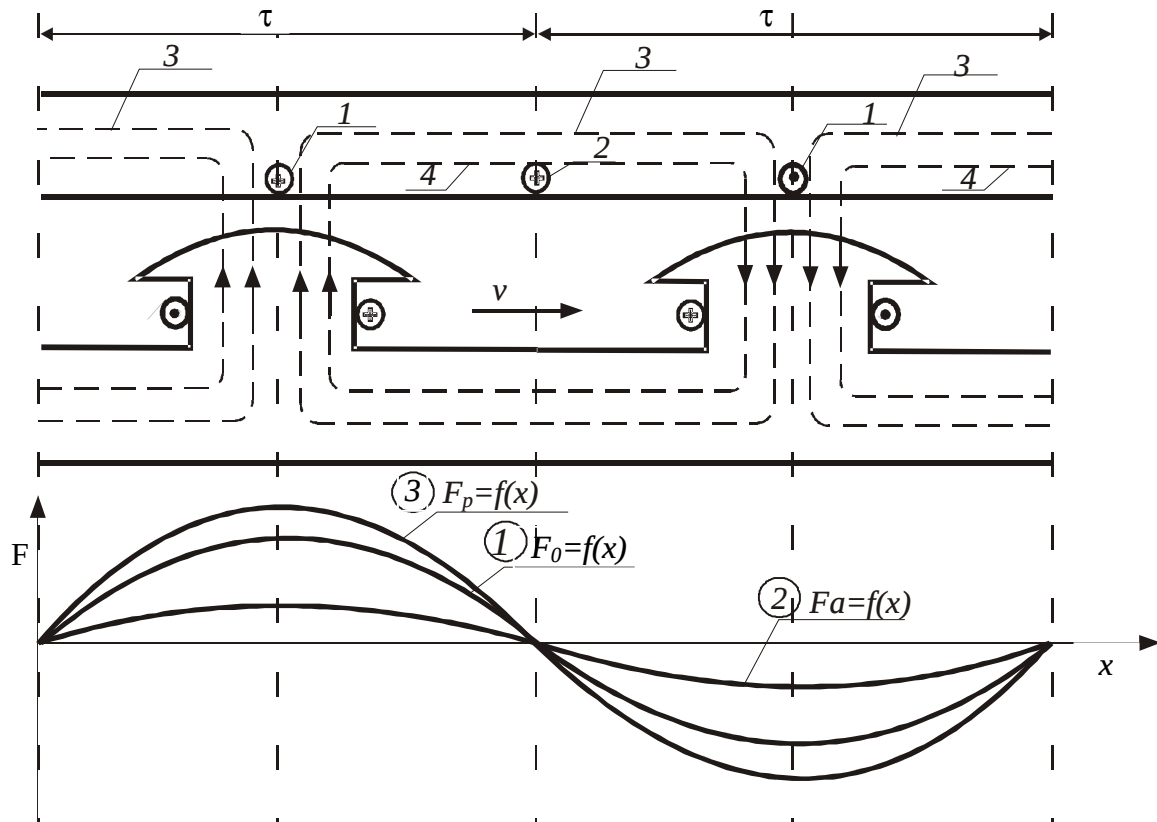


Рис. 15.6 Реакція якоря синхронного генератора при чисто ємнісному навантаженні: 1 – провідники з максимальним значенням ЕРС; 2 – провідники з максимальним значенням струму; 3 – магнітні силові лінії поля збудження; 4 – магнітні силові лінії поля реакції якоря

З картини магнітних силових ліній дійдемо висновку:

1. У роторі силові лінії реакції якорі розташовані уздовж осі полюсів, отже, реакція якоря називається *поздовжньою*. Оскільки ці силові лінії збігаються по напрямку із силовими лініями поля збудження, реакція якоря називається *поздовжньо-підмагнічуючою*.

2. Вісь полюсів поля реакції якоря розташовується по осі полюсів ротора, тобто осі полюсів поля збудження і реакції якоря збігаються.

З огляду на (1) і (2) представимо криві розподілу МРС збудження $F_0 = f(x)$ і МРС реакції якоря $F_a = f(x)$ таким чином, що їхні амплітуди розташовуються по осі полюсів, а знак амплітуди залежить від напрямку силових ліній.

Підсумовуючи амплітуди кривих (1) і (2) знаходимо розподіл результуючої МРС $F_p = f(x)$.

Зіставляючи криві (1) і (3) знаходимо, що ці криві збігаються по фазі і відрізняються по амплітуді. Це означає, що при переході від режиму холостого ходу генератора, коли в його магнітному колі діє МРС F_0 , до режиму чисто ємнісного навантаження, коли в магнітному колі діє МРС F_p , магнітне поле в генераторі не спотворюється а підсилюється поздовжньо-намагнічуючою і дію

реакції якоря. При цьому збільшується магнітний потік на кожному полюсному поділці і, відповідно, збільшується вихідна напруга.

Оскільки в даному випадку навантаження вся реакція якоря є поздовжньо-підмагнічуючою, її МРС позначається $F_a = +F_{ad}$, де знак «плюс» означає, що реакція якоря *підмагнічуюча*.

Висновки: З розглянутих трьох граничних випадків навантаження синхронного генератора впливає, що при чисто активному навантаженні в синхронних генераторах має місце поперечна реакція якоря. При чисто індуктивному і ємнісному навантаженнях – поздовжня реакція якоря.

Якщо навантаження синхронного генератора змішане, тобто $(r - L)$ або $(r - C)$, що звичайно має місце, то в цих випадках основну хвилю МРС реакції якоря можна розкласти на дві складові: з амплітудами $F_a \cos \psi$ і $F_a \sin \psi$.

Складова $F_a \cos \psi = F_{aq}$ – МРС поперечної реакції якоря, їй відповідає складова струму $I_q = I \cos \psi$. Складова струму I_q є активною стосовно ЕРС E_0 .

Складова $F_a \sin \psi = F_{ad}$ – МРС поздовжньої реакції якоря, їй відповідає складова струму якоря $I_d = I \sin \psi$. Складова токи I_d є реактивною по відношенню до E_0 .

Розгляд реакції якоря по двох складових, доцільно, як буде показано нижче, тільки для явнополюсних синхронних машин.

15.3 Особливості обліку реакції якоря в явнополюсних і неявнополюсних синхронних машинах

Вище відзначалося, що характер реакції якоря залежить від конструкції синхронних машин. Установимо, яким чином розподіляється індукція поля реакції якоря на кожному полюсному поділці неявнополюсної і явнополюсної синхронній машині, якщо розглядати поле реакції якоря по поздовжній і поперечній осях машини.

В усіх випадках вважаємо, що МРС реакції якоря розподілена в просторі на кожному полюсній поділці по синусоїдальному закону.

Неявнополюсна синхронна машина. Представимо схематично магнітне коло синхронної машини (рис. 15.7). Розглянемо розподіл індукції реакції якоря на довжині полюсного поділки для поздовжньої і поперечної осей машини.

Як впливає з рисунка в неявнополюсній синхронній машині повітряний зазор між статором і ротором у значній мірі рівномірний. Тому магнітний опір на шляху проходження магнітного потоку поздовжньої складової реакції якоря і поперечної складової реакції якоря практично однаковий.

Приймаючи, що криві розподілу МРС поздовжньої і поперечної реакції якоря $F_{ad} = f(x)$ і $F_{aq} = f(x)$ синусоїдальні (крива 1 рис. 15.8), представимо

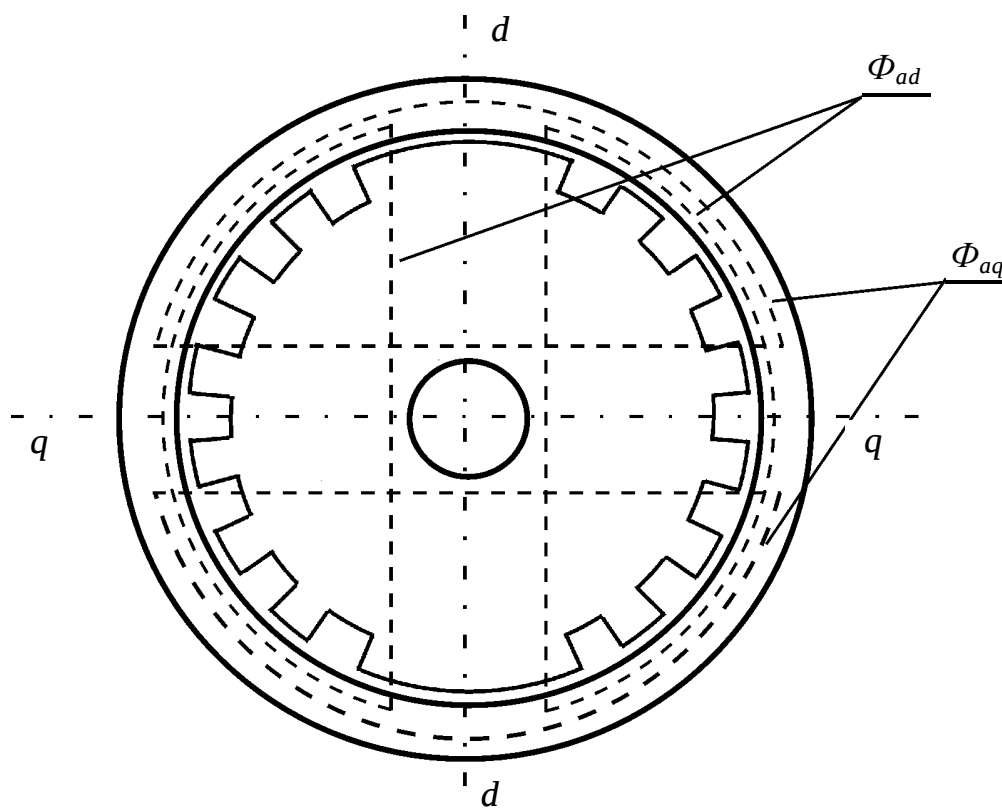


Рис. 15.7 Магнітний ланцюг неявнополюсної синхронної машини

криві розподілу індукції $B_{ad} = f(x)$ і $B_{aq} = f(x)$ на полюсному поділку для поздовжньої і поперечної осей машини.

Якби повітряний зазор між статором і ротором був строго рівномірним, індукція поля реакції якоря по поздовжній чи поперечній осях машини, як і МРС (крива 1, рис. 15.8), були синусоїдальними (крива 2, рис. 15.8). Але в зоні розташування зубців і пазів на роторі магнітний опір для поля реакції якоря трохи збільшується, відповідно індукція в цій зоні зменшується (крива 3, рис. 15.8).

Криві $B_{ad} = f(x)$ і $B_{aq} = f(x)$ близькі за формою до синусоїди. Тому в неявнополюсній синхронній машині немає необхідності розглядати реакцію якоря по двох складовим (поздовжньої і поперечної) тобто основну хвилю МРС реакції якоря $F_a = f(x)$ не розкладають на дві складові.

Явнополюсна синхронна машина. Представимо схематично магнітне коло синхронної машини (рис. 15.9).

Як впливає з рисунка в явнополюсній синхронній машині повітряний зазор між статором і ротором у значній мірі нерівномірний. Отже магнітний опір на шляху проходження поздовжньої реакції якоря Φ_{ad} значно менший, ніж для потоку поперечної реакції якоря Φ_{aq} .

Приймаючи, що криві розподілу МРС $F_{ad} = f(x)$ і $F_{aq} = f(x)$ синусоїдальні на кожному полюсному поділку (криві 1, рис. 15.10),

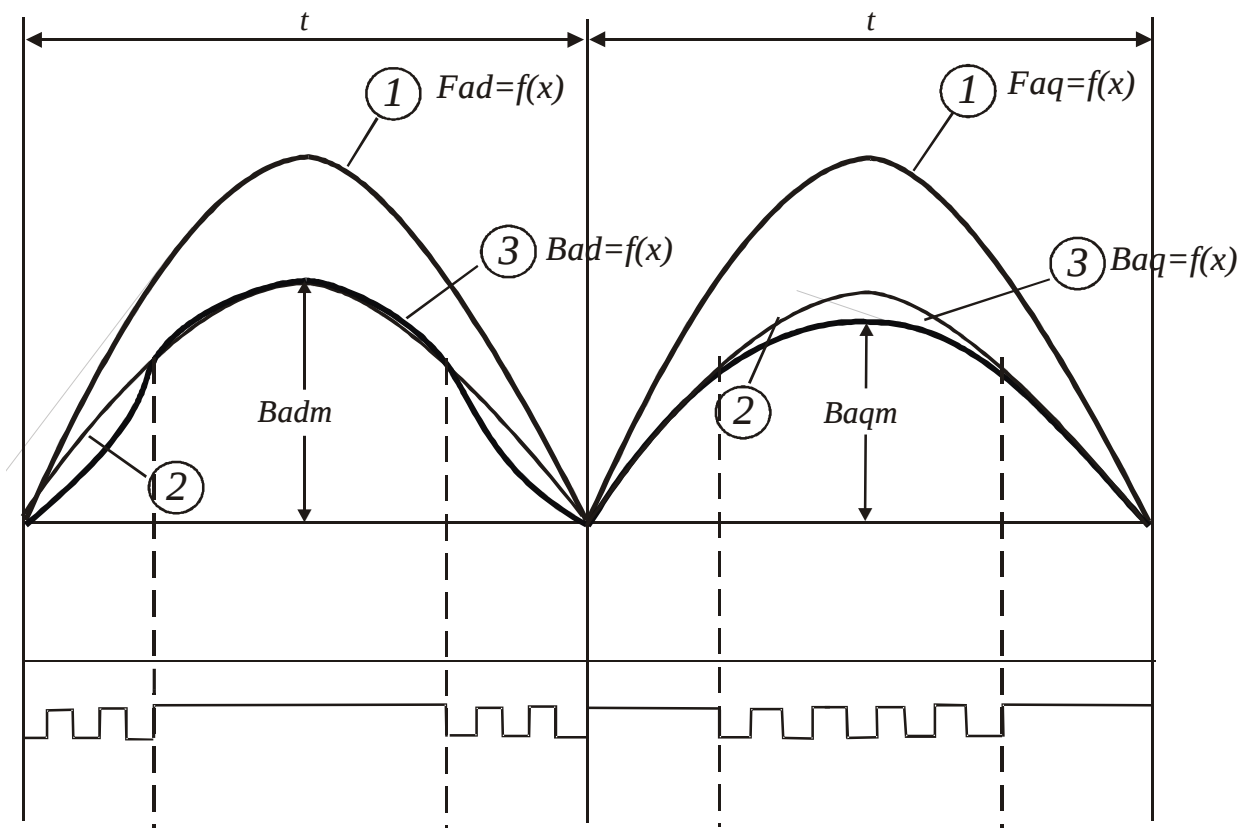


Рис. 15.8 Розподіл магнітної індукції поля реакції якоря в повітряному зазорі неявнополісної синхронної машини по поздовжній $d-d$ і поперечній $q-q$ осях

встановимо, яким чином розподіляється індукція магнітних полів поздовжньої і поперечної реакції якоря $B_{ad} = f(x)$ і $B_{aq} = f(x)$.

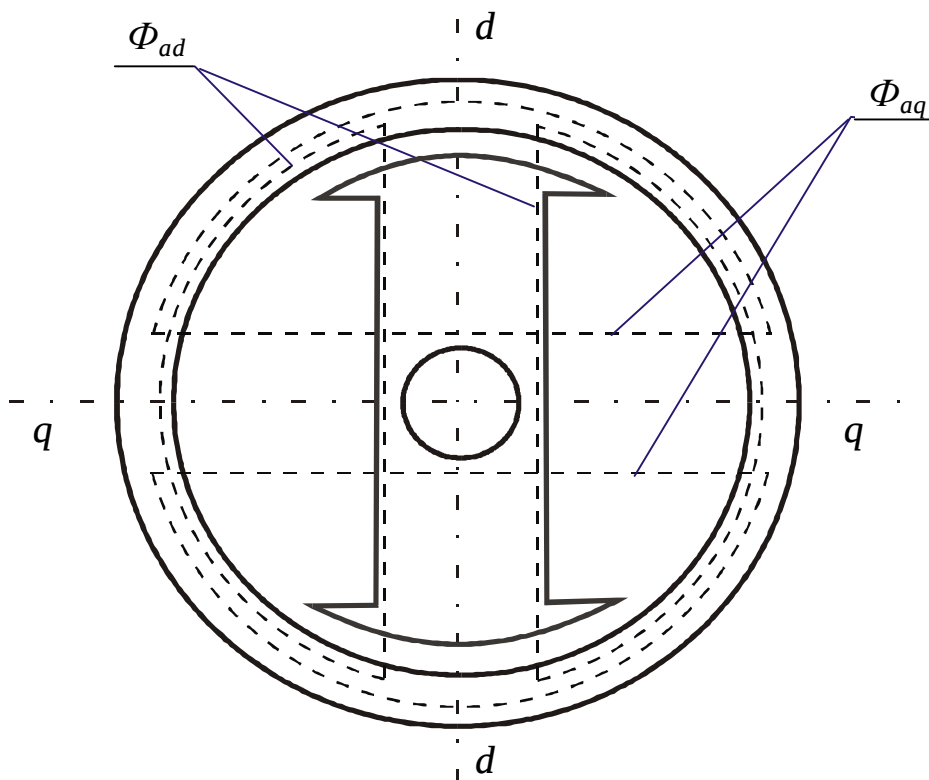


Рис. 15.9 Магнітне коло явнополісної синхронної машини

Якби повітряний зазор між статором і ротором був рівномірний, то індукція поля реакції якоря розподілялася б по тому ж законі що і МРС (криві 2, рис. 15.10).

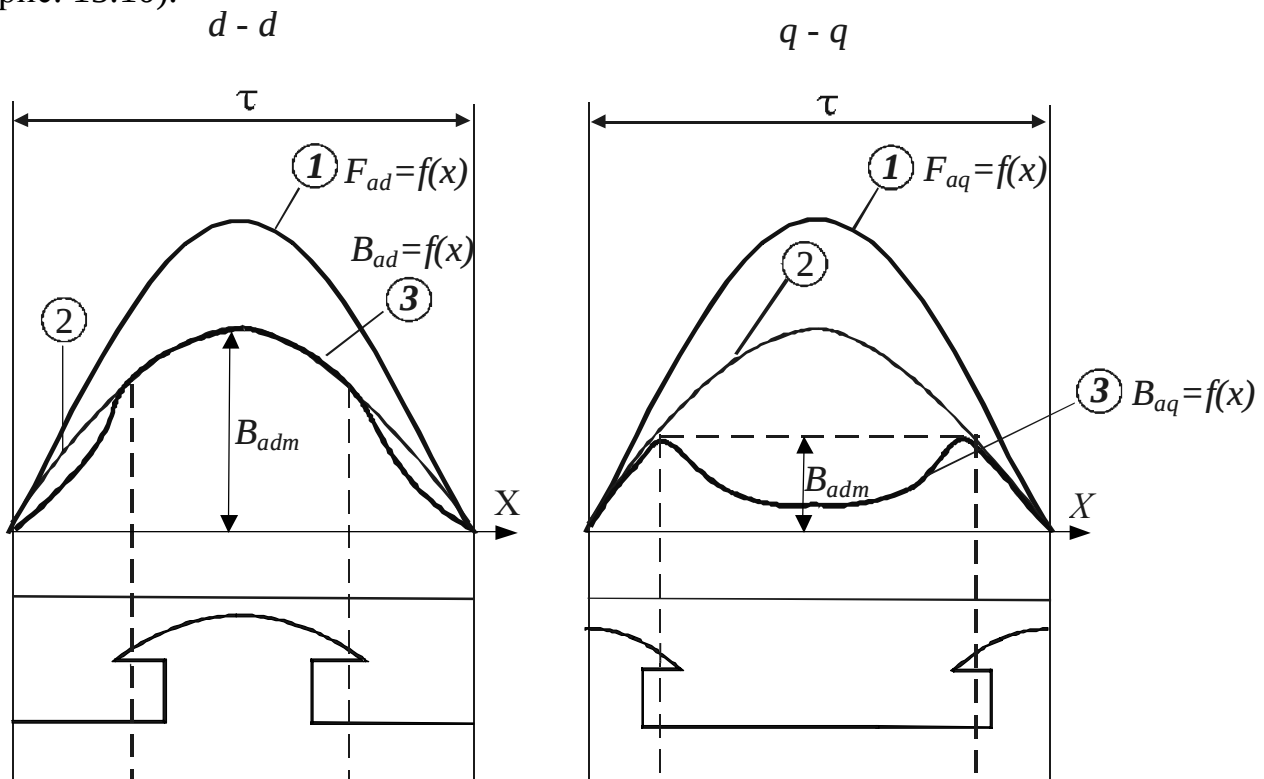


Рис. 15.10 Розподіл магнітної індукції поля реакції якоря в повітряному зазорі явнополусної синхронної машини по поздовжньої $d-d$ і поперечної $q-q$ осях

Але в області збільшеного повітряного зазору магнітний опір проходженню поля реакції якоря різко збільшується, відповідно значення індукції різко зменшується.

Форми кривих $B_{ad} = f(x)$ і $B_{aq} = f(x)$ (криві 3, рис. 15.10) у значній мірі різні. Тому в явнополусній синхронній машині облік реакції якоря ведеться по складовим – **поздовжній** і **поперечній**.

15.4 Основні векторні діаграми ЕРС явнополусного синхронного генератора

Вивчаючи фактори, від яких залежить напруга генератора, що працює під навантаженням, доцільно вважати, що в синхронному генераторі самостійно існують наступні магнітні потоки:

Φ_0 – основний магнітний потік, що індукує в обмотці якоря ЕРС E_0 ;

Φ_{ad} – потік поздовжньої реакції якоря, що індукує в обмотці якоря ЕРС E_{ad} ;

Φ_{aq} – потік поперечної реакції якоря, який індукує в обмотці якоря ЕРС E_{aq} .

У дійсності в генераторі, що працює під навантаженням, існує єдине результуюче магнітне поле з магнітним потоком на полюсному поділці в повітряному зазорі між статором і ротором Φ_p . Цей магнітний потік визначається через зазначені вище складові потоки у такий спосіб:

$$\Phi_p = \Phi_0 + \Phi_{ad} + \Phi_{aq}. \quad (15.4)$$

По другому закону Кірхгофа для кола обмотки якоря, з врахуванням зазначених вище ЕРС, рівняння рівноваги напруг записується в наступному виді:

$$\dot{U} = \dot{E}_0 + \dot{E}_{ad} + \dot{E}_{aq} - \dot{I}(r_a + jx_{\sigma a}), \quad (15.5)$$

де $\dot{I}(r_a + jx_{\sigma a})$ – спад напруги на активному та індуктивному опорах обмотки якоря генератора; U – вихідна напруга генератора, що працює під навантаженням.

Це рівняння враховує усі фактори, від яких залежить вихідна напруга U генератора, що працює під навантаженням.

Використовуючи це рівняння, розглянемо векторну діаграму ЕРС синхронного генератора для випадків $(r-L)$ і $(r-C)$ навантажень (рис. 15.11).

а)

б)

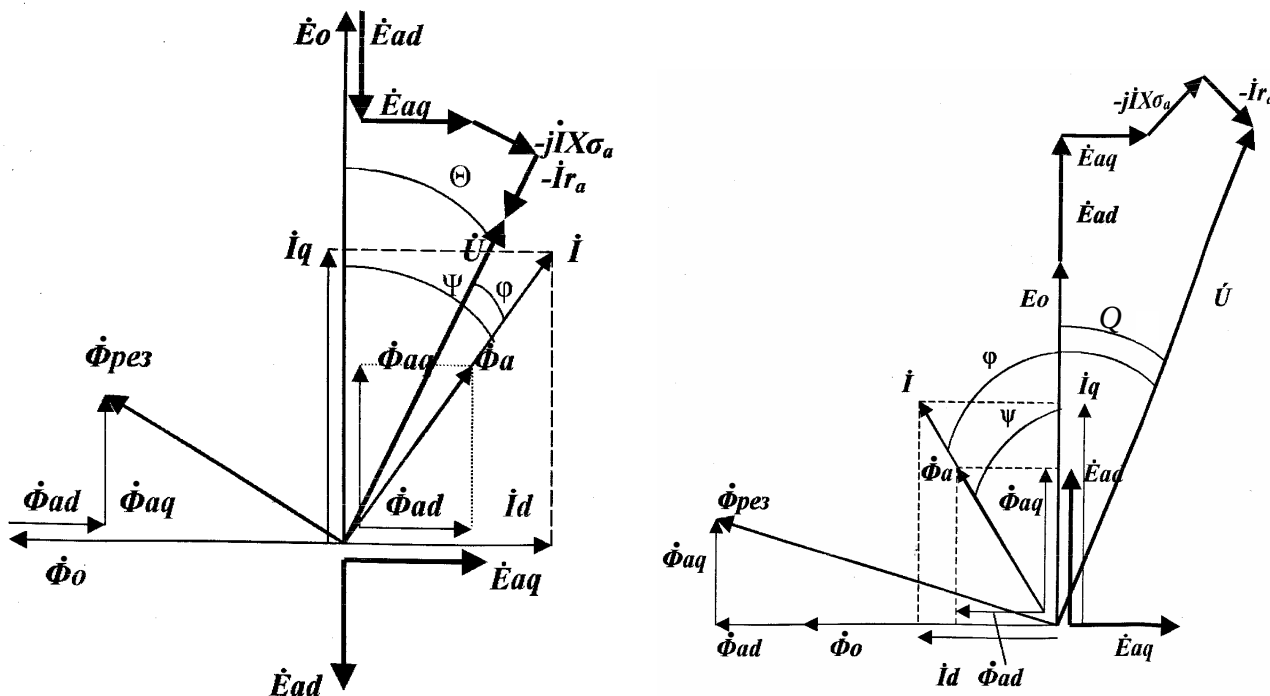


Рис. 15.11 Основні векторні діаграми ЕРС синхронного генератора при $r-L$ (а) і $r-C$ (б) навантаженнях

При побудові векторних діаграм явнополюсного синхронного генератора для випадків активно-індуктивного й активно-ємнісного навантажень спочатку

В процесі перетворення цієї векторної діаграми враховуємо, що $\vec{E}_{aq}$ і $\vec{E}_{ad}$ індукуються в обмотці якоря потоками Φ_{ad} і Φ_{aq} , отже, ці ЕРС запишуться у такий спосіб

$$\left. \begin{aligned} \vec{E}_{ad} &= -j\vec{I}_d x_{ad} \\ \vec{E}_{aq} &= -j\vec{I}_q x_{aq} \end{aligned} \right\}, \quad (15.6)$$

де x_{ad} і x_{aq} – реактивні опори обмотки якоря, що відповідають потокам по-довжньої Φ_{ad} і поперечної Φ_{aq} реакції якоря. Виконаємо на векторній діаграмі додаткові побудови і виразимо отримані відрізки у такий спосіб:

$$AC = AB + BC = AB + DF = E_{ad} + I \sin \gamma x_{sa} = I_d x_{ad} + I_d x_{sa} = I_d x_d = E_d, \quad (15.7)$$

де $x_d = x_{ad} + x_{sa}$ – поздовжній синхронний реактивний опір обмотки якоря.

$$\begin{aligned} CG = CF + FG = BD + FG &= E_{aq} + I \cos \gamma x_{sa} = \\ I_q x_{aq} + I_q x_{sa} &= I_q (x_{aq} + x_{sa}) = I_q x_q = E_q, \end{aligned} \quad (15.8)$$

де $x_q = x_{aq} + x_{sa}$ – поперечний синхронний реактивний опір обмотки якоря.

З огляду на зроблені перетворення відрізків векторної діаграми, а також нехтуючи спадом напруги $I r_a$ (оскільки воно мале) векторні діаграми ЕРС представимо (рис. 15.13).

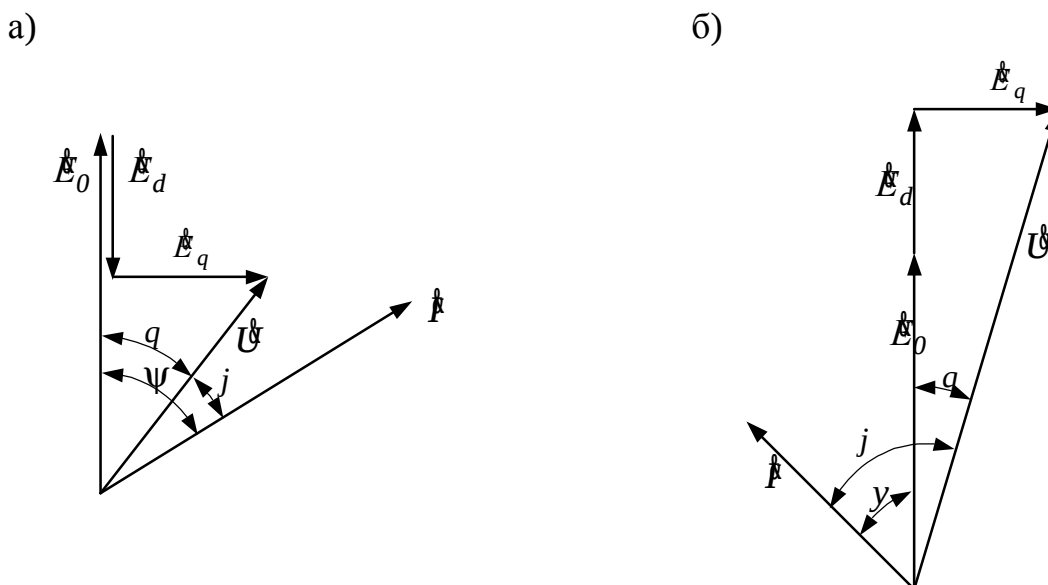


Рис. 15.13 Перетворені векторні діаграми ЕРС синхронного генератора при R-L (а) і R-C (б) навантаженнях

Отримані векторні діаграми називаються перетвореними векторними діаграмами синхронного генератора.

Контрольні питання

1. У чому виявляється явище реакції якоря?
2. Яка дія реакції якоря при активному, індуктивному і ємнісному навантаженнях синхронного генератора?
3. З яких ділянок складається магнітне коло явнополусної і неявнополусної синхронної машини?
4. Поясніть особливості обліку реакції якоря в явнополусних і неявнополусних синхронних машинах.
5. Які ЕРС наводять в обмотці статора явнополусного синхронного генератора магнітні потоки реакції якоря, і яким індуктивним опором ці ЕРС еквівалентні?

Глава 16. Робота синхронного генератора на автономне навантаження

16. 1 Робочі характеристики синхронного генератора

Синхронні генератори можуть працювати в режимі автономного навантаження і в режимі паралельної роботи на загальне навантаження.

При роботі синхронного генератора на автономне навантаження, його поводження описують робочі характеристики, до яких відносяться наступні залежності:

1. Навантажувальна характеристика

$$U = f(I_{\text{зб}}) \quad \text{при} \quad \begin{aligned} I &= \text{const}; \\ \cos \varphi &= \text{const}; \\ f &= \text{const}. \end{aligned}$$

В окремому випадку, тобто при $I = 0$ залежність $E_0 = f(I_{\text{зб}})$ є *характеристика холостого ходу*.

2. Зовнішня характеристика

$$U = f(I_{\text{зб}}) \quad \text{при} \quad \begin{aligned} I_{\text{зб}} &= \text{const}; \\ \cos j &= \text{const}; \\ f &= \text{const}. \end{aligned}$$

3. Регулювальна характеристика

$$I_{\text{зб}} = f(I) \quad \text{при} \quad \begin{aligned} U &= \text{const}; \\ \cos \varphi &= \text{const}; \\ f &= \text{const}. \end{aligned}$$

В окремому випадку, тобто при $U = 0$ залежність $I_k = f(I_{\text{зб}})$ – *характеристика короткого замикання*

Розглянемо ці характеристики, як отримані експериментально.

Характеристика холостого ходу являє собою залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу від струму збудження $E_0 = f(I_{\text{зб}})$ при $I = 0$, $f = \text{const}$.

Ця характеристика знімається при розімкнутих затискачах обмотки якоря. Її можна зняти при збільшенні струму збудження $I_{\text{зб}}$ (всхідна вітка), а також при зменшенні струму збудження (спадна вітка). За ДСТ знімається спадна віт-

ка характеристики від значення $E_0 = 1,2U_n$ (рис. 16. 1).

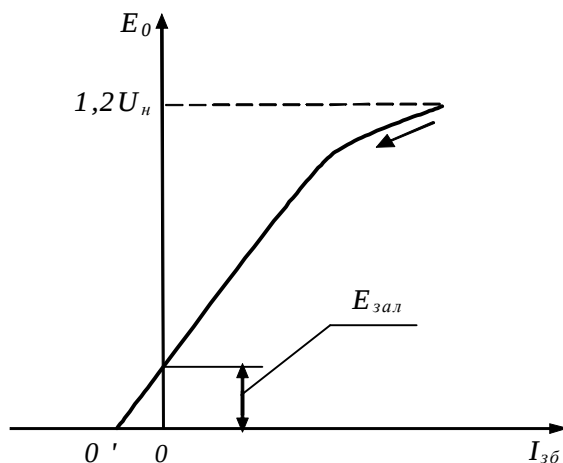


Рис. 16. 1 Характеристика холостого ходу синхронного генератора:
 $E_{зал}$ – ЕРС потоку залишкового намагнічування; $0'$ – початок координат для розрахункової характеристики холостого ходу

Якщо характеристики холостого ходу різних синхронних генераторів зобразити у відносних одиницях $E_* = f(I_{зб*})$, то ці характеристики мало відрізняються одна від одної і будуть дуже схожі з нормальною характеристикою холостого ходу, яку використовують при розрахунках синхронних машин:

E_*	0,58	1,0	1,21	1,33	1,4	1,46	1,51
$I_{зб*}$	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5

Тут $E_* = E_0 / U_{1n}$ – відносна ЕРС фази обмотки статора; $I_{зб*} = I_{зб.0} / I_{зб.n}$ – відносний струм збудження; $I_{зб.0}$ – струм збудження, в режимі холостого ходу, що відповідає ЕРС холостого ходу $E_0 = U_{1n}$.

Характеристика короткого замикання $I_k = f(I_{зб})$ при $U = 0$, $f = const$.

Для трифазного синхронного генератора ця характеристика може бути знята при одно-, дво- і трифазному короткому замиканні. Але основне значення має характеристика трифазного короткого замикання. Вона знімається при збільшенні струму збудження до значення струму обмотки якоря $I_k = 1,5I_n$.

В цих межах зміни струму збудження магнітне коло машини залишається ненасиченим, тому характеристика короткого замикання носить лінійний характер (рис. 16. 2).

Активний опір обмотки статора невеликий в порівнянні з її індуктивним опором, тому, приймаючи $r_1 \gg 0$, можна вважати, що при досліді короткого замикання навантаження синхронного генератора (його власні обмотки) є чисто індуктивне. З цього випливає, що при досліді короткого замикання реакція якоря синхронного генератора має поздовжньо-розмагнічуючий характер. Отже, ЕРС E_k , що індукується в обмотці статора, цілком врівноважується ЕРС

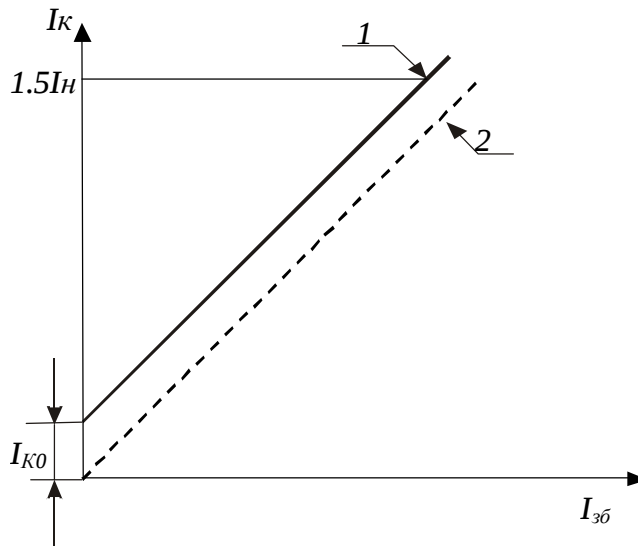


Рис. 16. 2 Характеристика короткого замикання синхронного генератора (1);
2 – розрахункова характеристика короткого замикання; $I_{к.об}$ – струм короткого замикання під дією ЕРС залишкового намагнічування

поздовжньої реакції якоря $\mathcal{E}_{ad} = -j\mathcal{F}_d x_{ad}$ і ЕРС розсіювання $\mathcal{E}_{sa} = -j\mathcal{F}_s x_{sa}$:

$$\mathcal{E}_k = \mathcal{E}_{ad} + \mathcal{E}_{sa} \quad (16. 1)$$

При цьому МРС обмотки збудження має як би дві складові: одна компенсує спадання напруги $j\mathcal{F}_s x_{sa}$, а інша компенсує розмагнічуючий вплив реакції якоря $j\mathcal{F}_d x_{ad}$.

Характеристики холостого ходу і короткого замикання дають можливість визначити значення струмів збудження, що відповідають зазначеним складовим МРС збудження. З цією метою характеристики холостого ходу і короткого замикання будують в одних осях (рис. 16. 3), при цьому на осі ординат відзначають відносні значення напруги холостого ходу $E_* = E_0 / U_n$ і струму короткого замикання $I_{k*} = I_k / I_n$. На осі ординат відкладають відрізок OB , що виражає в масштабі напруги значення ЕРС розсіювання $\mathcal{E}_{sa} = -j\mathcal{F}_s x_{sa}$. Потім точку B зносять на характеристику холостого ходу (точка B') і опускають перпендикуляр $B'D$ на вісь абсцис. Отримана у такий спосіб точка D розділила струм збудження $I_{зб.к.н.}$ на дві частини: $I_{зб.с.а}$ – струм збудження, необхідний для компенсації спаду напруги $I_n x_{sa}$ й $I_{зб.а}$ – струм збудження, що компенсує поздовжньо-розмагнічуючу реакцію якоря.

Один з важливих параметрів синхронної машини – **відношення короткого замикання (ВКЗ)**, що являє собою відношення струму збудження $I_{зб.0.н.}$, що відповідає номінальній напрузі при холостому ході, до струму збудження $I_{зб.к.н.}$, що відповідає номінальному струму обмотки якоря при досліді короткого замикання (рис. 16.3)

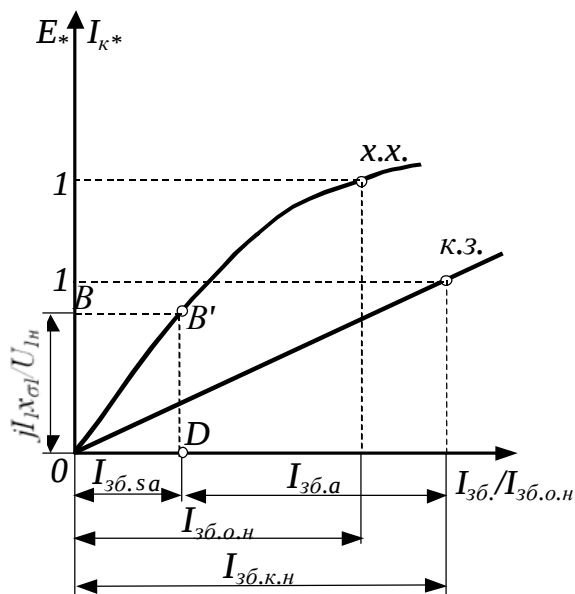


Рис. 16. 3 Визначення складових
стуму короткого замикання

$$BKЗ = \frac{I_{зб.о}}{I_{зб.к}}, \quad (16.2)$$

Значення ВКЗ у значній мірі визначає експлуатаційні властивості синхронних генераторів.

Чим вище ВКЗ, тим більш стійко працює синхронний генератор, тобто зміна його вихідної напруги не є значною при коливаннях навантаження (реакція якоря не робить істотного впливу). Але такі синхронні генератори дорогі і мають низьке використання активних матеріалів, тобто міді і стали на кіловат потужності.

Чим менше ВКЗ, тим менш стійко працює генератор (вплив реакції якоря є істотним), але такі генератори мають високе використання активних матеріалів на кіловат потужності.

Дослід експлуатації синхронних генераторів електричних станцій показав, що значення ВКЗ для гідрогенераторів і турбогенераторів повинні знаходитися в наступних межах: для гідрогенераторів $BKЗ = 1,0 - 1,4$; для турбогенераторів $BKЗ = 0,4 - 0,7$.

Звідси випливає, що гідрогенератори – це дорогі машини з низьким використанням активних матеріалів, але в енергетичній системі вони несуть основне навантаження, оскільки їхня електрична енергія є дешевою і вони забезпечують стійкість енергетичної системи.

Навпроти, турбогенератори, енергія яких є дорогою, розвантажуються в першу чергу при зменшенні навантаження в енергосистемі.

Навантажувальна характеристика $U = f(I_{зб})$ при $I = I_n$,
 $\cos j = const$, $f = const$.

З огляду на те, що навантаження синхронних генераторів може бути активним, індуктивним, ємнісним і змішаним, тобто значення $\cos \varphi$ можуть змінюватися в межах від нуля до одиниці, можна зняти сімейство кривих, що представляють навантажувальні характеристики. Але найбільше значення має навантажувальна характеристика, отримана при чисто індуктивному навантаженні (рис. 16. 4), що використовується при розрахунку реактивних елементів синхронного генератора.

Ця характеристика проходить паралельно характеристиці холостого ходу (рис. 16. 4).

При змішаному навантаженні ця характеристика не паралельна характеристиці холостого ходу і, як правило, не розглядається.

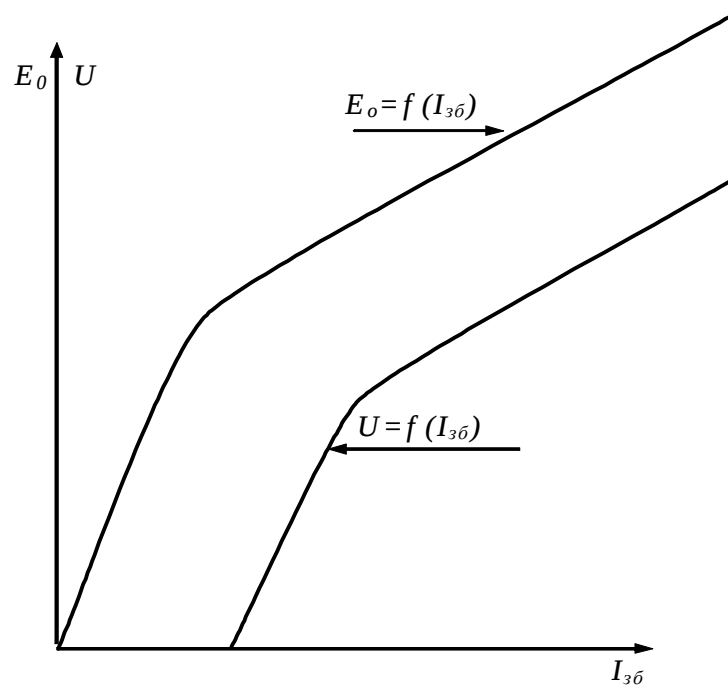


Рис. 16. 4 Характеристика холостого ходу і навантажувальна характеристика синхронного генератора

Зовнішня характеристика $U = f(I)$ при $I_{3б} = \text{const}$, $\cos j = \text{const}$, $f = \text{const}$.

На рис. 16. 5, а представлені зовнішні характеристики, що відповідають різним по характеру навантаженням синхронного генератора.

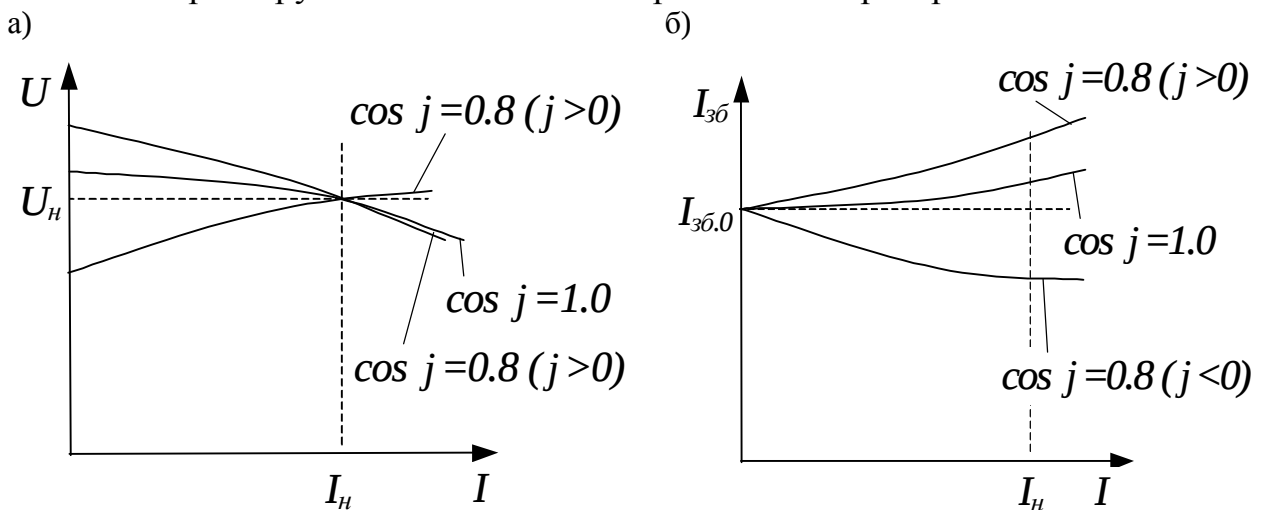


Рис. 16. 5 Зовнішні (а) і регулювальні (б) характеристики синхронного генератора

Вид зовнішніх характеристик пояснює рівняння напруг для кола обмотки якоря синхронного генератора, що працює під навантаженням.

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{ad} + \vec{E}_{aq} - \vec{I}(r_a + jx_{sa}) . \quad (16.3)$$

Відповідно до рівняння, вихідна напруга синхронного генератора U змі-

нюється при змінах навантаження генератора під дією двох факторів:

1. За рахунок зміни спаду напруги – $\Delta(r_a + jx_{sa})$;
2. Через вплив реакції якоря, що виражається через E_{ad} . Якщо навантаження активно-індуктивне, то напруга зменшується за рахунок E_{ad} , тому що поздовжня реакція якоря при цьому розмагнічуюча.

При активно-ємнісному навантаженні збільшення вихідної напруги відбувається:

1. За рахунок ЕРС E_{ad} , тому що поздовжня реакція намагнічуюча;
2. За рахунок спаду напруги – $jI x_{sa}$, тому що струм випереджальний стосовно напруги.

Регулювальна характеристика показує, як варто змінювати струм збудження генератора при змінах навантаження, щоб напруга на затискачах генератора залишалася незмінною і рівною номінальній: $I_{zb} = f(I)$ при $U = \text{const}$, $\cos j = \text{const}$, $f = \text{const}$.

З розглянутих вище зовнішніх характеристик випливає, що при збільшенні активного або активно-індуктивного навантаження, вихідна напруга синхронного генератора зменшується.

Щоб підтримувати її на визначеному рівні, необхідно збільшувати струм збудження. Навпроти, при збільшенні активно-ємнісного навантаження, напруга на виході генератора збільшується, отже, щоб підтримати її на визначеному рівні, необхідно зменшити струм збудження (рис. 16. 5, б).

16. 2 Зміна вихідної напруги синхронного генератора і діаграма електромагніторушійних сил (ЕМРС)

Під зміною напруги синхронного генератора розуміють підвищення або зниження напруги на затискачах обмотки якоря при змінах навантаження.

Під підвищенням напруги розуміємо виражену у відсотках від номінальної напруги U_n зміну напруги на затискачах обмотки якоря генератора при переході від номінального навантаження до режиму холостого ходу при незмінному струмі збудження і незмінній частоті обертання.

$$DU_{підв.} = \frac{E_0 - U_n}{U_n} 100\% .$$

Під зниженням вихідної напруги синхронного генератора розуміють виражену у відсотках від номінальної напруги зміну напруги на затискачах обмотки якоря при переході від режиму холостого ходу зі значенням $E_0 = U_n$ до номінального навантаження, що характеризується номінальним струмом при незмінному збудженні і частоті обертання.

Значення $DU_{підв.}$ і $DU_{зниж.}$ легко розрахувати, якщо відомі відповідні зо-

внішні характеристики.

З приведених зовнішніх характеристик випливає, що підвищення напруги генератора відбувається при скиданні навантаження (рис. 16. 6, а), а зниження при скиданні накиданні (рис. 16. 6, б).

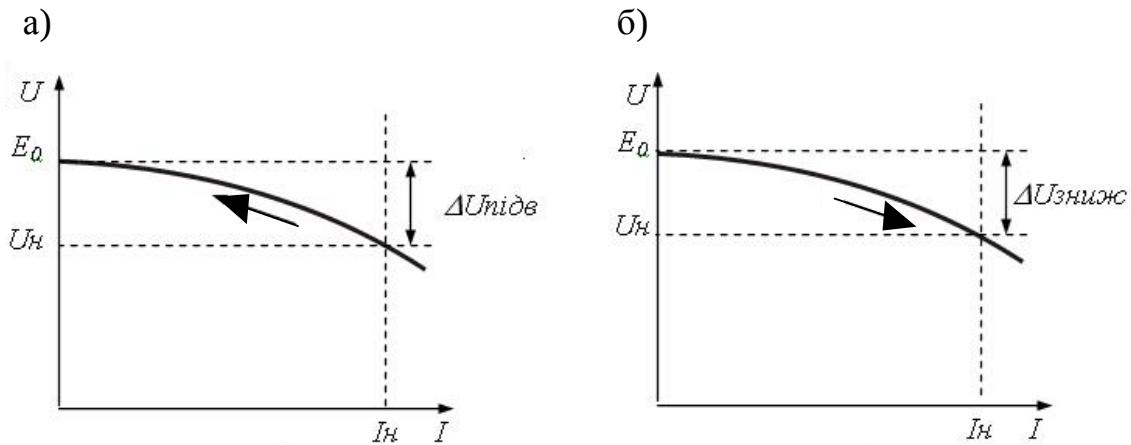


Рис. 16. 6 Зміна вихідної напруги синхронного генератора при скиданні (а) і накиданні (б) навантаження

У заводській практиці, наприклад, при проектуванні синхронного генератора, зміна вихідної напруги ΔU оцінюється розрахунковим шляхом. Методика такої оцінки заснована на використанні діаграми ЕМРС. Для побудови цієї діаграми використовують:

- а) характеристику холостого ходу $U_0 = f(I_{\text{зб}})$;
- б) характеристику короткого замикання $I_k = f(I_{\text{зб}})$;
- в) індуктивний опір розсіювання обмотки x_{sa} .

Як приклад розглянемо розрахунок підвищення напруги ΔU синхронного генератора при r - L навантаженні (рис. 16. 7).

Вважаємо, що спочатку генератор працював в номінальному режимі зі значеннями U_n , I_n , φ_n .

У відповідному масштабі відкладаємо вектори $\vec{U}_n$ і $\vec{I}_n$. Якби в генераторі, що працює під навантаженням була відсутня реакція якоря, то ЕРС обмотки якоря $\vec{E}_s$ відрізнялася б від $\vec{U}_n$ на величину спаду напруги $\vec{I}_n x_{sa}$ (спадом напруги $\vec{I}_n r_a$ нехтуємо). Підсумовуємо геометрично вектори $\vec{U}$ і $j\vec{I}_n x_{sa}$. Отримане $\vec{E}_s$ у виді відрізка переносимо на вісь ординат і по характеристиці холостого ходу знаходимо струм збудження $I_{\text{зб},0}$. Такий струм збудження був би достатній, щоб при відсутності реакції якоря, установити на затискачах синхронного генератора напругу U_n .

Але в дійсності в генераторі, що працює під навантаженням, діє реакція якоря. Тому частина МРС збудження йде на компенсацію реакції якоря. Цієї МРС збудження відповідає складова струму збудження $I_{\text{зб},a}$, яку знаходимо використовуючи характеристику короткого замикання.

Щоб одержати струм збудження $I_{зб.}$, який потрібно, щоб у генераторі при обліку дії реакції якоря, була напруга U_n , необхідно скласти геометрично струм збудження $I_{зб.а}$ і $I_{зб.р}$.

$$DU_{ni\delta\%} = \frac{E_0 - U_H}{U_H} 100\% = \frac{AC - BC}{BC} 100\% = \frac{AB}{BC} 100\%.$$

16.3 Розрахунок реактивних параметрів синхронного генератора

Найважливішими параметрами синхронного генератора є реактивні опори x_d , x_q , $x_{s a}$, що використовуються при розрахунках сталого режиму роботи синхронного генератора.

Розглянемо методику розрахунку цих параметрів. При розрахунку цих опорів використовують:

- 1) характеристику холостого ходу. $U_0 = f(I_{3\phi})$;
- 2) навантажувальну характеристику при чисто індуктивному навантаженні $U = f(I_{3\phi})$ при $I = I_n$, $\cos j = 0$.
- 3) характеристику трифазного короткого замикання $I_k = f(I_{3\phi})$.

Подовжній синхронний опір x_d При роботі синхронного генератора під навантаженням для кола обмотки якоря справедливе рівняння рівноваги напруг (16. 3)

$$\vec{U} = \vec{E}_0 + \vec{E}_{ad} + \vec{E}_{aq} - \vec{I}(r_a + jx_{s a})$$

В окремому випадку, при трифазному короткому замиканні, з огляду на, те, що I_k протікає головним чином по колу з індуктивним опором, зазначене вище рівняння здобуває наступний вид

$$0 = \vec{E}_{0k} + \vec{E}_{ad} - j\vec{I}_k x_{s a} \quad (16.4)$$

В цьому рівнянні враховано, що струм короткого замикання I_k циркулює по замкнутому контуру обмотки якоря, що має, головним чином, індуктивний опір. Тому поперечна реакція якоря відсутня ($\vec{E}_{aq} = 0$), крім того нехтуємо спадом напруги $\vec{I}_k r_a$.

Перетворимо рівняння 16. 4 з врахуванням того, що $\vec{E}_{ad} = -j\vec{I}_k x_{ad}$.

Отже,

$$\vec{E}_{0k} = j\vec{I}_k x_{ad} + j\vec{I}_k x_{s a} = j\vec{I}_k (x_{ad} + x_{s a}) = j\vec{I}_k x_d \quad (16.5)$$

Використовуючи діючі значення ЕРС і струму, знаходимо значення x_d при відсутності насичення магнітного кола генератора. Оскільки в режимі короткого замикання магнітне коло генератора не насичене

$$x_{d(ненас)} = \frac{E_{0k}}{I_k}. \quad (16.6)$$

З виразу 16.6 випливає, що x_d можна розрахувати, використовуючи характеристики холостого ходу і короткого замикання.

З приведених характеристик знаходимо ненасичене значення $x_{d(\text{ненас.})}$

$$x_{d(\text{ненас.})} = \frac{ACm_U}{BCm_I}, \quad (16.7)$$

де m_U і m_I – масштаби напруги і струму.

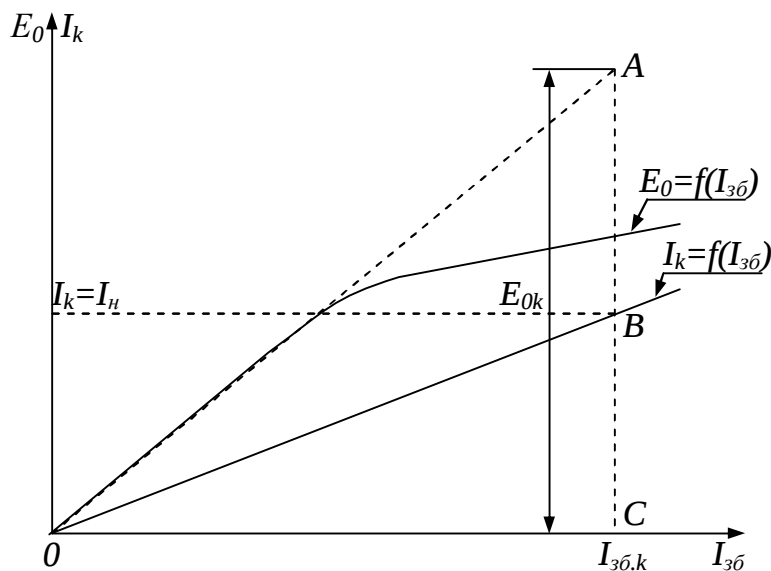


Рис. 16.8. До визначення поздовжнього-реактивного опору обмотки якоря $x_{d(\text{ненас.})}$

При роботі синхронного генератора під навантаженням, його магнітне коло трохи насичене. Це приводить до деякого зменшення потоку поздовжньої реакції якоря Φ_{ad} і відповідному зменшенню ЕРС E_{ad} і опору x_{ad} , а також x_d , що дорівнює

$$x_d = x_{ad} + x_{sa}.$$

Щоб знайти насичене значення x_d , розглянемо перетворену векторну діаграму ЕРС синхронного генератора при чисто індуктивному навантаженні.

Перейдемо від векторної діаграми (рис. 16.9, а) до характеристик $E_0 = f(I_{\phi})$ і $U = f(I_{\phi})$ при $I = I_n$ і $\cos j = 0$ ($\varphi = +90^\circ$) (рис. 16.9, б).

На приведеній векторній діаграмі і на характеристиках відрізок $AB = A_1 B_1 \sim I_n x_d$

Звідси випливає, що

$$x_{d(\text{нас.})} = \frac{A_1 B_1 \cdot m_u}{I_n} \quad (16.8)$$

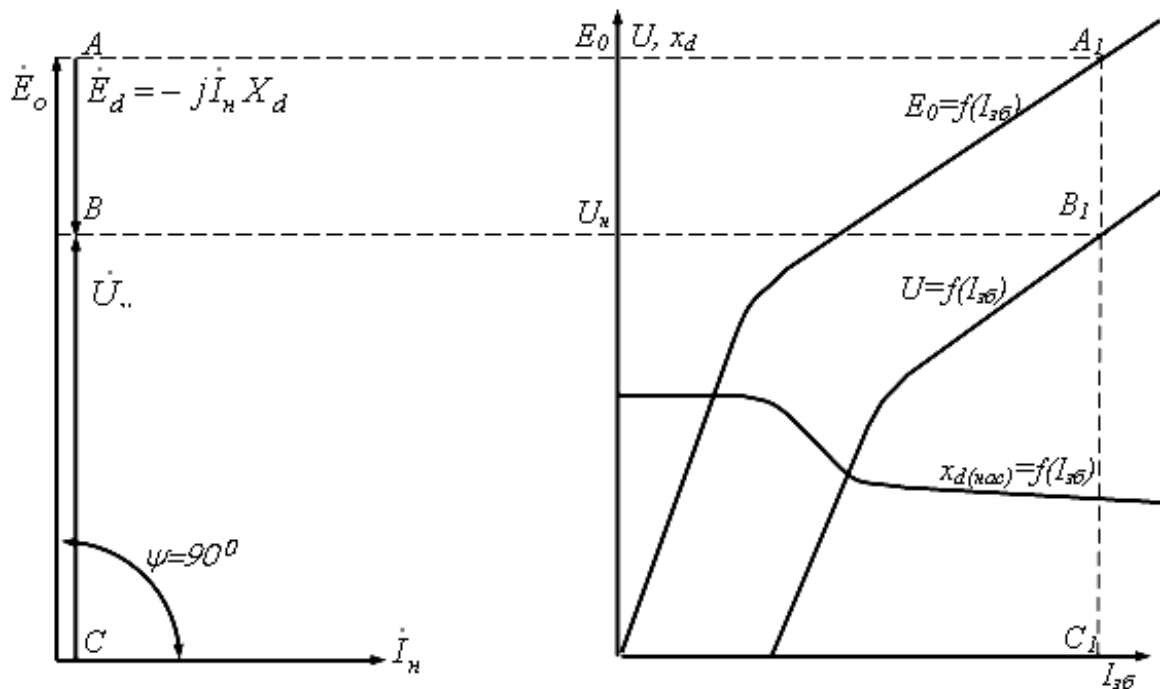


Рис. 16. 9 До визначення подовжнього синхронного реактивного опору обмотки якоря $x_{d(нас)}$

Якщо взяти ряд значень струму збудження $I_{зб}$ і для кожного з цих значень розрахувати, зазначеним вище методом $x_{d(нас)}$, одержимо залежність

$$x_{d(нас)} = f(I_{зб})$$

Характерний вид такої залежності приведений на рис. 16.9, б. Таким чином,, якщо $x_{d(ненас)}$ величина постійна, то $x_{d(нас)}$ величина змінна, залежна від магнітного стану синхронного генератора, тобто від ступеню насичення.

Поперечний синхронний реактивний опір x_q . В неявнополюсних синхронних генераторів повітряний зазор між статором і ротором практично рівномірний. Отже, магнітна провідність по поздовжній і поперечній осях машини однакова. Тому в цих генераторів $x_{ad} \approx x_{aq}$ і відповідно

$$x_{d(ненас)} \approx x_q \quad (16.9)$$

В явнополюсного синхронного генератора повітряний зазор між статором і ротором у значній мірі нерівномірний, тобто, магнітний опір потоку поздовжньої реакції якоря менше, ніж поперечної реакції якоря. З цієї причини в явнополюсного синхронного генератора

$$\Phi_{ad} > \Phi_{aq} \quad (16.10)$$

Отже,

$$x_{ad} > x_{aq} \Rightarrow x_d > x_q \quad (16.11)$$

За даними Санкт-Петербурзького заводу “Електросила” для явнополюсних синхронних генераторів нормального виконання, можна прийняти, що

$$x_q = 0.6 x_{d(\text{ненас})} \quad (16.12)$$

Індуктивний опір розсіювання обмотки якоря x_{sa} . При розрахунку цього параметра використовують характеристики:

1. $E_0 = f(I_{3\phi})$ – характеристика холостого ходу.
2. $U = f(I_{3\phi})$ при $I = I_n$ і $\cos j = 0$ ($\varphi = +90^\circ$) – навантажувальна характеристика при чисто індуктивному навантаженні.

Раніше було встановлено, що в реактивному трикутнику ABC катет $AB \sim I_n x_{sa}$. Якщо перемістити цей трикутник паралельно самому собі таким чином, щоб його вершина A ковзала по характеристиці холостого ходу, тоді вершина C буде ковзати по навантажувальній характеристиці $U = f(I_{3\phi})$ при $I = I_n$ і $\cos j = 0$ (рис. 16. 10).

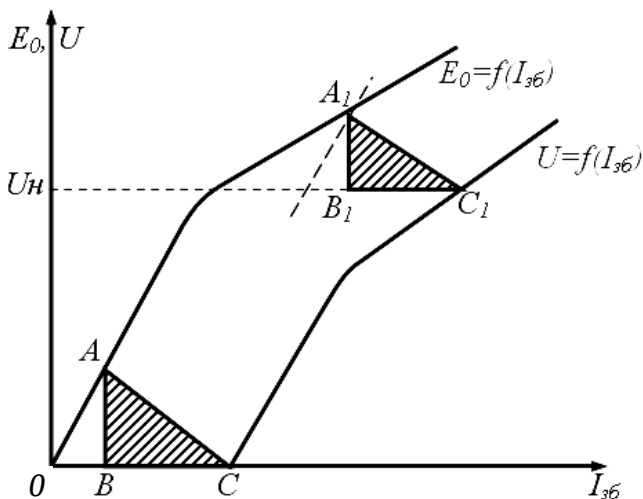


Рис. 16. 10 До визначення індуктивного опору розсіювання обмотки якоря x_{sa}

Отриманий трикутник $A_1B_1C_1$ також є реактивним трикутником. З цього трикутника знаходимо

$$x_{sa} = \frac{A_1B_1 \cdot m_U}{I_n}, \quad (16.13)$$

де m_U – масштаб по напрузі.

Звідси випливає, що розрахунок індуктивного опору x_{sa} зручно робити наступним методом.

На навантажувальній характеристиці $U = f(I_{3\phi})$ знаходимо точку C_1 , що відповідає номінальній напрузі U_n . Від точки C_1 уліво відкладаємо відрізок $O_1C_1 = OC$. Через точку O_1 проводимо пряму паралельну початковій частині характеристики холостого ходу до перетину з характеристикою холостого ходу і у такий спосіб знаходимо точку перетину A_1 . З точки A_1 опускаємо перпендикуляр A_1B_1 на O_1C_1 .

Отриманий трикутник $A_1B_1C_1$ також є реактивним трикутником. З цього трикутника знаходимо

16. 4 Енергетична діаграма, втрати і ККД синхронного генератора

В синхронних генераторах відбувається перетворення механічної потужності, що підводиться P_1 , в електричну потужність, що віддається навантаженню P_2 .

Розглянемо цей процес на прикладі енергетичної діаграми (рис. 16. 11).

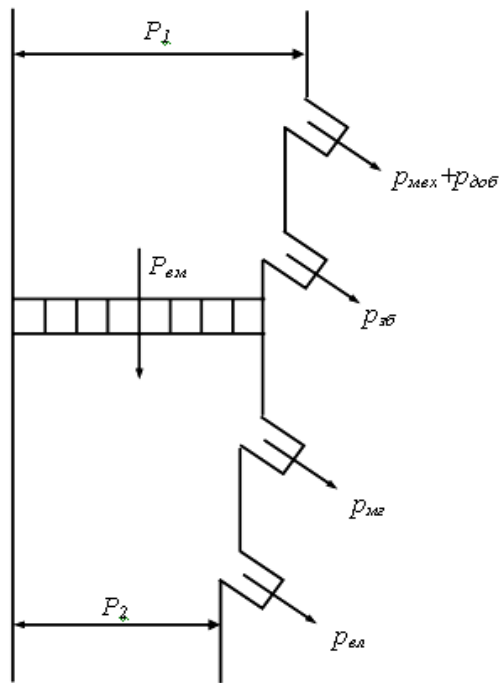


Рис. 16. 11 Енергетична діаграма синхронного генератора

P_1 – механічна потужність, що підводиться з боку ротора, і становить потужність приводного двигуна (турбіни).

На шляху перетворення цієї потужності в роторі мають місце наступні активні втрати:

$p_{мех} + p_{дод} = P_0$ – втрати холостого ходу;

$p_{мех}$ – механічні втрати в підшипниках, втрати на тертя щіток об контактні кільця, вентиляційні втрати;

$p_{дод}$ – додаткові втрати, що становлять втрати в сталі конструктивних деталей від потоків розсіювання;

$p_{зб} = U_{зб} I_{зб}$ – електричні втрати в обмотці збудження (для генераторів із самозбудженням).

Частина потужності, що залишилася, передається електромагнітним шляхом на статор і становить електромагнітну потужність $P_{ем}$:

$$P_{ем} = P_1 - (p_{мех} + p_{дод} + p_{зб}) . \quad (16.14)$$

В статорі мають місце наступні види активних втрат:

$p_{мг}$ – магнітні втрати в пакеті сталі статора, тобто втрати на гістерезис (перемagnічування) і втрати на вихрові струми;

$P_{ел} = m_1 I_1^2 r_1$ – електричні втрати в обмотці якоря.

Частина потужності, що залишилася, становить електричну **потужність** P_2 , яка корисно віддається в навантаження (потужність на затискачах обмотки якоря)

$$P_2 = P_{ем} - (p_{мг} + p_{ел}) . \quad (16. 15)$$

ККД синхронного генератора визначається загальною залежністю

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

Однак, при розрахунку ККД, з високим ступенем точності можна виміряти тільки потужність P_2 , а механічну потужність P_1 виражають як

$$P_1 = P_2 + \sum p,$$

де $\sum p = p_{\text{мех}} + p_{\text{дод}} + p_{\text{зб}} + p_{\text{мг}} + p_{\text{ел}}$.

Ці втрати піддаються обліку.

Таким чином, розрахункова залежність для ККД синхронного генератора має наступний вид:

$$h = \frac{P_2}{P_2 + \sum p} = 1 - \frac{\sum p}{P_2 + \sum p}. \quad (16.16)$$

ККД сучасних синхронних генераторів досягає 90% і більше, тобто, чим більше потужність машини, тим вищий коефіцієнт корисної дії.

16. 5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора, кутова характеристика

Як впливає з енергетичної діаграми (рис. 16.11)

$$P_{em} = P_2 + p_{mg} + p_{el}.$$

Якщо знехтувати втратами в статорі ($p_{mg} + p_{el}$), то

$$P_{em} = P_2 = mUI \cos j, \quad (16.17)$$

де m – число фаз обмотки якоря; U, I – напруга і струм обмотки якоря; $\cos \varphi$ – коефіцієнт потужності, обумовлений навантаженням генератора.

Проаналізуємо цей вираз, використовуючи перетворену векторну діаграму синхронного генератора для випадку (r - L) навантаження (рис. 16. 12).

З векторної діаграми випливає: $j = y - q$. Отже, використовуючи приведені залежності, можна записати

$$\begin{aligned} P_{em} &= mUI \cos(y - q) = mUI \underbrace{\cos y}_{I_q} \underbrace{\cos q}_3 + mUI \underbrace{\sin y}_{I_d} \underbrace{\sin q}_3 = \\ &= mUI_q \cos q + mUI_d \sin q. \end{aligned} \quad (16.18)$$

E_0);

$$P_{\delta} = \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2q - \text{додаткова складова електромагнітної потужності генератора, що не залежить від струму збудження, тобто цю потужність генератор розвиває і при відсутності збудження.}$$

Фізично пояснити наявність потужності P_{δ} можна у такий спосіб. Якщо ротор явнополісний, то він завжди прагне зайняти таке положення щодо обертового магнітного поля статора, щоб магнітний опір на шляху проходження силових ліній цього поля був найменшим.

Якщо ротор генератора неявнополісний, то при будь-якій положенні цього ротора магнітний опір на шляху проходження силових ліній поля статора однаковий. Крім того, з огляду на те, що в неявнополісного синхронного генератора $x_d \approx x_q \Rightarrow P_{\delta} = 0$, отже вираз для електромагнітної потужності буде мати вид

$$P_{em} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin q. \quad (16.22)$$

У тому випадку, коли генератор працює при незмінному збудженні $E_0 = \text{const}$ на мережу нескінченної потужності, тобто $U = \text{const}$, одержуємо залежність $P_{em} = f(q)$, що називається кутовою характеристикою синхронного генератора.

Графічне представлення кутової характеристики знаходимо по складовим електромагнітній потужності (рис. 16. 13).

При роботі синхронного генератора в сталому режимі під навантаженням обертальний момент приводного двигуна M_1 урівноважений протидіючим електромагнітним моментом генератора M_{em} і моментом M_0 , що відповідає втра-там холостого ходу. Отже, в цьому режимі справедливе наступне рівняння рівноваги моментів

$$M_1 = M_{em} + M_0. \quad (16.23)$$

Електромагнітний момент для неявнополісного синхронного генератора визначається з виразом

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega_1} = \frac{mUE_0}{\omega_1 x_d} \sin q, \quad (16.24)$$

де $\omega_1 = 2\pi n_1$ – кутова частота обертання ротора, $[rad/c]$.

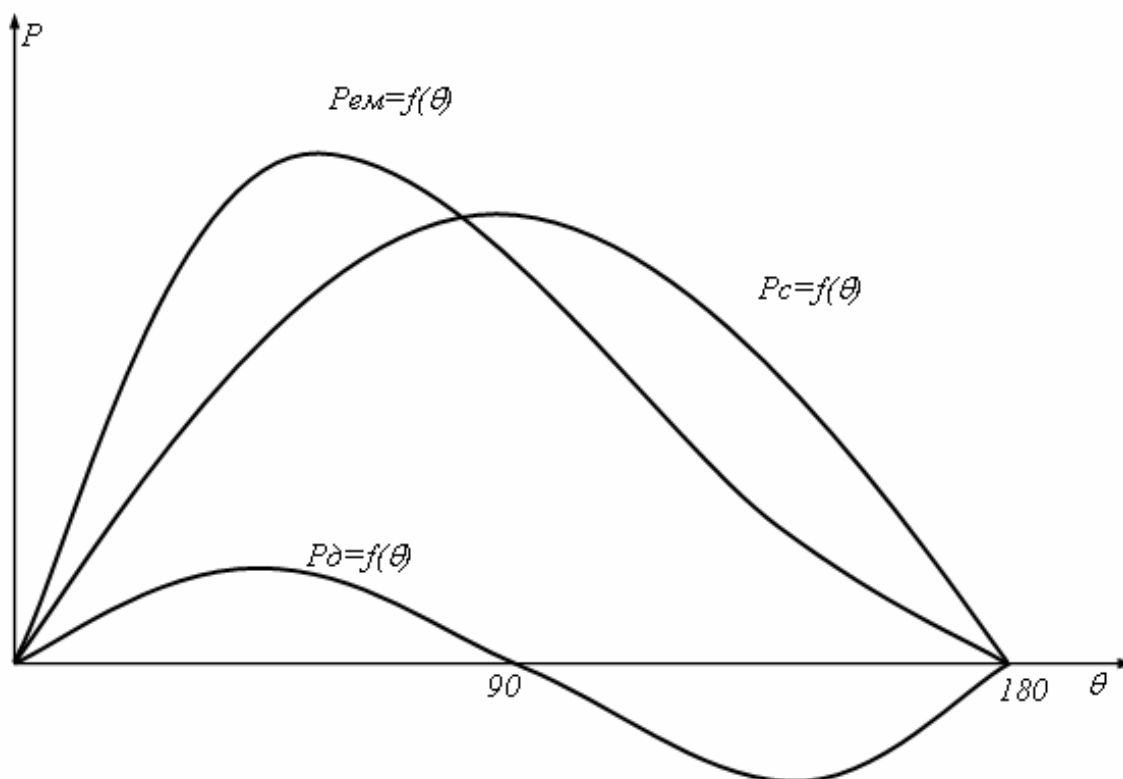


Рис. 16. 13 Кутова характеристика синхронного генератора

Оскільки P_{em} явнополюсного генератора має дві складові P_c і P_d , очевидно, що електромагнітний момент цього генератора також має дві складові, що змінюються за законом $\sin q$ і $\sin 2q$

$$M_c = \frac{P_c}{w_1} \quad \text{і} \quad M_d = \frac{P_d}{w_1}.$$

Або

$$M_{em} = \frac{mUE_o}{w_1 x_d} \sin q + \frac{mU^2}{2w_1} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2q. \quad (16.25)$$

Як видно з виразів (16.21) і (16.25) електромагнітна потужність і електромагнітний момент в явнополюсній синхронній машині залежить не тільки від струму збудження, але і від параметрів синхронної машини по поздовжній і поперечній осях.

Контрольні питання

1. Як знімаються характеристики холостого ходу, короткого замикання, зовнішня і регулювальна характеристики?
2. Чому характеристика короткого замикання синхронної машини має вид прямої лінії?
3. Що таке ВКЗ і як впливає цей параметр на властивості синхронного генератора?
4. Що така номінальна зміна напруги при скиданні навантаження і чому при ємнісному навантаженні його величина негативна?
5. Для чого призначена діаграма електромагніторушійних сил?
6. Як розрахувати реактивні параметри синхронного генератора?
7. Які види втрат мають місце в синхронному генераторі?

Глава 17. Паралельна робота синхронних генераторів

17.1 Загальні відомості

На сучасних електростанціях, як правило, встановлено кілька синхронних генераторів, що підключені до загальної мережі, тобто працюють на загальне навантаження, або генератори включені на паралельну роботу.

Паралельна робота генераторів на електричних станціях має наступні переваги:

- так як навантаження електростанції змінюється в плині доби, а також перетерплює сезонні зміни, то в періоди малих навантажень частина генераторів відключається, чим підвищується економічність роботи електростанції;
- потужність сучасних електростанцій така, що виконати генератор на таку потужність, складна технічна задача.

Якщо взяти на розгляд енергетичну систему, то в ній на загальне навантаження працює велика кількість електростанцій, отже в цій системі на паралельну роботу включене велике число синхронних генераторів.

Це має також свої переваги:

- з'являється резерв генераторів на випадок ремонту або аварій генераторів якої-небудь з електростанцій, так як навантаження розподіляється між іншими працюючими генераторами.
- поліпшується економічність роботи гідравлічних станцій, енергія яких є дешевою, оскільки в періоди малих навантажень в першу чергу розвантажуються теплові електростанції.

17.2 Умови вмикання синхронного генератора на паралельну роботу

Ввімкнути генератор в мережу з паралельно працюючими генераторами можна способом точної синхронізації або способом самосинхронізації.

Метод точної синхронізації. При вмиканні синхронного генератора на паралельну роботу методом точної синхронізації спочатку вмикається його приводний двигун, потім подається збудження і після цього виконується синхронізація генератора з мережею.

Процес синхронізації полягає в тому, що в момент вмикання генератора в мережу необхідно виконати наступні умови:

- 1) напруга на затискачах обмотки якоря генератора, що вмикається, повинна бути рівною напрузі *мережі* ($U_{\text{г}} = U_{\text{м}}$);
- 2) частота напруги генератора, що вмикається, повинна дорівнювати частоті напруги *мережі* ($f_{\text{г}} = f_{\text{м}}$);
- 3) полярність затискачів обмотки якоря повинна відповідати полярності затискачів мережі;
- 4) порядок переміжування фаз генератора і мережі повинні бути однаковими.

Розглянемо вмикання синхронного генератора на паралельну роботу *методом точної синхронізації*. Для цього скористаємося принциповою схемою представленою на рис. 17.1.

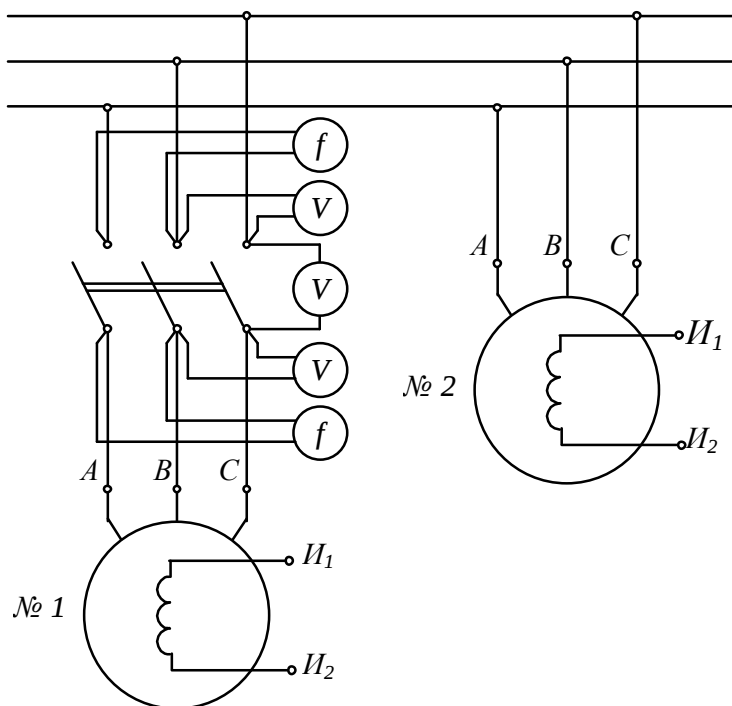


Рис. 17.1 Вмикання синхронного генератора на паралельну роботу

Вмикання генератора 1 на паралельну роботу з мережею починається з пуску його приводного двигуна. Після цього виконується синхронізація з мережею:

Перша умова, тобто рівність напруг генератора і мережі забезпечується регулюванням струму збудження генератора.

Контролюється виконання цієї умови вольтметрами, один із яких ввімкнений в коло генератора, інший до мережі.

Друга умова, тобто рівність частот генератора і мережі, забезпечується регулюванням частоти обертання приводного двигуна.

При цьому необхідно врахувати, що зі зміною частоти обертання приводного двигуна, змінюється вихідна напруга генератора. Отже, потрібно відповідне регулювання струму збудження генератора, щоб забезпечити виконання першої умови.

Рівність частот контролюється частотомірами, підключеними відповідно до генератора і мережі.

Третя умова, тобто відповідність полярності затисків обмотки якоря генератора полярності мережі контролюється так називаним нульовим вольтметром, ввімкненим у розсічку якої-небудь фази між генератором і мережею.

Четверта умова, тобто порядок переміжування фаз генератора і мережі може бути проконтрольовано різними способами, наприклад, за допомогою фазопоказчика. Однак, ця і попередня умови, як правило, контролюються синхроноскопом.

Найпростіший синхроскоп виконується на лампах накаливання по двом схемам (рис. 17.2).

В схемі на "**потухання**" рис. 17.2, а в процесі синхронізації генератора з мережею спостерігається одночасні миготіння всіх лампочок.

Чим ближче частота генератора f_g до частоти мережі f_m , тим рідше миготіння лампочок синхроскопа. Коли настає момент, сприятливий для вмикання генератора в мережу, усі лампи цього синхроскопа погашені.

В схемі «**на обертання вогню**» (рис. 17.2, б) в процесі синхронізації з мережею спостерігається ефект обертового вогню.

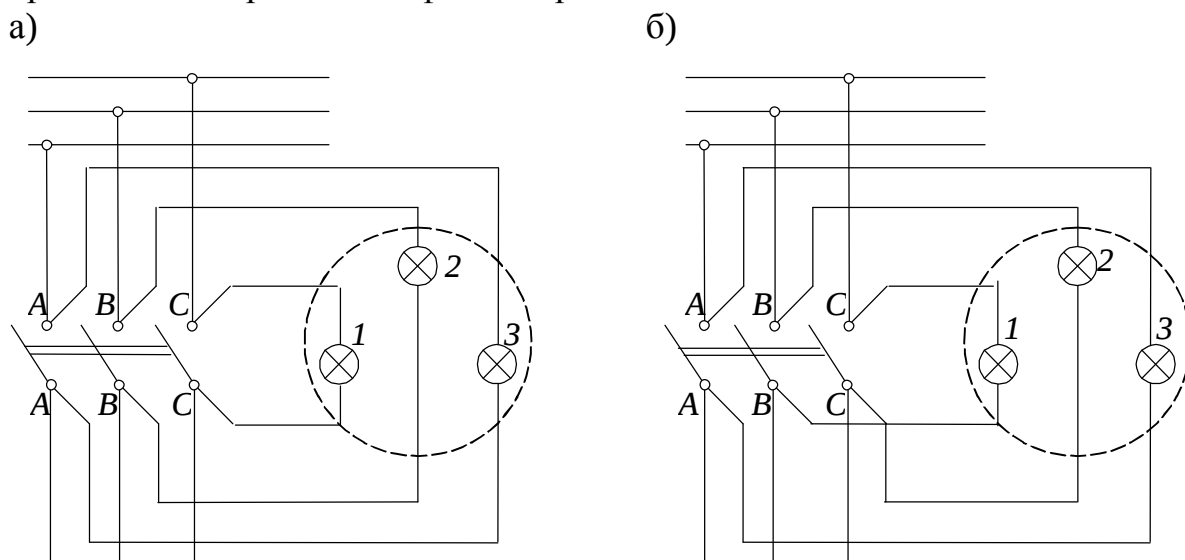


Рис. 17.2 Лампові синхроскопи: а) "на потухання"; б) "на обертання вогню"

Коли настає момент, сприятливий для вмикання генератора в мережу, ефект обертового вогню в цьому синхроскопі припиняється.

4-та умова, тобто відповідність порядку перемижування фаз генератора і мережі може бути проконтрольовано, якщо синхроскоп зібраний за схемою рис. 17.2, а.

У тому випадку, коли в схемі спостерігається ефект обертання вогню, то порядок перемижування фаз генератора і мережі не однаковий.

Перераховані вище прилади, що контролюють процес синхронізації і синхроскоп, входять до складу синхронізуючої колонки генератора.

Розглянемо, що відбудеться, якщо ввімкнути на паралельну роботу генератор в якого (інші умови паралельної роботи виконані):

- напруги $U_g \neq U_m$ – з'явиться реактивний вирівняльний струм, що вирівнює напругу генератора і мережі. Він перевантажує обмотки генераторів, що не дає можливості використовувати їх на повну потужність і створює додаткові втрати на нагрівання обмоток статора;

- напруги генераторів і мережі зсунуті по фазі на кут менший 180° – з'явиться вирівняльний струм з великою активною складовою, який створює механічний поштовх на роторі генератора в напрямку, зворотному напрямку обертання генератора і кут між U_g і U_m встановиться 180° ;

- частоти генератора f_g і мережі f_m не рівні ($f_g \neq f_m$) – з'явиться вирівняльний струм, який різко змінюється по амплітуді, тому що ΔU коливається від 0 до $2U_\phi$.
- різний порядок переміжування фаз – у двох фазах з'явиться великий вирівняльний струм.

Метод самосинхронізації. Описаний вище спосіб вмикання в мережу синхронних генераторів відносно складний, вимагає великої точності і є дуже відповідальним. Тому останнім часом в наших енергосистемах впроваджується вмикання синхронних генераторів в мережу по методу *самосинхронізації* (грубої синхронізації). Сутність методу полягає в наступному: генератор приводиться в обертання первинним двигуном з частотою, що може відрізнятися від синхронної на $\pm (2,5\%)$, і вмикається в мережу *без збудження*, причому обмотка ротора, щоб уникнути перенапруги в момент вмикання, замикається на деякий опір; після цього, як правило, зараз же після вмикання генератора в мережу, подається збудження, і генератор впадає в синхронізм.

Таким чином, при вмиканні генератора по методу самосинхронізації різниця ЕРС дорівнює напрузі мережі ($E_g = U_m - U_g = U_m$), а ротор генератора обертається з частотою, яка трохи відрізняється від синхронної частоти, з якою обертається магнітне поле статора. У цих умовах в статорі спостерігається кидок струму, у кілька разів перевищуючий номінальний струм, а на валу генератора виникають механічні зусилля, але останні невеликі і, як показує досвід, не представляють для машини ніякої небезпеки.

Дослідження, зроблені в ряді наших енергосистем по вмиканню турбо- і гідрогенераторів потужністю від 1 до 55 тис. кВА методом самосинхронізації показали, що вмикання по цьому методу протікає успішно як у випадку турбо- так і гідрогенераторів і може застосовуватися і для синхронних компенсаторів. Час, за який струм статора знижується до свого номінального значення, коливається в межах 1-7 сек.

Вмикання по методу самосинхронізації надзвичайно спрощує процес вмикання, вимагає дуже мало часу і може бути легко автоматизовано; воно має особливо велике значення при ліквідації аварій, коли з одного боку, генератор потрібно швидко ввімкнути в мережу і коли, з іншого боку, при значних коливаннях напруги і частоти робота описаних вище синхронізуючих пристроїв затруднюється, а іноді стає неможливою.

17.3 Регулювання активної потужності генератора, що працює паралельно з мережею, синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент

У тому випадку, коли генератор ввімкнений на паралельну роботу з мережею і працює в сталому режимі, момент M_1 , що розвивається приводним двигуном, врівноважується гальмовим електромагнітним моментом і моментом хо-

лостого ходу, тобто

$$M_1 = M_{em} + M_0.$$

Якщо знехтувати втратами в статорі, то, як впливає з енергетичної діаграми (рис. 16.11)

$$P_2 = P_{em}$$

або

$$P_2 = P_{em} = M_{em} \omega \approx M_1 \omega_1$$

де $\omega = \omega_1$ – кутова частота обертання ротора і, відповідно, кутова частота обертання поля статора.

З приведенного виразу очевидно, що активна потужність, що віддається генератором в мережу P_2 , залежить від величини моменту на валу приводного двигуна M_1 .

У такий спосіб при збільшенні моменту на валу генератора, він навантажується.

Якщо генератор працює на мережу нескінченної потужності, тобто

$$U = \text{const}, \quad f = \text{const},$$

то

$$P_2 = P_{em} = f(Q),$$

де q – кут неузгодженості.

Отже, при зміні моменту на валу синхронного генератора відбувається зміна кута неузгодженості Q . Звідси виникає необхідність дослідити стійкість роботи синхронного генератора при зміні моменту на його валу. Для цього скористаємося кутовою характеристикою синхронного генератора (рис. 17.3).

Вважаємо, що потужність приводного двигуна не залежить від кута θ (див. характеристику $P_1 = f(Q)$ рис. 17.3).

Як відзначалося, в сталому режимі роботи генератора M_1 урівноважений M_{em} , тобто має місце баланс потужностей $P_1 = P_{em}$.

На приведених характеристиках (рис. 17.3) цій умові відповідають точки 1 і 2, тобто точки перетину характеристик $P_{em} = f(q)$ і $P_1 = f(q)$.

Дослідимо усталений режим роботи синхронного генератора в точках 1 і 2, тобто при роботі генератора з кутами неузгодженості q_1 і q_2 .

Нехай при роботі генератора в точці 1 відбулася зміна моменту на валу приводного двигуна, що викликало збільшення кута q на величину $+Dq$. Цьому збільшенню кута неузгодженості відповідає збільшення електромагнітної

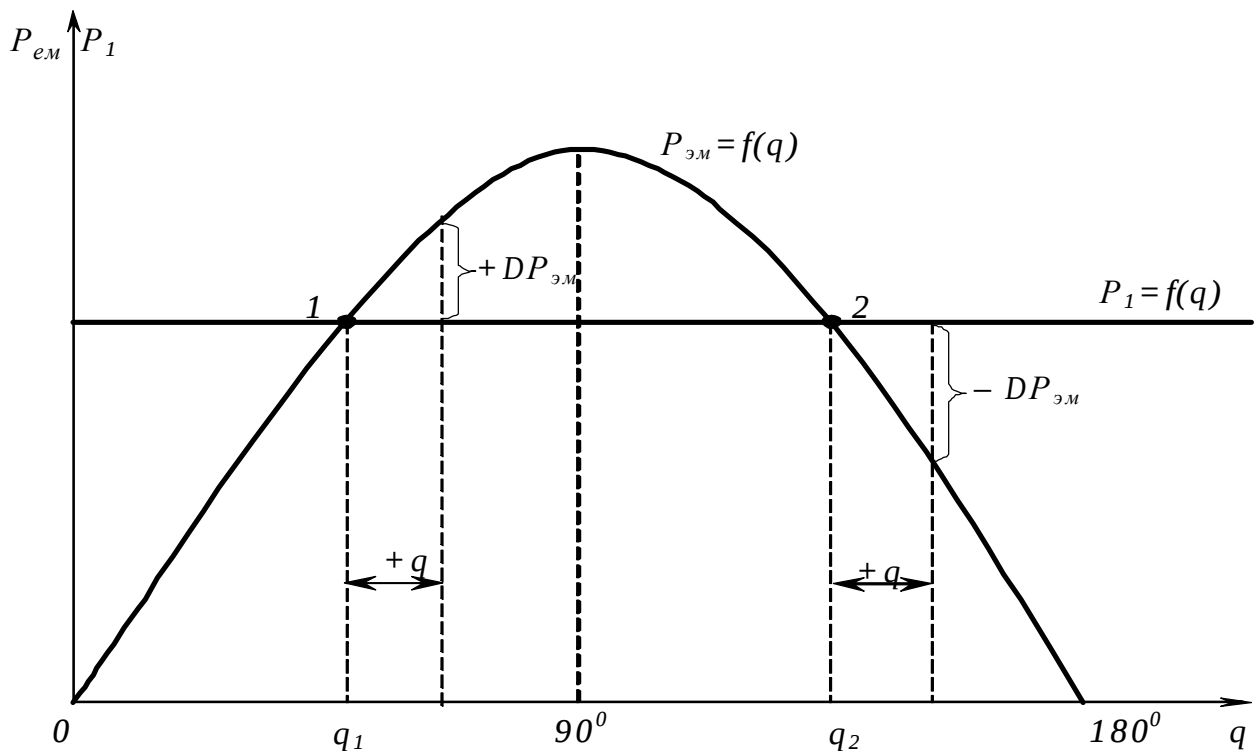


Рис. 17.3 Кутова характеристика синхронного генератора

потужності $+DP_{ем}$. Якщо зникає фактор, що викликав зміну моменту на валу приводного двигуна синхронного генератора, то в перший момент часу генератор віддає в мережу потужність більшу, ніж він одержує від приводного двигуна. Тому генератор повертається у вихідну точку 1 з кутом q_1 .

Таким чином, режим роботи синхронного генератора в точці 1 є **стійким режимом** роботи.

При роботі генератора в точці 2 позитивному збільшенню $+Dq$ відповідає негативне збільшення електромагнітної потужності $-DP_{ем}$. Це означає, що при збільшенні кута q приводний двигун буде прискорювати генератор і він, у кінцевому рахунку, випаде із синхронізму.

Таким чином, режим роботи синхронного генератора в точці 2 є **нестійким режимом** роботи.

Критерій усталеної роботи синхронного генератора при зміні моменту на валу можна записати

$$\frac{DR_{ем}}{Dq} > 0 \quad \text{або} \quad \frac{dP_{ем}}{dq} > 0 \quad (17.1)$$

Цій умові відповідає висхідна вітка кутової характеристики (рис. 17.3) $0 \leq q \leq 90^\circ$

Кут $q = 90^\circ$ при значенні $P_{ем} = P_{ем.мах}$, відповідає межі усталеної роботи генератора (у явнополюсних генераторів $P_{ем.мах}$ при $q < 90^\circ$)

Відношення $\frac{P_{em\max}}{P_n} = K_p$ – перевантажувальна здатність синхронного генератора.

У турбогенераторів $K_p \approx 2$, у гідрогенераторів $K_p > 2$.

Повернення синхронного генератора у вихідний стан, коли зникає фактор, що викликав зміну моменту на його валу відбувається за рахунок $+DP_{em}$, що називається **синхронізуючою потужністю** генератора.

Ця потужність тим більша, чим більше $\frac{dP_{em}}{dq} = P_{сн}$ – коефіцієнт синхронізуючої потужності.

Синхронізуючій потужності генератора відповідає синхронізуючий момент

$$DM_{em} = \frac{DP_{em}}{\omega_1} \quad (17.2)$$

Таким чином, умова усталеної роботи синхронного генератора є

$$DP_{em} > 0; \quad DM_{em} > 0. \quad (17.3)$$

17.4 Регулювання реактивної потужності, паралельно працюючого синхронного генератора, U – образні характеристики

Нехай у генератора, що працює на мережу нескінченної потужності, момент на валу залишається незмінним, але при цьому регулюється струм збудження

$$M_1 = const, \quad I_{зб} = var.$$

Досліджуючи цей режим, скористаємося принциповою схемою двох паралельно ввімкнених однофазних синхронних генераторів (рис.17.4).

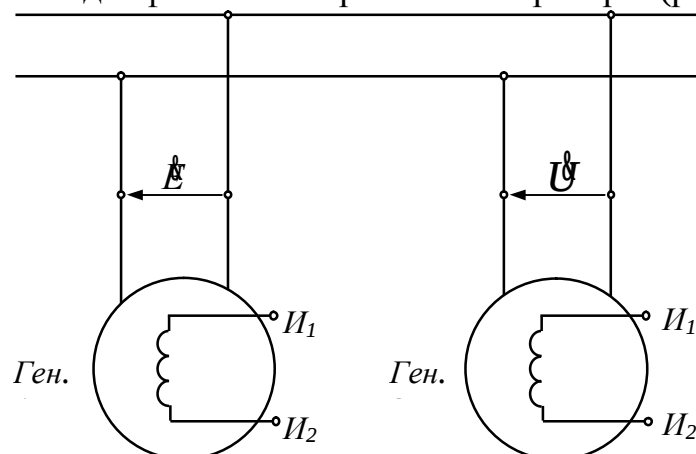


Рис. 17.4 Схеми вмикання однофазних синхронних генераторів в мережу

Оскільки в будь-який момент часу полярність затискачів обмоток якорів генераторів 1 і 2 відповідає полярності мережі, то в будь-який момент часу вектори напруг цих генераторів (E для генератора 1 і U для генератора 2) мають однаковий напрямок стосовно початків і кінців затискачів обмоток якорів.

У той же час, якщо розглянути замкнутий контур, утворений обмоткою якоря генератора 1, з'єднаного шинами з обмоткою якоря генератора 2, то в цьому замкнутому контурі вектори $\dot{E}$ і $\dot{U}$ знаходяться в протифазі.

Нехай генератор 1 є регульованим генератором у відношенні його струму збудження. Орієнтуємо його збудження таким чином, щоб величина його напруги E дорівнювала величині U (рис. 17.5, а).

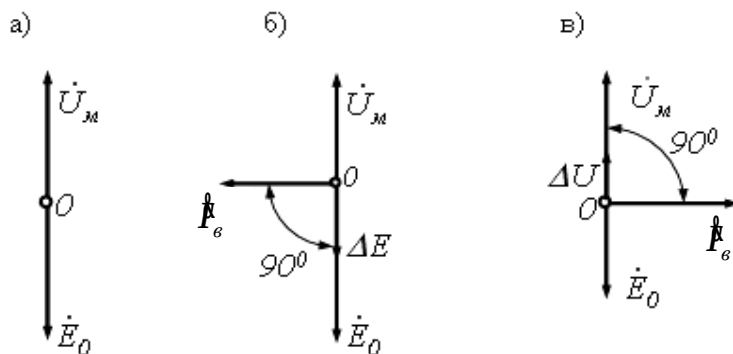


Рис. 17.5 Діаграми ЕРС при паралельній роботі генераторів з мережею у випадку:
а) $E_0 = U_M$; б) $E_0 > U_M$ і в) $E_0 < U_M$

У цьому випадку різниця потенціалів ΔE між однойменними затискачами генераторів дорівнює нулю, і, якщо генератори працюють в режимі холостого ходу, то струм між ними не протікає, тобто $\Delta E = 0$, $I_g = 0$. Цей випадок відповідає нормальному збудженню регульованого генератора

$$I_{зб} = I_{зб.норм}$$

Збільшимо струм збудження регульованого генератора проти його нормального значення, тобто перезбудимо генератор

$$I_{зб} > I_{зб.норм}.$$

В цьому випадку ЕРС обмотки якоря регульованого генератора E стане більшою U_M і між однойменними затискачами паралельно ввімкнених генераторів з'явиться різниця потенціалів ΔE (рис. 17.5, б).

Під дією різниці потенціалів ΔE , між паралельно ввімкненими генераторами потече вирівняльний струм I_g . Контур, по якому тече цей струм, включає обмотки якорів генераторів і сполучні шини. Цей контур має переважно індуктивний опір (активний опір значно менший). Тому вирівняльний струм I_g відстає від ΔE практично на 90° .

З аналізу векторної діаграми (рис. 17.5, б) приходимо до наступного висновку:

1) вирівняльний струм $\dot{I}_g$ є чисто реактивним струмом стосовно $\dot{U}$ і $\dot{E}$. Цей струм робить перерозподіл реактивної потужності між регульованим генератором і мережею.

2) оскільки струм $\dot{I}_g$ відстає від $\dot{E}$ на 90° , то в генераторі 1, тобто в регульованому генераторі, він створює поздовжньо–розмагнічуючу реакцію якоря, а в генераторі 2 він створює поздовжньо–намагнічуючу реакцію якоря.

За рахунок зазначеної дії поздовжньої реакції якоря в генераторах їхня вихідна напруга U вирівнюється до загальної напруги мережі.

У тому випадку, коли струм збудження регульованого генератора, установлений менше нормального значення, він працює в режимі недозбудження

$$I_{зб} < I_{зб.норм}.$$

У цьому випадку, між однойменними затискачами паралельно ввімкнених генераторів, також діє різниця потенціалів ΔE (рис. 17.5, в).

Як і в попередньому випадку вирівняльний струм $\dot{I}_g$ відстає від $\dot{E}$ на 90° . Для генераторів 1 і 2 він є також чисто реактивним. Він не робить перерозподіл активної потужності між генераторами 1 і 2, а робить перерозподіл реактивної потужності.

В режимі недозбудження, як видно з векторної діаграми, струм $\dot{I}_g$ випереджає $\dot{E}$ на 90° . У генераторі 1 він створює поздовжньо–намагнічуючу реакцію якоря.

В той же час струм $\dot{I}_g$ відстає від напруги $\dot{U}$ на 90° . В генераторі 2 він створює поздовжньо–розмагнічуючу реакцію якоря.

Таким чином, і в цьому випадку напруга паралельно працюючих генераторів вирівнюється до загальної напруги мережі U_m .

Оцінімо величину вирівняльного струму паралельно ввімкненого синхронного генератора в режимі недозбудження і перезбудження.

Так як, вирівняльний струм I_g є чисто реактивним струмом для паралельно ввімкнених генераторів і створює поздовжню реакцію якоря, то він визначається по виразу

$$\dot{I}_g = -j \frac{D\dot{E}}{x_d} = -j \frac{\dot{U} + \dot{E}}{x_d} \quad (17.4)$$

Проаналізуємо цей вираз для різних випадків збудження регульованого паралельно ввімкненого генератора і знайдемо первісну залежність $I_g = f(E)$.

1) В режимі нормального збудження $I_{зб} = I_{зб.норм}$, величини E і U однакові, і оскільки вектори цих напруг знаходяться в протифазі, то

$$\Delta E = 0 \text{ і } I_g = 0.$$

Це визначає положення точки A на осі абсцис (рис. 17.6).

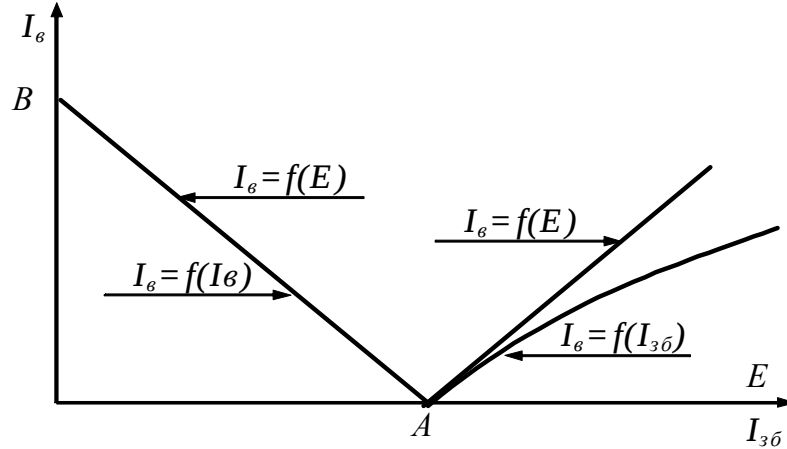


Рис. 17.6 Залежності $I_e = f(E)$ і $I_e = f(I_{3б})$

Відповідно до приведеної залежності вирівняльний струм I_e змінюється лінійно при зміні E .

В остаточному підсумку, послабляючи (зменшуючи) збудження регульованого генератора, можемо одержати $I_{3б} = 0 \Rightarrow E = 0$, тому величина вирівняльного струму буде визначатися виразом

$$I_e = \frac{U}{x_d}.$$

Ця залежність вирівняльного струму визначає положення точки B на осі ординат.

2) В режимі перезбудження $I_{3б} > I_{3б.норм.}$.

$$E > U \Rightarrow DE > 0 \Rightarrow I_e > 0.$$

У цьому випадку вирівняльний струм I_e також лінійно змінюється при зміні величини E .

Перейдемо від залежності $I_e = f(E)$ до залежності $I_e = f(I_{3б})$.

В режимі недозбудження магнітне коло регульованого генератора залишається ненасиченим, тому $E \sim I_{3б}$ (пропорційно).

Тому в режимі недозбудження залежність $I_e = f(E)$ у визначеному масштабі може бути представлена як залежність $I_e = f(I_{3б})$.

У режимі перезбудження зі збільшенням струму $I_{3б}$ магнітне коло регульованого генератора насичується, тому E не пропорційно $I_{3б}$.

З цієї причини крива $I_e = f(I_{3б})$ проходить нижче $I_e = f(E)$.

Розглядаючи регулювання струму збудження $I_{3б}$, паралельно ввімкненого генератора, враховували тільки вирівняльний струм $I_{3р}$. Це означає, що розглядався режим холостого ходу паралельно включеного генератора.

Отримана залежність $I_e = f(I_{3\phi})$ називається **U-образною** характеристикою режиму холостого ходу паралельно ввімкненого синхронного генератора.

Аналогічні залежності $I_e = f(I_{3\phi})$ можна одержати й в режимі навантаження паралельно ввімкненого синхронного генератора.

В навантажувальному режимі крива $I = f(I_{3\phi})$ проходить вище аналогічної характеристики режиму холостого ходу, тому що в навантажувальному режимі струм обмотки якоря I регульованого генератора складається з активної і реактивної складових (рис. 17.7).

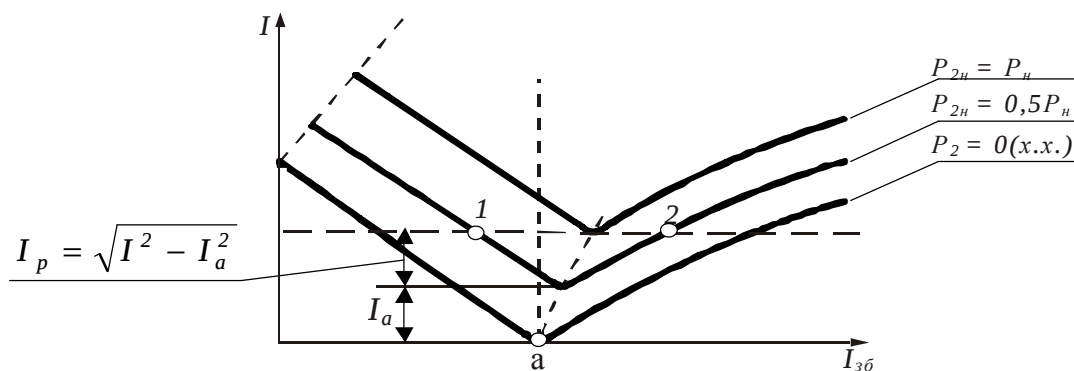


Рис. 17.7 U-образні криві синхронного генератора

З точки “а” нагору проведена пунктирна лінія, що відповідає такому значенню струму збудження $I_{3\phi,норм}$ при якому струм статора стає мінімальним і рівним тільки активній складовій. У цьому випадку генератор працює при коефіцієнті потужності $\cos j = 1$. Відхилення цієї пунктирної лінії вправо вказує на те, що зі зростанням навантаження струм збудження необхідно збільшувати, для підтримки напруги на затискачах генератора незмінною.

Якщо розглянути якесь значення струму обмотки якоря паралельно ввімкненого генератора, обумовленого точками 1 і 2 **U-образної** характеристики, то необхідно відзначити, що в цих точках реактивна складова є відстаючою стосовно напруги мережі для точки 1 і випереджальною стосовно напруги мережі для точки 2. Це впливає з аналізу кривих, приведених вище.

В навантажувальному режимі при нормальному збудженні струм обмотки якоря генератора є чисто активним.

17.5 Поняття про статичну і динамічну стійкість синхронного генератора при паралельній роботі

Коефіцієнт перевантажувальної здатності

$$K_p = \frac{P_{ем.мах}}{P_n} \quad (17.6)$$

характеризує **статичну стійкість** паралельно працюючого синхронного генератора, тобто його здатність не випадати із синхронізму при повільній зміні на-

вантаження.

Від статичної стійкості, необхідно відрізнити **динамічну стійкість**, тобто здатність генератора не випадати із синхронізму при різкій зміні навантаження.

В умовах експлуатації синхронних генераторів можливі короткі замикання в мережі, зв'язаної з генератором. При цьому напруга мережі різко знижується. Як впливає з рівняння

$$P_{эм} = \frac{mUE_0}{x_d} \sin q + \frac{mU^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin 2q$$

при різкому зниженні вихідної напруги синхронного генератора U , знижується електромагнітна потужність генератора і з'являється небезпека випадання його із синхронізму. Щоб запобігти цьому, генератор забезпечується системою швидковідгукового збудження. В цій системі, при зниженні напруги U , автоматично різко збільшується струм збудження генератора. При цьому ЕРС обмотки якоря E_0 збільшується і за рахунок цього електромагнітна потужність $P_{ем}$ утримується в необхідних межах.

Таким чином, динамічна стійкість паралельно працюючого синхронного генератора. забезпечується системою швидковідгукового збудження (форсуванням збудження).

Контрольні питання

1. Що таке синхронізація генератора, що вмикається на паралельну роботу?
2. Як навантажити генератор, ввімкненого на паралельну роботу?
3. Що таке синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент?
4. Що таке навантажувальна здатність синхронного генератора?
5. Що є умовою усталеної роботи синхронного генератора?
6. Що являють собою U-образні характеристики синхронного генератора?
7. Що таке статична і динамічна стійкість синхронного генератора при паралельній роботі?

Глава 18. Синхронний двигун і синхронний компенсатор

18.1 Основні відомості про синхронний двигун

До 1914-1915 р. синхронний двигун не мав промислового значення, тому що його пускові характеристики не відповідали пред'являємим вимогам. Положення справи різко змінилося, коли встало питання про коефіцієнт потужності ($\cos j$) як окремих приймачів електроенергії, так і мереж. Установка потужних асинхронних двигунів, що визначалася умовами роботи привода, привело до значного зниження коефіцієнта потужності мереж і електростанцій, тому що асинхронні двигуни працюють з тим більш низьким $\cos j$, чим менше вони навантажені. Тому перед електромашинобудуванням була поставлена задача використовувати синхронні двигуни, що, як ми довідаємося з подальшого, можуть працювати не тільки при $\cos j = 1$, але і з випередженням струму по фазі щодо напруги, з так називаним *випереджальним* $\cos j$. Але для цього потрібно було поліпшити їхні пускові характеристики в такій степені, щоб вони не були на перешкоді для нормальної експлуатації двигуна. Поставлена задача була вирішена з удосконаленням уже раніше відомого асинхронного пуску в хід синхронного двигуна.

Синхронні двигуни виконуються, головним чином, як явнополюсні на потужності до 10 тис. кВт і частоту обертання до 1000 об/хв. З огляду на цінну властивість синхронних двигунів – при перезбудженні працювати з випереджувачим $\cos j$, їх виготовляють для номінальної роботи при $\cos j = 1$ і випереджальному $\cos j = 0,8$. Однак в останньому випадку двигун повинний мати велику МРС ротора, і його статор повинний бути розрахований на великий струм. Тому двигуни, виконані для роботи при випереджальному $\cos j = 0,8$, трохи важчі і дорожчі двигунів, що працюють при $\cos j = 1$.

Статор синхронного двигуна має практично ту ж конструкцію, що і статор синхронного генератора. З точки зору пуску двигуна в хід повітряний зазор синхронного двигуна робиться меншим чим в синхронному генераторі. При явнополюсному виконанні в полюсні наконечники двигуна закладають спеціально розраховану пускову обмотку.

Збудник, як правило насаджується на вал двигуна, а в двигунах великої потужності виконується окремо.

18.2 Принцип дії синхронного двигуна

Відповідно до принципу оборотності електричних машин синхронна машина може працювати не тільки в режимі генератора, але й у режимі двигуна, тобто споживати з мережі електричну енергію і перетворювати її в механічну.

Розглянемо принцип дії синхронного двигуна на дво полюсної моделі синхронної машини (рис. 18.1).

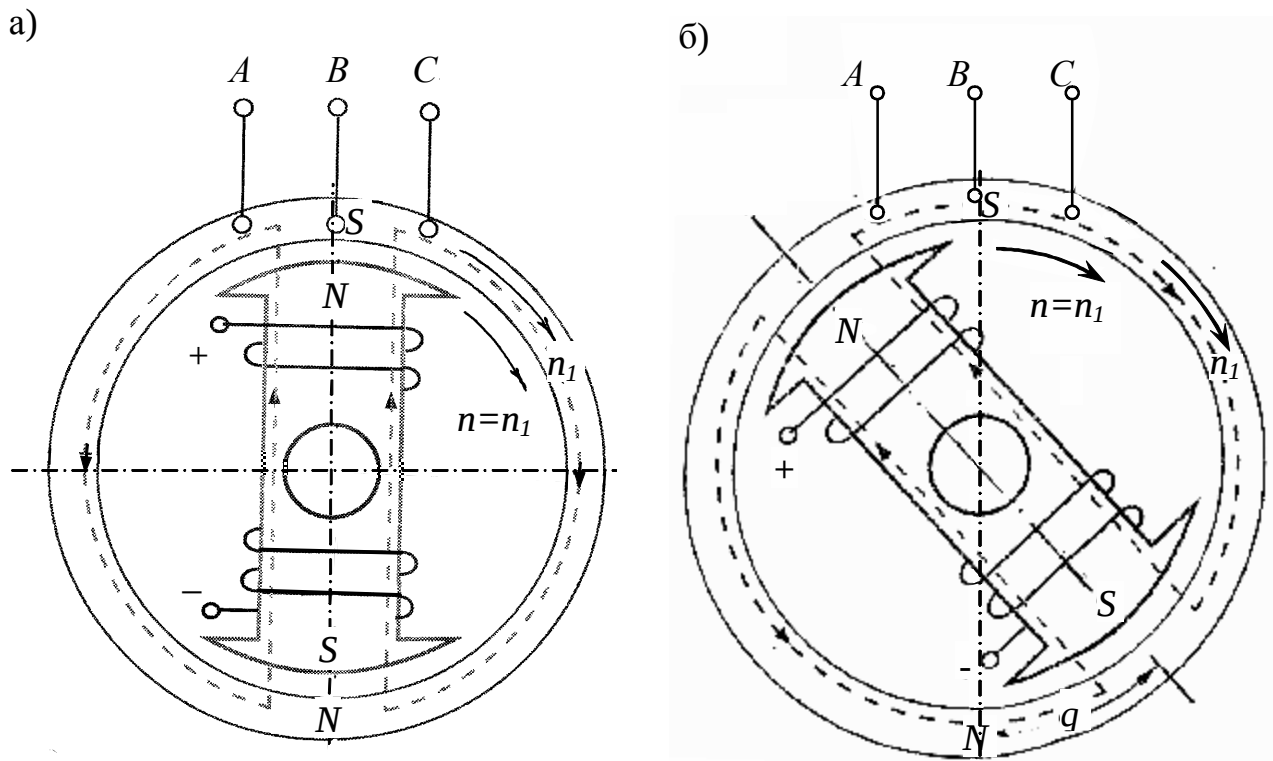


Рис. 18.1 Двополюсна модель синхронної машини:
а) – режим холостого ходу; б) навантажувальний режим

Якщо до затискачів обмотки якоря А, В, С підвести трифазну змінну напругу, то струми, що протікають по обмотках якоря, створять обертове магнітне поле. Це поле можна моделювати системою обертових в просторі полюсів

$$n_1 = 60 \frac{f_1}{p} \text{ [об/хв]}.$$

Якщо ротор двигуна розігнати до частоти $n = n_1$ і подати збудження таким чином, щоб на роторі утворилися полюси протилежної полярності стосовно полюсів на статорі, то між полюсами протилежної полярності статора і ротора будуть діяти сили електромагнітного притягання і на валу двигуна буде діяти електромагнітний момент.

У тому випадку, коли синхронний двигун працює в режимі холостого ходу осі полюсів полів статора і ротора збігаються. Коли двигун підключений до навантаження, що створює протидіючий момент, між осями полюсів статора і ротора з'являється кут неузгодженості q . Незважаючи на наявність кута q ротор буде обертатися з незмінною частотою доти, поки навантаження двигуна не перевищить критичне.

Якщо ж навантаження перевищує критичне, то ротор випадає із синхронізму. Цей режим тим небезпечніший, чим більша потужність і габарити двигуна, тому що на валу з'являються коливання, що можуть привести до руйнування вала.

18.3 Пуск синхронних двигунів

Пуск синхронного двигуна безпосереднім вмиканням в мережу неможливий, тому що ротор через свою значну інерцію не може бути відразу захоплений обертовим полем статора, частота якого встановлюється миттєво. В результаті сталий магнітний зв'язок між статором і ротором не виникає. Були розроблені кілька способів пуску синхронних двигунів.

1. Пуск за допомогою розгінного двигуна – коли синхронний двигун розганявся до синхронної швидкості, потім подавалося збудження і обмотка якоря вмикалася в мережу.

2. Частотний пуск, при якому частота живильної напруги плавно змінюється від $f = 0$ до $f = f_n$. При цьому двигун поступово втягується в синхронізм. Недоліком цього способу пуску є дороге джерело живлення.

3. Асинхронний пуск синхронного двигуна є основним способом пуску. При цьому способі пуску, момент на валу синхронного двигуна створюється за рахунок того, що в полюсних наконечниках ротора вкладається короткозамкнена обмотка, подібна «білячій клітці» асинхронного двигуна. За рахунок асинхронного моменту, створюваного пусковою обмоткою, синхронний двигун розганяється до $\sim 95\%$ синхронної швидкості. Втягування в синхронізм може відбутися за рахунок реактивного моменту M_ϕ , обумовленого явнополюсною конструкцією ротора.

Принципова електрична схема асинхронного пуску представлена на рис.

18.2.

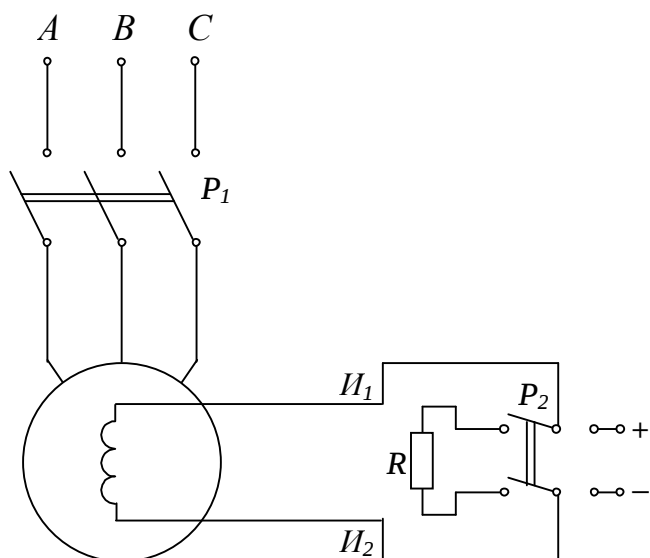


Рис. 18.2 Принципова схема пуску синхронного двигуна

Перед вмиканням двигуна в мережу, обмотка збудження замикається на опір R , що по величині в $10 \div 15$ разів більше власного опору обмотки збудження.

Після цього двигун вмикається в мережу і розганяється під дією асинхронного моменту. Коли він досягне сталої частоти обертання, обмотка збудження перемикається з опору R на джерело постійної напруги. При цьому двигун остаточно втягується в синхронізм.

Чим менше навантаження на валу двигуна, тим легше його входження в синхронізм. Явнополюсні синхронні двигуни малої потужності, що пускаються без навантаження на валу, іноді входять в синхронізм лише за рахунок реактивного моменту, тобто навіть без вмикання обмотки збудження.

В процесі асинхронного пуску обмотку збудження не можна залишати розімкнутою, тому що магнітний потік статора, що пертинає її в початковий період пуску із синхронною швидкістю, наводить у ній ЕРС. Унаслідок велико-

го числа витків обмотки збудження ця ЕРС досягає значень, небезпечних як для цілісності ізоляції самої обмотки, так і для обслуговуючого персоналу. Замикання обмотки збудження накоротко на час пуску двигуна небажано, тому що при частоті обертання, рівній половині синхронній додатковий асинхронний момент обмотки збудження стає гальмуючим і створює "провал" в характеристиці пускового (асинхронного) моменту. Це помітно погіршує пускові властивості синхронного двигуна.

При асинхронному пуску синхронного двигуна виникає значний пусковий струм. Тому пуск синхронних двигунів безпосереднім включенням в мережу на номінальну напругу застосовують при достатній потужності мережі, здатної витримувати без помітного зниження напруги кидки пускового струму п'яти – чи семиразового значення (у порівнянні з номінальним струмом). Якщо ж потужність мережі недостатня, то можна застосувати пуск двигуна при зниженій напрузі: автотрансформаторний або реакторний.

18.4 Діаграма ЕРС синхронного двигуна

Фізичний процес утворення ЕРС і МРС в синхронному двигуні аналогічний режиму генератора. Однак, у двигуна ЕРС носить характер протидіючих ЕРС стосовно напруги мережі.

Тому, для кола обмотки якоря синхронного двигуна рівняння рівноваги напруг має вид

$$\vec{U}_c = -(\vec{E}_0 + \vec{E}_d + \vec{E}_q) \quad (18.1)$$

Спадом напруги в активному опорі обмотки якоря нехтуємо.

Відповідно до рівняння 18.1 перетворена векторна діаграма ЕРС для випадку активно-індуктивного навантаження буде мати вид (рис. 18.3).

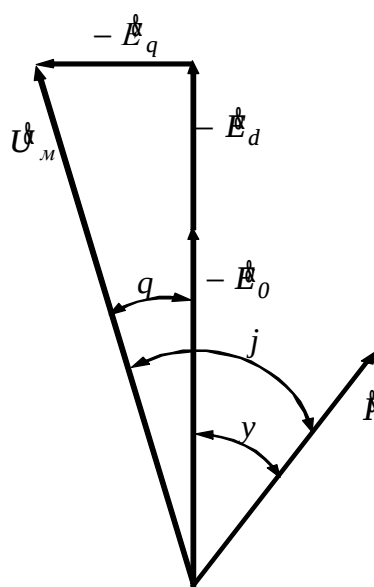


Рис. 18.3. Перетворена векторна діаграма ЕРС для випадку активно-індуктивного навантаження

Зіставляючи цю діаграму з діаграмою для синхронного генератора (рис. 15.13, а) бачимо, що при однаковому в обох випадках відстаючому струмі реакція якоря розмагнічує генератор і підмагнічує двигун. Це пояснюється тим, що струм I , а стало бути і створювана їм реакція якоря, орієнтовані протилежно, щодо основної ЕРС E_0 створюваної в генераторі і двигуні основним магнітним потоком Φ_0 .

18.5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного двигуна

Так як основна діаграма ЕРС синхронного двигуна принципово нічим не відрізняється від такої ж діаграми генератора, то як і раніше нехтуючи активним опором статора r_a , одержуємо для електромагнітної потужності $P_{ем}$ синхронного двигуна той же вираз, що і для синхронного генератора (формула 16.21), з тією різницею, що в синхронному двигуні кут θ варто вважати негативним

$$P_{ем} = \frac{mU_c E_0}{x_d} \sin(-q) + \frac{mU_c^2}{2} \left(\frac{1}{x_q} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(-2q). \quad (18.2)$$

Фізично це означає, що електромагнітний момент двигуна $M_{ем}$, що відповідає потужності $P_{ем}$, є обертальним, який врівноважує гальмівний момент на валу. В синхронному генераторі цей момент є гальмівним, що врівноважує обертальний момент первинного двигуна.

Електромагнітний момент синхронного двигуна, з огляду на те, що двигуни виконуються в явнополісному виконанні, визначається виразом

$$M_{ем} = \frac{mU_c E_0}{x_d w_1} \sin(-q) + \frac{mU_c^2}{2w_1} \left(\frac{1}{x_g} - \frac{1}{x_d} \right) \sin(-2q) = M_c + M_d. \quad (18.3)$$

В сталому режимі роботи електромагнітний момент $M_{ем}$ врівноважується гальмівним моментом навантаження M_2 і моментом, що відповідають втратам холостого ходу, M_0

$$M_{ем} = M_2 + M_0.$$

Висновки щодо синхронізуючої потужності $+DP_{ем}$ і перевантажувальної здатності K_p цілком поширюється на синхронні двигуни. Але в синхронних двигунах кут $q = 20 \div 30^\circ$, тобто він більше, ніж у синхронних генераторів, відповідно чому синхронізуюча потужність і коефіцієнт перевантажувальної здат-

ності в синхронних двигунів менше, чим у синхронних генераторів. Це пояснюється тим, що робота перших носить, як правило, менш відповідальний характер, чим робота других.

18.6 Робочі і U-образні характеристики синхронного двигуна

Поводження двигуна в сталому режимі роботи описують робочі характеристики, що представляють собою залежності

$$n, M, \cos j \text{ і } h = f(P_2) \text{ при } U_0 = \text{const і } f = \text{const}$$

Частота обертання синхронного двигуна $n = 60f/p = \text{const}$ і, отже, залишається строго постійною при всіх режимах роботи машини. Відповідна характеристика зображена на рис. 18.4 у вигляді прямої паралельної осі абсцис.

Електромагнітний момент $M_{ем} = M_0 + M_2$, де M_0 – момент холостого ходу, M_2 – корисний гальмовий момент. В заданих умовах роботи M_0 залишається постійним, а $M_2 = \frac{P_2}{2p \frac{n}{60}}$ змінюється прямо пропорційно корисній потужності

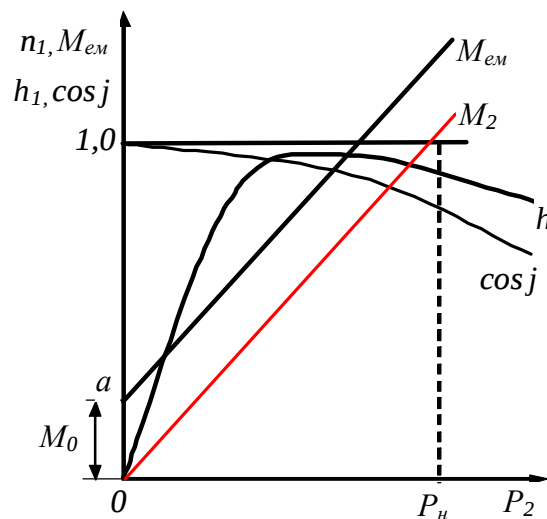


Рис. 18.4 Робочі характеристики синхронного двигуна

на валу P_2 . Тому характеристика $M_2 = f(P_2)$ зображена в виді прямої лінії, проведеної з початку координатної системи, а $M_{ем} = f(P_2)$ в виді прямої, проведеної вище першої на величину відрізка $Oa = M_0$.

Характер зміни $\cos j = f(P_2)$ залежить від того, яке збудження машини. Якщо дати нормальне збудження при холостому ході двигуна, тобто установимо при холостому ході $\cos j = 1$, то при навантаженні для одержання $\cos j = 1$ необхідно підвищити струм збудження. Так як за умовою $I_{зб} = \text{const}$, то при навантаженні буде режим недозбудження, при якому з'являться реактивні струми,

що відстають щодо напруги мережі $\cos(+j)$.

Якщо ж установити $\cos j = 1$ при номінальному навантаженні, то при недовантаженні двигун забирає з мережі реактивні випереджальні струми ($\cos(-j)$), а при перевантаженні - відстаючі. Для можливо меншої зміни $\cos j$ можна установити збудження на деякім проміжному значенні.

Крива віддачі $h = f(P_2)$ має звичайний для всіх електричних машин характер. Вона швидко росте при збільшенні навантаження від 0 до $\frac{1}{2}P_H$, а потім мало міняється в межах зміни значення навантаження від $\frac{1}{2}P_H$ до P_H .

Експлуатаційною характеристикою, що описує поведінку двигуна, є також перевантажувальна здатність по моменту

$$K_m = \frac{M_{em.max}}{M_H}.$$

Для двигунів нормального виконання

$$K_m \approx 2 \div 3.$$

Для синхронного двигуна можна одержати U – образні характеристики аналогічно характеристикам синхронного генератора (рис. 18.5)

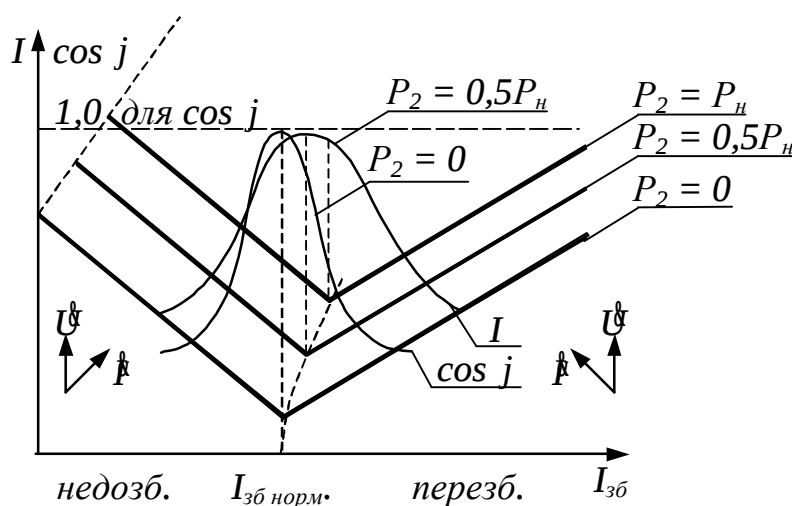


Рис. 18.5 U-образні характеристики синхронного двигуна

Як впливає з U – образної характеристики, переведення двигуна в режим недозбудження означає, що він стає активно-індуктивним навантаженням для мережі, а переведення в режим перезбудження означає, що він стає активно-емнісним навантаженням для мережі.

18.7 Синхронні компенсатори

Це спеціальний клас синхронних машин, що призначені для **регулювання коефіцієнта потужності** в мережі, а також для підтримки на визначеному рівні напруги на ділянці ЛЕП.

Відомо, що при низькому коефіцієнті потужності навантаження ($\cos j$) в мережі, використовується тільки частина потужності вироблюваної електричними станціями., тому що $P = S \cos j$,

де P – потужність, споживана навантаженням (кВт); S – потужність, вироблювана електричною станцією (кВА).

Як правило в мережі переважає навантаження індуктивного характеру. Для підвищення $\cos j$ можуть бути встановлені статистичні конденсатори. Однак економічніше до такої мережі підключити синхронний компенсатор, що працює в режимі перезбудження і грає роль ємності, підключеної до мережі.

Якщо ЛЕП великої довжини, то за рахунок ємнісного опору лінії на її кінцевій ділянці напруга може бути збільшеною. Щоб вирівняти напругу до номінального значення, підключається синхронний компенсатор, що працює в режимі недозбудження, тобто виконує роль індуктивності, підключеної до мережі.

Промисловість випускає серійно синхронні компенсатори на потужності до 50 тис. квар.

Ці синхронні компенсатори конструктивно майже не відрізняються від синхронних двигунів, однак, необхідно врахувати, що їхній вал не розрахований на несення механічного навантаження, тому вони не мають вихідного кінця вала.

Основною характеристикою синхронного компенсатора є U – образна характеристика (рис. 18.6).

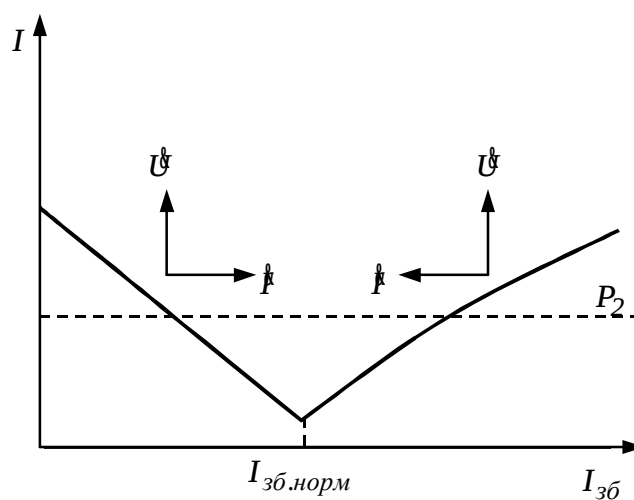


Рис. 18.6 U-образна характеристика синхронного компенсатора

Пускаються в хід синхронні компенсатори асинхронним способом.

Контрольні питання

1. Який принцип дії синхронного двигуна?
2. Поясніть процес пуску синхронного двигуна.
3. Як регулюється коефіцієнт потужності синхронного двигуна?
4. Яке призначення синхронного компенсатора?
5. Які достоїнства і недоліки синхронних двигунів у порівнянні з асинхронними?

Розділ 4. Машини постійного струму

Електричні машини постійного струму використовуються як генератори, і як двигуни. Найбільше застосування мають двигуни постійного струму, області застосування і діапазон потужності яких досить широкі: від часток ватів (для приводу пристроїв автоматики) до декількох тисяч кіловатів (для приводу прокатних станів, шахтних підйомників і інших механізмів). Двигуни постійного струму широко використовуються для приводу підйомних засобів як кранові двигуни і приводу транспортних засобів як тягові двигуни. Основні переваги двигунів постійного струму в порівнянні з безколекторними двигунами змінного струму – гарні пускові і регульовальні властивості, можливість одержання частоти обертання більш 3000 об/хв, а недоліки – відносно висока вартість, деяка складність у виготовленні і знижена надійність. Усі ці недоліки машин постійного струму обумовлені наявністю в них щітково-колекторного вузла, що до того ж є джерелом радіоперешкод і пожежонебезпеки. Ці недоліки обмежують застосування машин постійного струму.

В останні роки створені й успішно застосовуються двигуни постійного струму, у яких колектор замінений безконтактним комутатором на напівпровідникових елементах, однак подібні двигуни виготовляються на потужності не більше 500 Вт.

Глава 19. Будова і принцип дії машин постійного струму

19.1 Типи й основні конструктивні елементи машин постійного струму

Машиною постійного струму називають обертову електричну машину, яка перетворює механічну енергію в електричну (у випадку генератора) і виконує зворотне перетворення (у випадку двигуна).

По конструктивному виконанню розрізняють два типи машин постійного струму:

1. Уніполярні машини постійного струму;
2. Колекторні машини постійного струму.

Уніполярні (безколекторні) машини постійного струму серійно не випускаються, тому що вони мають низькі техніко-економічні показники. Застосовуються тільки в спеціальних установках і виготовляються як машини індивідуального виконання.

Колекторні машини постійного струму є їх основним типом. Тому, коли говорять про машини постійного струму, мають на увазі цей тип машин.

В даний час електромашинобудівельні заводи виготовляють електричні машини постійного струму, призначені для роботи в різноманітних галузях промисловості, тому окремі вузли цих машин можуть мати різну конструкцію, але загальна конструктивна схема машин однакова. Нерухома частина машини

постійного струму називається статором (індуктором), обертова частина – ротором (якорем), розділених повітряним зазором.

Статор складається зі станини, на внутрішній поверхні якої кріпляться головні і додаткові полюси з обмотками. Головні полюси служать для створення в машині основного магнітного потоку, а додаткові – для поліпшення умов комутації машини.

Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Кінці вала знаходяться в підшипниках, розташованих в підшипникових щитах. Для кращого охолодження в більшості машин є вентилятор.

На рис. 19.1 показана будова електричної машини постійного струму.

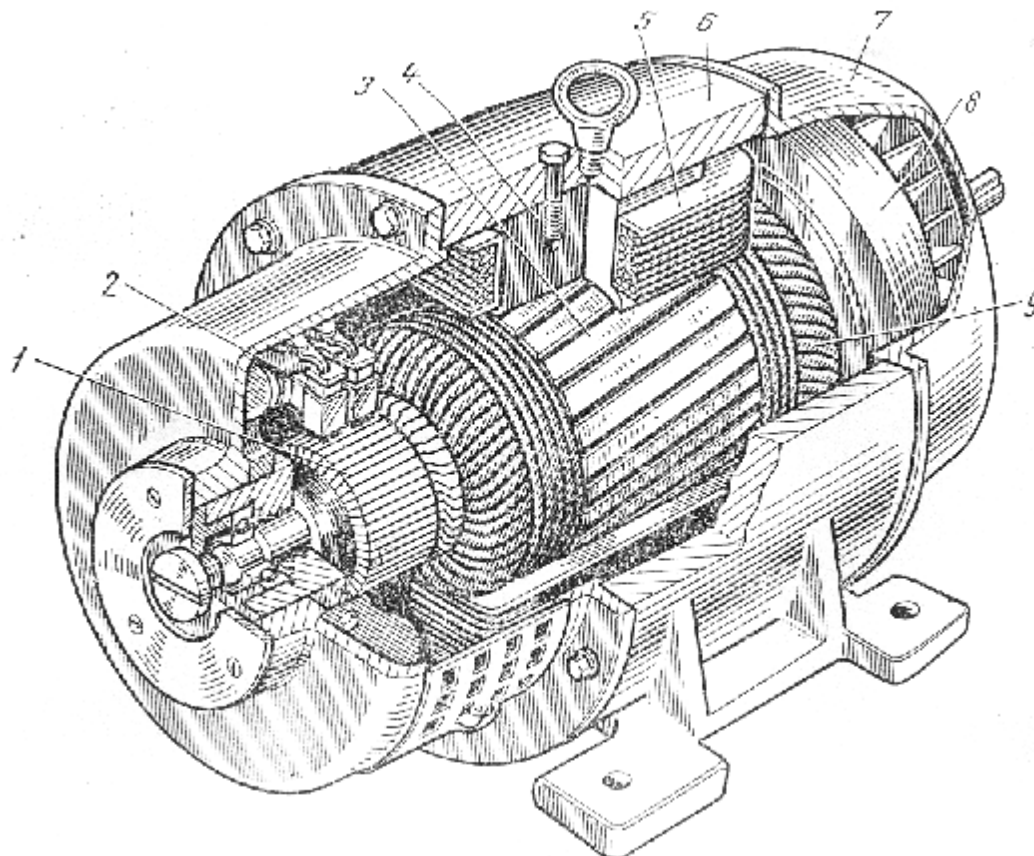


Рис. 19.1 Будова електричної машини постійного струму:

1 – колектор; 2 – щітки; 3 – осердя якоря; 4 – осердя головного полюса; 5 – полюсна котушка; 6 – станина; 7 – підшипниковий щит; 8 – вентилятор; 9 – обмотка якоря

Розглянемо конструктивну будову окремих вузлів машини постійного струму.

Станина. Станина (рис. 19.2) машини постійного струму служить для кріплення полюсів і підшипникових щитів. Крім того, станина є магнітопроводом, тому що через неї замикається основний магнітний потік машини. Тому станини машин постійного струму виготовляються зі сталі – матеріалу, який має достатню механічну міцність і велику магнітну проникність. Для кріплення машини до фундаменту станина має відлиті або приварені лапи з отворами для болтів. По окружності станини є отвори для кріплення головних і додаткових полюсів. У верхній частині станина має піднімальне кільце (рим-болт), що слу-

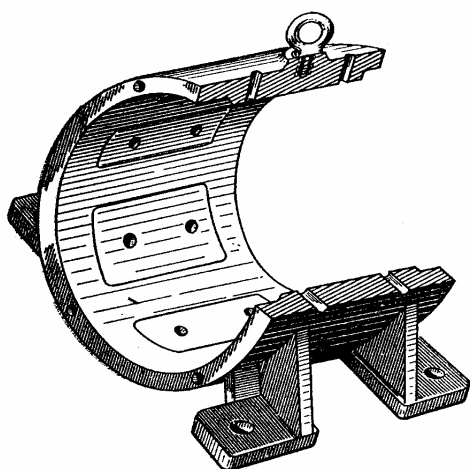


Рис. 19.2 Станина машини постійного струму

жить для підйому машини при її зборці і монтажі.

В машинах малої і середньої потужності станина виконується як правило зі сталевого прокату у вигляді цільної конструкції. У великих машинах в станину може бути запресований пакет сталі, набраний з окремих, ізольованих один від одного листів електротехнічної сталі. Для полегшення монтажу і транспортування у великих машинах станини роблять роз'ємними.

Головні полюси. Магнітне поле в машині постійного струму створюється магніторушійною силою обмотки збу-

дження, що виконується у виді полюсних котушок надітих на осердя головних полюсів (рис. 19.3). З боку, зверненого до якоря, осердя закінчується полюсним наконечником, за допомогою якого забезпечується необхідний розподіл магнітної індукції на поверхні якоря.

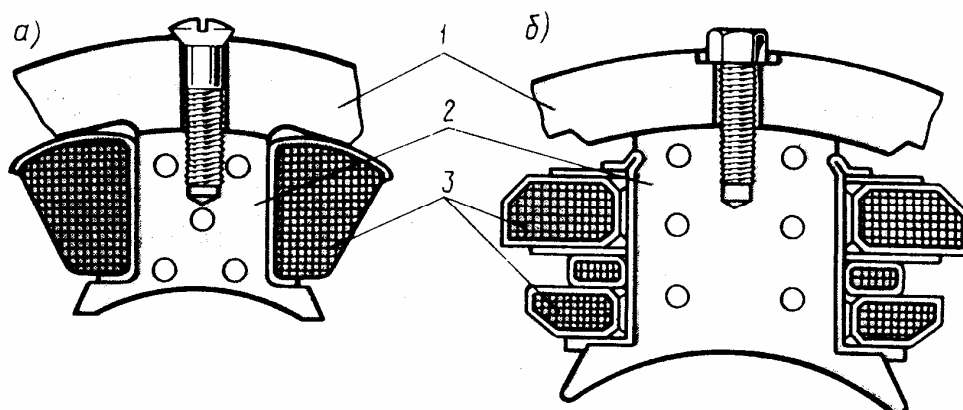


Рис. 19.3 Головні полюси з безкаркасною (а) і каркасною (б) полюсними котушками:
1 – станина; 2 – осердя полюса; 3 – полюсна котушка

Осердя головних полюсів роблять шихтованими з листової конструкційної сталі товщиною 1-2 мм або з тонколистової електротехнічної анізотропної холоднокатаної сталі, наприклад марки 3411. Штамповані пластини головних полюсів спеціально не ізолюють, тому що тонка плівка окислу на їхній поверхні достатня для значного послаблення вихрових струмів, наведених в полюсних наконечниках пульсаціями магнітного потоку, викликаного зубчатістю осердя якоря. Анізотропна сталь має підвищену магнітну проникність уздовж прокату, що повинно враховуватися при штампуванні пластин і їхній зборці в пакет. Знижена магнітна проникність впоперек прокату сприяє ослабленню реакції якоря і зменшенню потоку розсіювання головних і додаткових полюсів.

В машинах постійного струму невеликої потужності полюсні котушки роблять безкаркасними – намотуванням мідного обмотувального проводу безпосередньо на осердя полюса, попередньо наклепавши на нього ізоляційну про-

кладку (рис. 19.3, а). У більшості машин (потужністю 1 кВт і більше) полюсну котушку роблять каркасною: обмотувальний провід намотують на каркас (як правило пластмасовий), а потім надівають на осердя полюса (рис. 19.3, б). В деяких конструкціях машин полюсну котушку для більш інтенсивного охолодження розділяють по висоті на частині, між якими залишають вентиляційні канали.

Додаткові полюси. Додаткові полюси застосовують в машинах потужністю понад 1 кВт із метою зменшення іскріння на щітках.

Додатковий полюс (рис. 19.4) складається із осердя 1 і котушки 2, виконаної з мідного ізольованого проводу з перетином, розрахованим на робочий струм машини, тому що котушки додаткових полюсів включаються послідовно з обмоткою якоря. Осердя додаткового полюса виготовляється зі сталі, і має як правило монолітну конструкцію. Через малу величину магнітної індукції в осердях додаткових полюсів у них практично не індукуються вихрові струми. Додаткові полюси встановлюються посередині між головними полюсами і кріплять до станини болтами.

Якір. Якір машини постійного струму складається з вала, осердя, обмотки і колектора. Осердя якоря (рис. 19.5) являє собою циліндр, набраний зі штампованих листів електротехнічної сталі товщиною 0,35 або 0,5 мм (рис. 19.6). Така конструкція осердя якоря дозволяє значно послабити в ньому вихрові струми, що виникають в результаті його перемагнічування в процесі обертання в магнітному полі. Листи покривають ізоляційним лаком, збирають в пакет і запікають. У машин малої потужності пакет сталі якоря надівають на вал, а у великих машинах на хрестовину. У великих машинах пакет осердя якоря може набиратися не із суцільних листів, а з окремих сегментів.

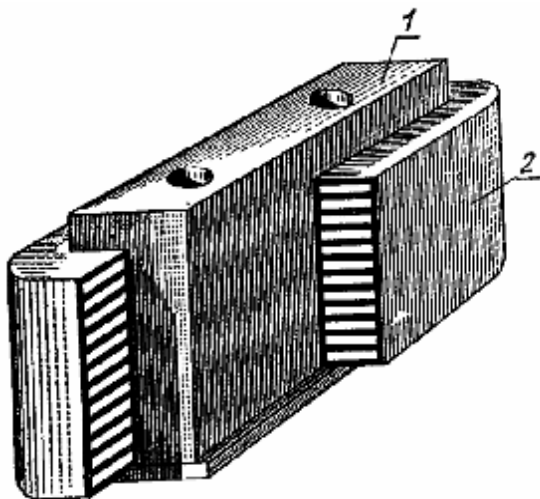


Рис.19.4 Додатковий полюс
1 – осердя; 2 – котушка

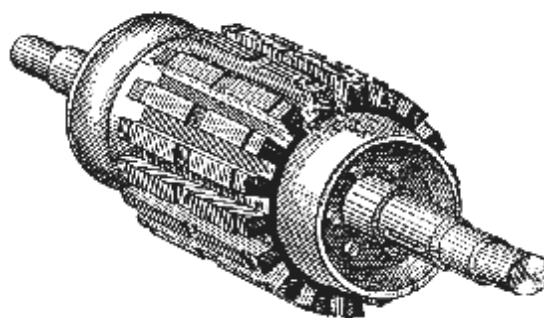


Рис. 19.5 Якір без обмотки

Для поліпшення охолодження машини в пакеті сталі якоря можуть виконуватися вентиляційні канали в осьовому і радіальному напрямках.

На зовнішній поверхні осердя якоря є подовжні пази, в які укладають обмотку якоря (рис. 19.7).

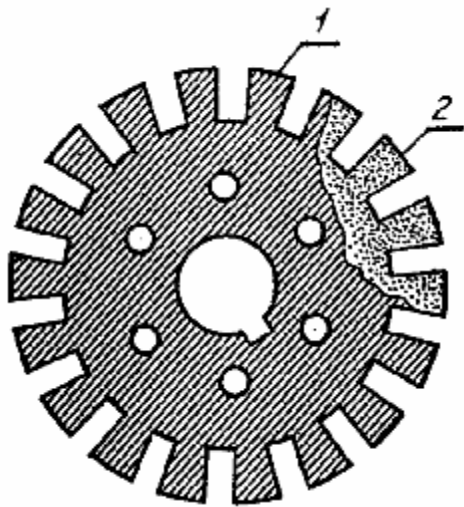


Рис.19.6 Сталевий лист якоря:
1 – сталь; 2 – ізоляція

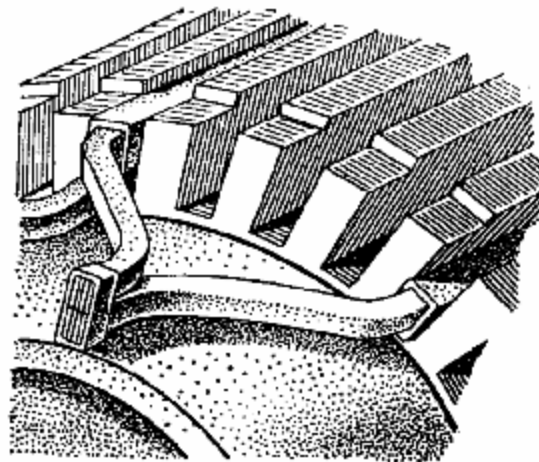


Рис. 19.7 Укладання обмотки
якоря в пазах осердя

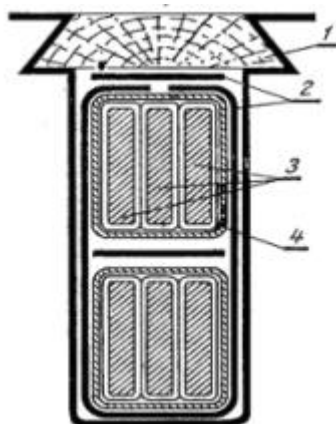
Обмотку якоря виконують з мідного проводу круглого чи прямокутного перетину і розташовують в пазах осердя якоря, де вона ретельно ізолюється від осердя. Пази осердя якоря можуть бути відкритими (рис. 19.8, *а*) або напівзакритими (рис. 19.8, *б*). Відкриті пази застосовують в машинах середньої і великої потужності, а напівзакриті – в машинах малої потужності.

Обмотка якоря складається із секцій, кінці яких припаюються до пластин колектора.

Для міцного закріплення проводів обмотки якоря в пазах застосовуються дерев'яні, гетинаксові або текстолітові клини. Застосування дерев'яних клинів не забезпечує надійного кріплення, тому що при висиханні вони слабшають і можуть випасти з паза. В машинах малої потужності пази не заклинюються, а прикриваються зверху бандажем. Для того, щоб бандаж не виступав за межі якоря, місце під бандаж роблять трохи меншого діаметра (див. рис. 19.5).

Бандаж виконується зі сталевого або бронзового дроту, намотаного безпосередньо на сталь якоря.

а)



б)

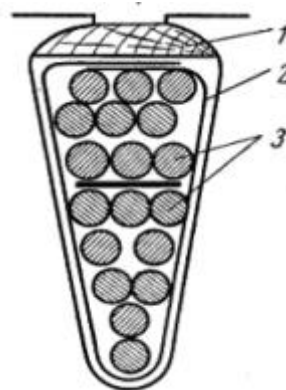


Рис. 19.8 Пази якоря в розрізі:
1 – дерев'яний клин; 2 – електрокартон; 3 – провідники обмотки; 4 – мідкалева стрічка

Лобові частини обмотки кріпляться до обмоткотримача також за допомогою дротового бандажа.

Колектор машини (рис. 19.9) виконують із пластин холоднокатаної міді

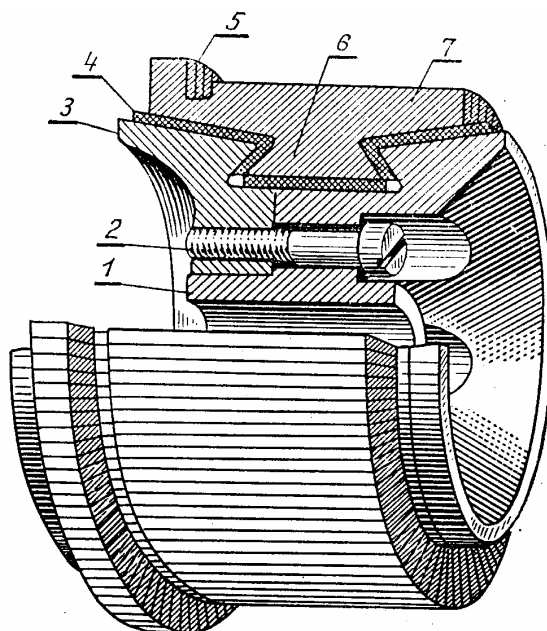


Рис. 19.9 Будова колектора: 1 – корпус колектора; 2 – стяжний болт; 3 – натискне кільце; 4 – ізоляція (міканіт); 5 – "петушок"; 6 – "хвіст ластівки"; 7 – пластини.

(колекторна мідь), які ізолюють одну від одної прокладками з колекторного міканіту. Виступаючу частину колекторної пластини називають "петушком", до неї припаюють провід обмотки якоря. Нижні краї пластини мають форму "хвоста ластівки". Після зборки колектора ці краї затискаються між двома натискними шайбами, ізолюваними від колекторних пластин міканітовими конусами і циліндрами. Щоб міканітові прокладки при спрацюванні пластин колектора не виступали над пластинами, що викликало би вібрацію щіток, іскріння і передчасний знос щіток, між колекторними пластинами фрезерують пази (доріжки) на глибину до 1,5 мм (рис. 19.10).

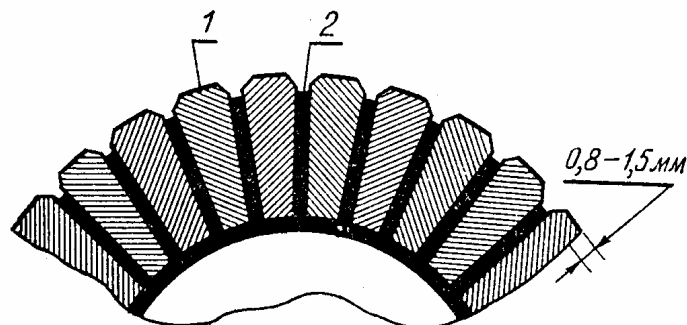


Рис. 19.10 Розташування колекторних пластин 1 і ізоляційних прокладок 2 в колекторі.

об/хв.

Колектори електричних машин малої потужності часто виконуються шляхом запресовування мідних пластин в пластмасу. Пластмаса в цьому випадку є скріплюючим і ізолюючим матеріалом. Така конструкція колектора проста у виготовленні, але може застосовуватися лише при частотах обертання до 10000

Щітковий пристрій. Для одержання електричного контакту з поверхнею колектора в машині постійного струму є щітки. Для установки щіток в машині служить щітковий пристрій, що складається з щіткової траверзи (рис. 19.11), пальців, щіткотримачів (рис. 19.12).

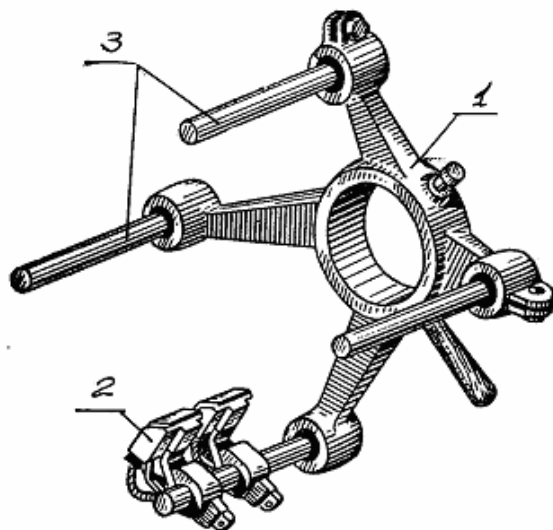


Рис. 19.11 Щітковий пристрій:
1 – щіткова траверза; 2 – щіткотримач;
3 – пальці.

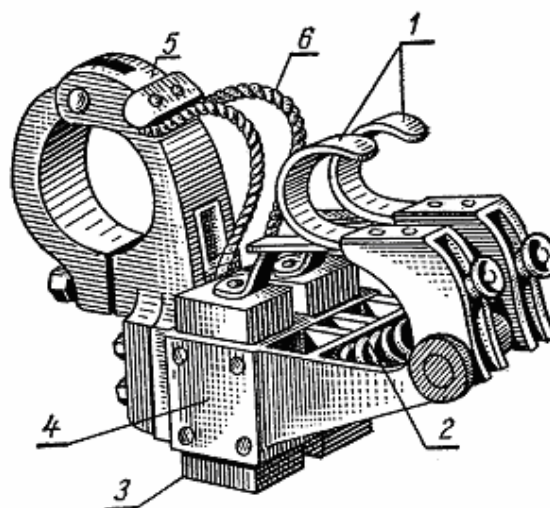


Рис. 19.12 Щіткотримач:
1 – курок; 2 – пружина; 3 – щітка;
4 – обойма; 5 – затискач; 6 – тросик.

Щіткова траверза як правило кріпиться до підшипникового щита і тільки в машинах великої потужності вона кріпиться до станини. Між щітковою траверзою і пальцями є ізоляція. На кожен палець установлюють комплект щіткотримачів. Число пальців як правило дорівнює числу полюсів в машині. Щіткотримач складається з обойми, в яку поміщають щітку, курка, що представляє собою відкидну деталь, що передає тиск пружини на щітку. Кріплення щіткотримача на пальці здійснюється за допомогою затискача. Для приєднання елементів електричного кола машини до щітки остання забезпечується гнучким тросиком. Усі щіткотримачі однієї полярності з'єднують між собою збірними шинами, приєднаними до виводів машини.

Крім зазначених частин машина має два підшипникових щити: передній (з боку колектора) і задній. Щити за допомогою болтів кріпляться до станини. В центральній частині щита є розточка, де розташовується підшипник. Як правило в машинах застосовуються кулькові або роликові підшипники кочення; лише в деяких машинах, з метою забезпечення безшумності в процесі роботи, застосовуються підшипники ковзання.

Для приєднання обмоток машини до електричної мережі машина забезпечується коробкою виводів, де на ізоляційній панелі робляться виводи кінців обмоток. Як правило панель з виводами розташовують на станині.

Виводи обмоток машин постійного струму, відповідно до ДСТУ 183-66, позначаються у такий спосіб:

Обмотка якоря

Я1 і Я2

Обмотка додаткових полюсів

Д1 і Д2

Обмотка компенсаційна	$K1$ і $K2$
Обмотка збудження паралельна (шунтова)	$III1$ і $III2$
Обмотка збудження послідовна (серієсна)	$C1$ і $C2$

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

19.2 Принцип дії колекторної машини постійного струму

Для розуміння принципу роботи колекторної машини постійного струму доцільно розглянути роботу найпростішої моделі машини змінного струму. Ця модель складається з двох нерухомих у просторі полюсів, між якими обертається рамка, кінці якої з'єднані з контактними кільцями (рис. 19.13).

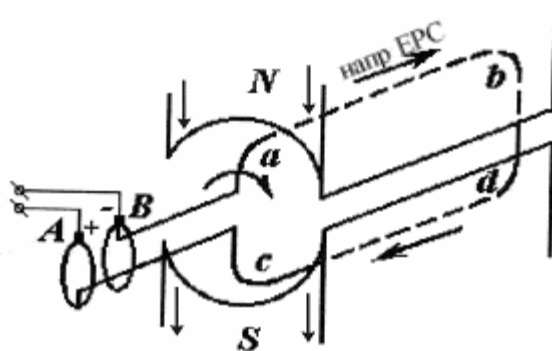


Рис. 19.13. Принципова схема машини змінного струму

В представленій моделі, при обертанні рамки, в провідниках ab і cd індукується ЕРС, напрям якої, для даного моменту часу, визначається за правилом правої руки.

З рисунку 19.13 видно, що для розглянутого моменту часу, якщо вважати, що модель працює генератором, щітка А має полярність «+», а щітка В має полярність «-», тому що в генераторі струм тече від «+» у зовнішньому колі до «-». Якщо повернути рамку на 180° , видно, що полярність щіток зміниться на протилежну. Таким чином, в цій моделі знімається з щіток змінна в часі ЕРС.

Установлюючи закон зміни ЕРС в часі, враховуємо, що миттєве значення ЕРС провідників визначається:

$$e_{np} = B_x l v, \quad (19.1)$$

де B_x – індукція в місці розташування провідника в даний момент часу; l – довжина активної частини провідника; v – лінійна швидкість переміщення провідника відносно поля.

Якщо врахувати, що довжина провідника $l = const$, то при рівномірному обертанні рамки $v = const$ ЕРС провідника $e_{np} \approx B_x$.

Таким чином, зміна ЕРС провідників в часі і, відповідно, зміна ЕРС на виході генератора відбувається по тій же законі, що і розподіл індукції уздовж кола руху рамки на кожному полюсному поділку.

Якщо прийняти, що закон зміни магнітної індукції в часі $B_x = f(x)$ змінюється по синусоїдальному законі, то і ЕРС $e = f(t)$ також буде змінюватися по синусоїдальному законі (рис. 19.14, а).

У дійсності, магнітне коло машини завжди трохи насичене, тому закон зміни індукції $B_x = f(x)$ і ЕРС $e = f(t)$ представимо у виді залежностей (рис. 19.14, б).

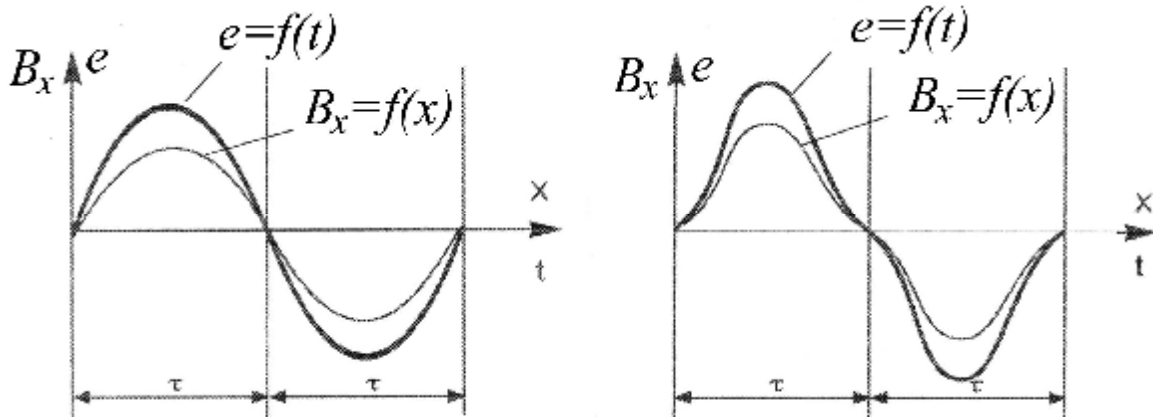


Рис. 19.14. Зміна індукції в повітряному зазорі і ЕРС витка:
а – при ненасиченій магнітній системі; б – при насиченій магнітній системі

Змінимо конструкцію моделі (рис. 19.13) у такий спосіб – замінимо кільця двома сегментами (рис. 19.15).

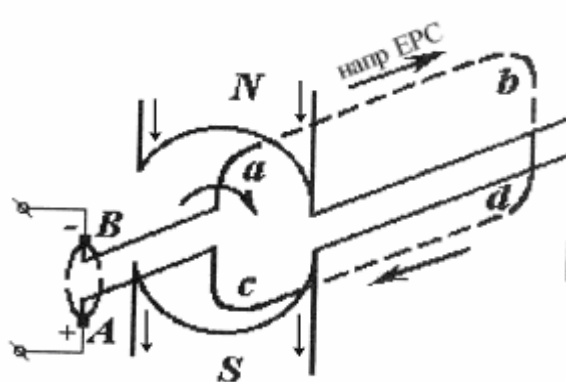


Рис. 19.15. Принципова схема машини постійного струму

При обертанні рамки в провідниках ab і cd , як і попередньої моделі (рис. 19.13), індукується змінна в часі ЕРС.

Однак, в цій моделі при будь-якій положенні рамки, щітка «А» завжди з'єднана з тим проводом, що розташований під полюсом «S», а щітка «В»- під полюсом «N».

Таким чином, в новій моделі полярність щіток не змінюється, тобто при зазначеному на рис. 19.15 напрямку обертання рамки, щітка «А» є позитивною, а щітка «В» негативною.

Таким чином, за допомогою двох сегментів, що представляють найпростіший комутатор, здійснюється випрямлення змінної в часі ЕРС у постійну. Тому з щіток «А» і «В» знімається ЕРС, що пульсує в часі за законом (рис. 19.16, а).

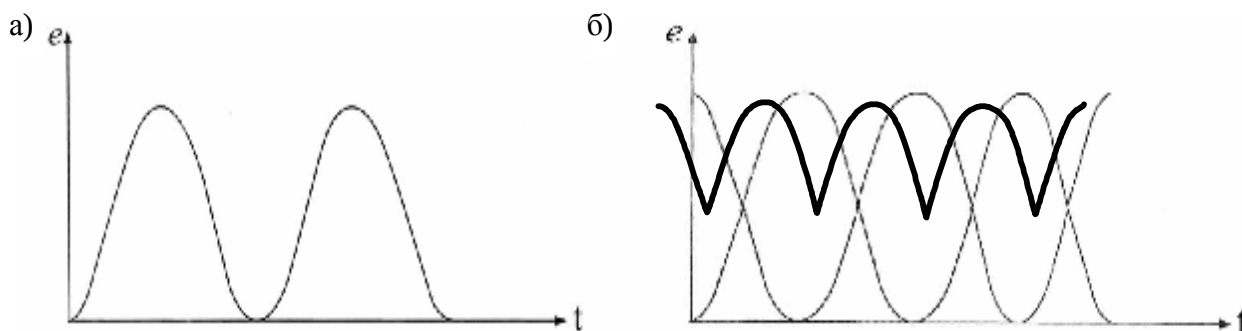


Рис. 19.16. Пульсуюча ЕРС при одному (а) і двох (б) витках на якорі

Якщо ми накладемо на якір два витки (дві котушки) під кутом 90° один до одного, то пульсації напруги на щітках значно зменшаться (рис. 19.16, б). Підрахунок показує, що вже при восьми колекторних пластинах на полюс пульсації напруги на щітках не перевищують 1% від середнього значення цієї напруги; тому струм, що тече по зовнішньому колі, можна вважати практично постійним струмом.

19.3 Обмотки машин постійного струму

А. Принцип будови обмоток якорів

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

Елементом обмотки якоря є **секція** (котушка), приєднана до двох колекторних пластин.

По конструктивному виконанню секції розрізняють **петльові**, **хвильові** і **комбіновані** обмотки якоря.

Схематично секції обмотки якоря представлені на рисунках рис. 19.17 і 19.18.

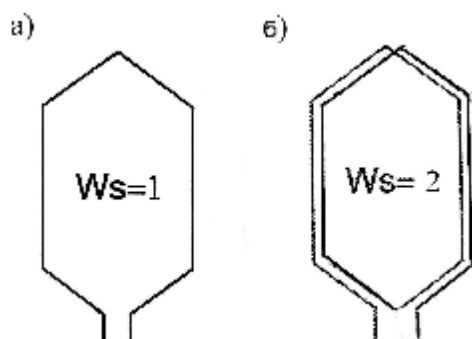


Рис. 19.17 Секції петльової обмотки:
а – одновиткова; б- двовиткова

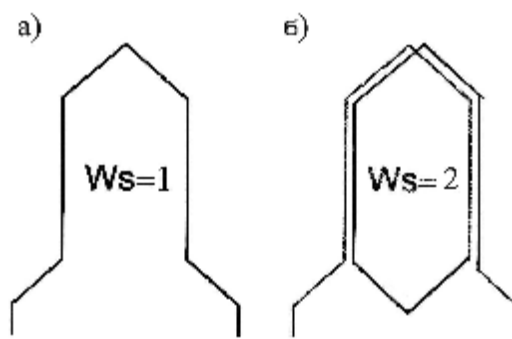


Рис. 19.18 Секції хвильової обмотки:
а – одновиткова; б- двовиткова

Як правило секції обмотки якоря виконуються одновитковими і тільки в машинах малої потужності вони можуть бути виконані багатовитковими.

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

Схематично з'єднання секцій обмотки якоря представлено на рис. 19.19.

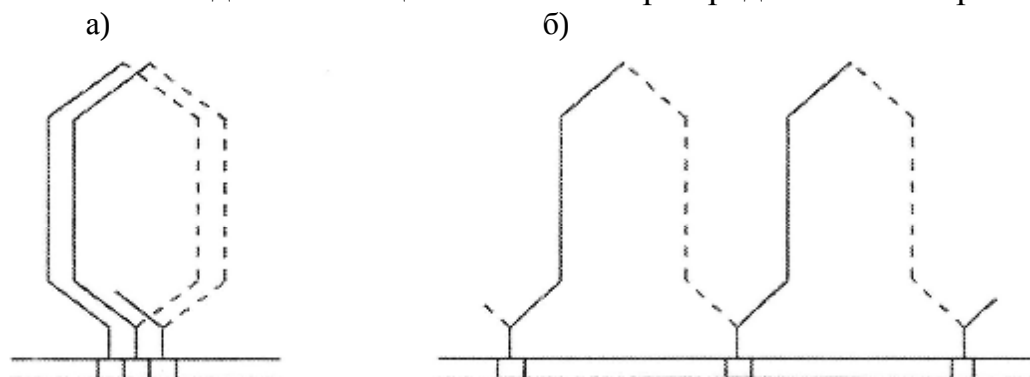


Рис. 19.19. З'єднання секцій петльової (а) і хвильової (б) обмоток якоря

Обмотки якоря як правило виконують двошаровими. При укладанні в пазу одна сторона секції укладається в верхній шар пазу, а інша сторона, розташована на відстані y_1 , укладається в нижній шар пазу (на схемі показана пунктиром).

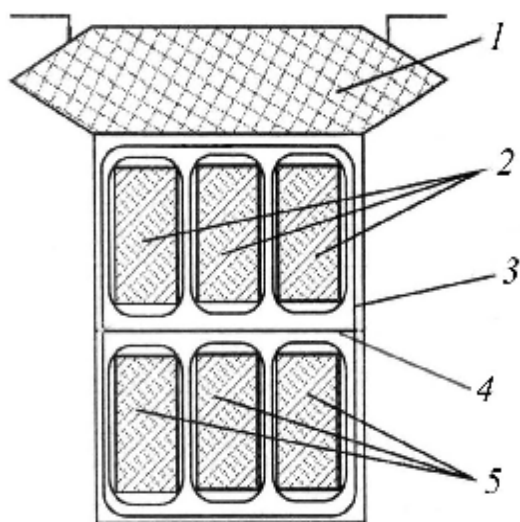


Рис. 19.20. Реальний паз машини постійного струму: 1 – пазовий клин; 2 – сторони секцій верхнього шару пазу; 3 – пазова ізоляція; 4 – ізоляційна прокладка; 5 – сторони секцій нижнього шару пазу

Число секцій S завжди дорівнює числу колекторних пластин K . Однак, число пазів на якорі Z може бути менше числа секцій S і колекторних пластин K . В цьому випадку в кожному пазу якоря u_n сторін секцій в верхньому і нижньому шарі. Схематично реальний паз, що складається з трьох елементарних пазів, показаний на рис. 19.20.

У тих випадках, коли число сторін секцій у пазу $u_n > 1$ приймають, що реальний паз на якорі складається з u_n елементарних пазів. Таким чином, за елементарний паз якоря приймається такий умовний паз, в верхньому і нижньому шарі якого розташовані по одній стороні секції.

Число елементарних пазів Z , дорівнює числу секцій S і числу колекторних пластин K

$$Z_e = S = K.$$

При виконанні розгорнутої схеми обмотки вона приводиться не в реальних пазах, а в елементарних пазах для більшої наочності.

Обмотки якорів можуть виконуватися рівносекційними (рис. 19.21, а) або східчастими (рис. 19.21, б).

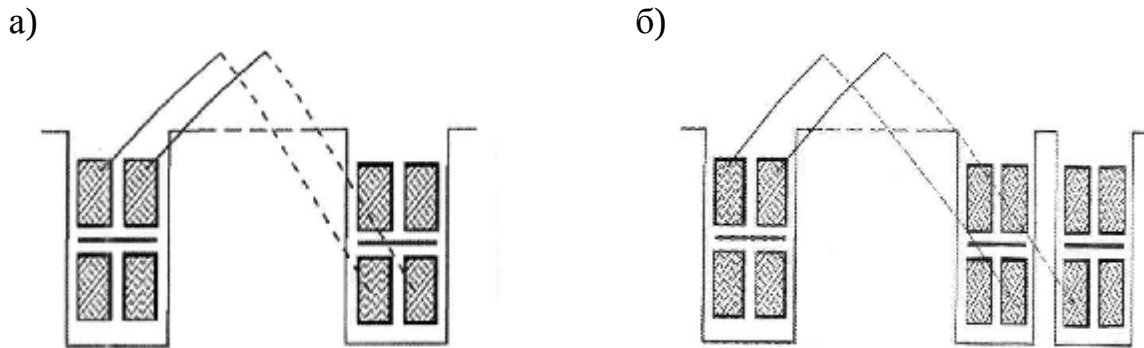


Рис. 19.21. Обмотки якоря: а – рівносекційні; б – східчасті

Обмотка якоря, в найпростішому випадку, має одну пару паралельних віток. Якщо умовно сполучити поверхню якоря і поверхню колектора, то цю пару паралельних віток можна представити у такий спосіб (рис. 19.22).

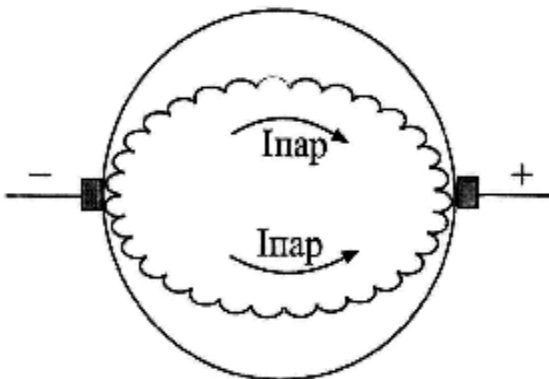


Рис. 19.22. Розподіл струму в обмотці якоря

ЕРС секцій в межах кожної паралельної вітки сумуються. Так як вітки з'єднуються паралельно, то ЕРС всієї обмотки якоря визначається величиною ЕРС однієї паралельної вітки тоді як величина струму якорної обмотки дорівнює сумі струмів усіх віток обмотки

$$I_a = 2aI_{пар} ,$$

де I_a – величина струму обмотки якоря;
 $I_{пар}$ – величина струму однієї паралельної вітки;
 $2a$ – число паралельних віток.

Обмотка якоря знаходиться в найкращих умовах, якщо струми паралельних віток однакові. Для цього необхідно, щоб ЕРС паралельних віток були однаковими.

Для забезпечення цієї умови при проектуванні обмотки виконують наступні умови **симетрії**:

- 1) на кожну пару паралельних віток повинно приходиться ціле число секцій і колекторних пластин:

$$\frac{S}{a} = \frac{K}{a} = \frac{Z_e}{a} = \text{ціле число.}$$

- 2) для симетричного розташування паралельних віток в магнітному полі необхідно щоб

$$\frac{2p}{a} = \text{ціле число},$$

де $2p$ – число головних полюсів машини;

a – число пар паралельних віток.

Якщо виконані ці умови, обмотка якоря називається *симетричною*.

Б. Характеристика основних типів обмоток якорів

Як відзначалося, обмотки якорів поділяють на *петльові*, *хвильові* і *комбіновані*. Петльова і хвильові обмотки, в свою чергу, можуть виконуватися як *прості* і *складні*.

Проста петльова обмотка. Ця обмотка може бути виконана в двох варіантах послідовного з'єднання секцій (рис. 19.23).

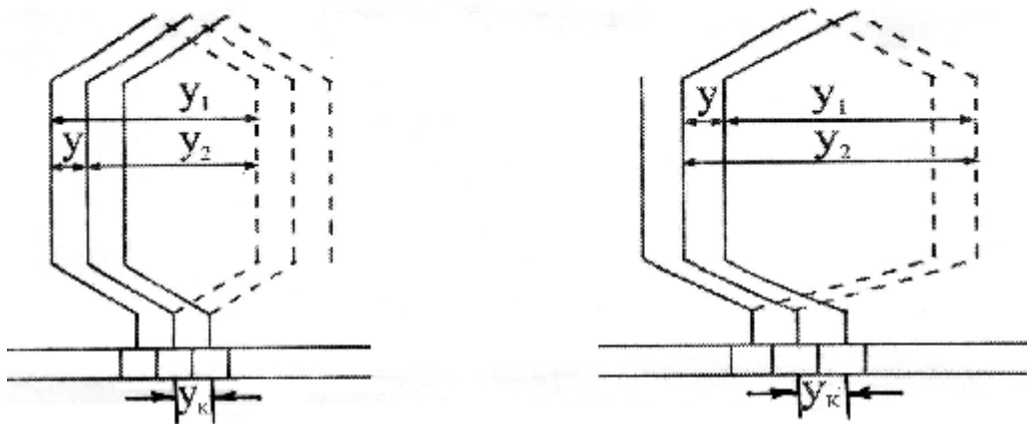


Рис. 19.23. Кроки петльової обмотки:
а – правоходова обмотка; б – лівоходова обмотка

В першому варіанті при обході послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря рухаємося управо, тому обмотка називається *правоходовою*. В другому варіанті – рухаємося уліво, тому обмотка називається *лівоходовою*.

В петльовій обмотці розрізняють наступні кроки:

- y_1 – перший частковий крок – є відстань між сторонами даної секції;
- y_2 – другий частковий крок – є відстань від сторони даної секції до найближчої сторони послідовно з'єднаної з нею секції;
- y – результуючий крок обмотки;
- y_k – крок по колектору.

Перераховані кроки обмотки знаходяться в наступному співвідношенні:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm e \quad (\text{елементарних пазів}) \quad (19.2)$$

де e – позитивний чи негативний дріб, що робить y_1 цілим числом.

$$y_2 = y - y_1 \quad (19.3)$$

Ці співвідношення між кроками обмотки справедливі для всіх типів обмоток якорів.

Відмінною рисою простої петльової обмотки є те, що її результуючий крок $y = \pm 1$; «+» для правоходової обмотки; «-» для лівоходової обмотки.

Проста петльова обмотка має число паралельних віток $2a = 2p$, тобто залежна від числа головних полюсів машини.

Приклад 19.1. Виконати розгорнуту схему простий петльової обмотки якоря для чотиріполюсної ($2p=4$) машини постійного струму. Обмотка правоходова, секції одновиткові. Осердя якоря має $Z=14$ пазів, при цьому в кожному пазу розташовано по дві активні сторони, тобто $Z = Z_e$.

Рішення. 1. Визначаємо кроки обмотки:
перший частковий крок по якорю

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm e = \frac{14}{4} + \frac{2}{4} = 4;$$

другий частковий крок по якорю

$$y_2 = y - y_1 = 1 - 4 = -3;$$

крок по колектору

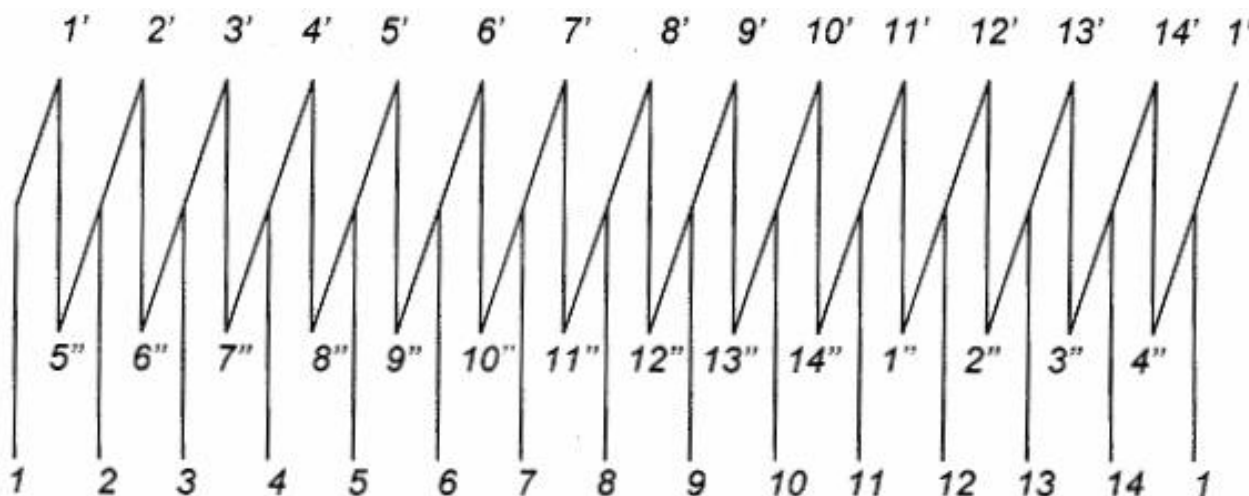
$$y_k = y = +1.$$

При виконанні розгорнутої схеми обмотки верхні сторони секцій в пазу будемо зображувати суцільними лініями, нижні – пунктирними.

Однієї і тією же цифрою позначаємо номер паза, номер секції і номер колекторної пластини. Тому що в пазу знаходяться дві активних сторони – одна у верхньому шарі, а інша в нижньому шарі, то при складанні обмотувальної таблиці верхню сторону позначаємо номером паза зі штрихом, нижню того ж паза – із двома штрихами, а номер колекторної пластини – відповідним номером паза.

2. Складаємо обмотувальну таблицю (табл. 19.1).

Таблиця 19.1



3. Користуючись таблицею, креслимо розгорнуту схему обмотки.

Як правило активні сторони секцій і її частини розташовуємо симетрично щодо колекторних пластин, до яких приєднуються секції (рис. 19.24).

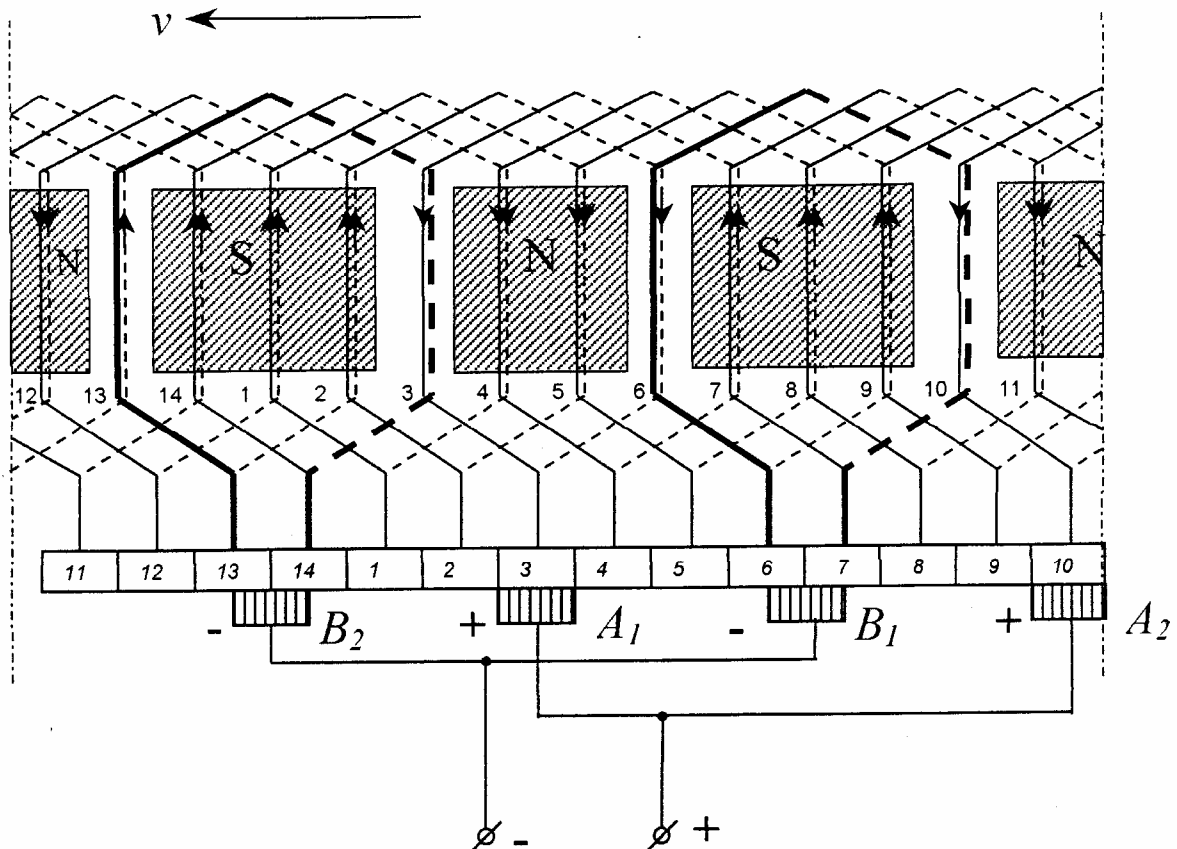


Рис. 19.24. Розгорнута схема простої петльової обмотки: $2P=4$; $S=14$

4.1. Розставляємо щітки на колекторі. Вони встановлюються по лініях геометричних нейтралей (по центру (осі) полюсів) на відстані

$$t = \frac{Z_{\vartheta}}{2p} = \frac{14}{4} = 3.5 \text{ п.п. (пазових поділок).}$$

4.2. Розставляємо полюси. Ширина полюсного наконечника

$$b_n = (0,65 \div 0,75)t ; \quad b_n = 0,75 \cdot 3,5 = 2,625 .$$

4.3. Вибираємо напрямок обертання обмотки якоря і визначаємо напрямок ЕРС в секціях обмотки.

4.4. Визначаємо полярність щіток.

4.5. Виділяємо короткозамкнені секції.

5. Складаємо електричну схему обмотки (рис. 19.25)..

Складна петльова обмотка. В простий петльовій обмотці число паралельних віток дорівнює числу головних полюсів машини. Тому при бажанні отримати обмотку з великим числом паралельних віток, наприклад, як це потрібно в низьковольтних машинах, довелося б робити машину багатополюсною. Це несприятливо відбилося б на її розмірах і вартості. Отже, при необхідності

одержати обмотку з великим числом паралельних віток застосовують складну петльову обмотку. Така обмотка як правило являє собою декілька

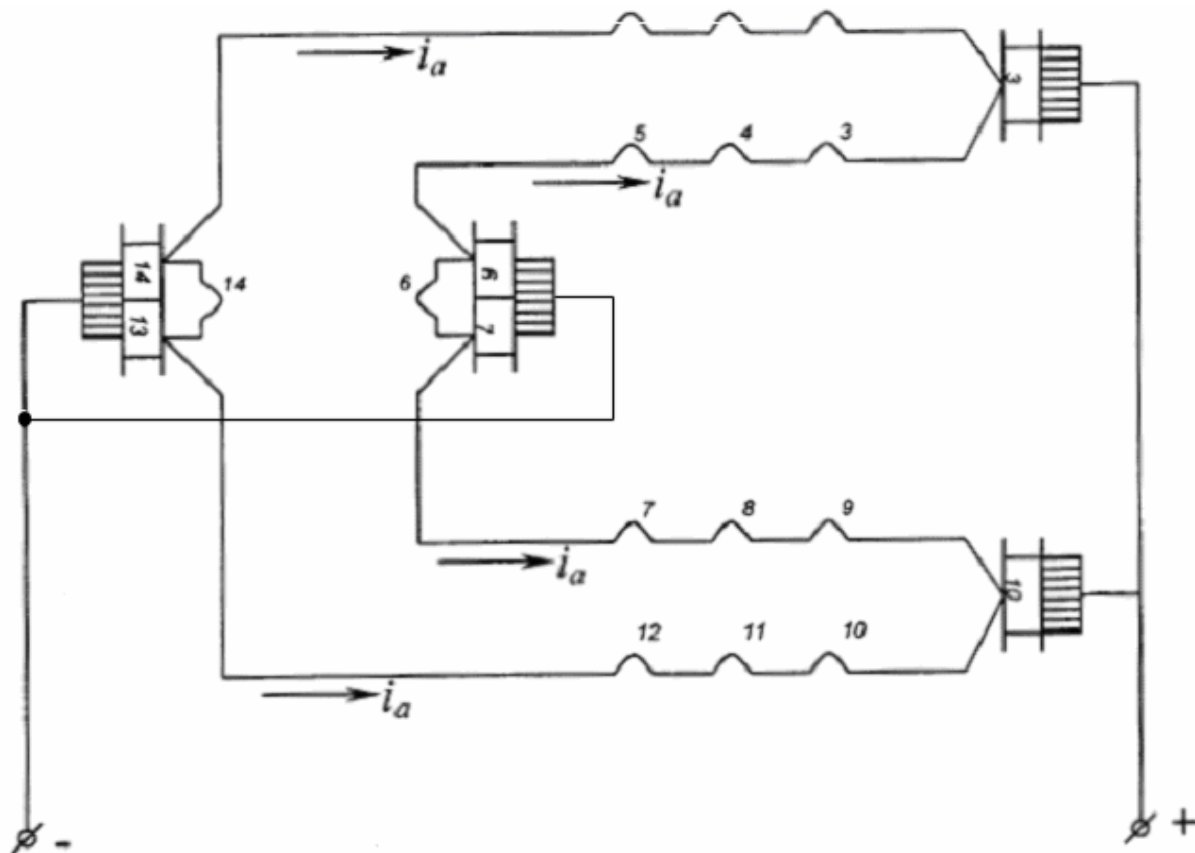


Рис. 19.25. Електрична схема обмотки, зображеної на рис. 19.24

простих петльових обмоток, покладених на один якір. Число паралельних віток в складній петльовій обмотці

$$2a = 2pt,$$

де m – коефіцієнт кратності, що визначає число простих петльових обмоток, з яких складена складна обмотка.

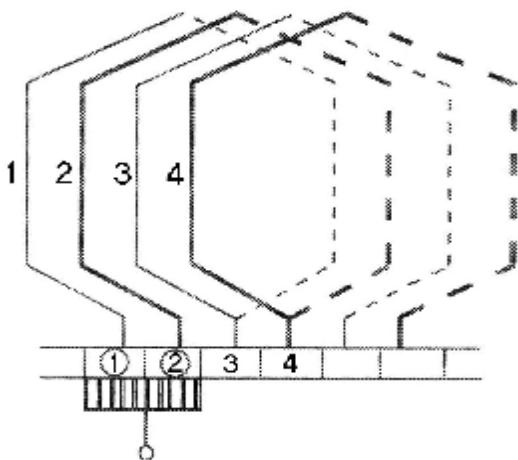


Рис. 19.26. Розташування секцій складної петльової обмотки

Ширина щіток в машині із складною петльовою обмоткою приймається таким, щоб кожна щітка одночасно перекривала не менш m колекторних пластин, тобто стільки пластин, скільки простих обмоток міститься в складній. В цьому випадку прості обмотки виявляються приєднаними паралельно одна до одної. На рис. 19.26 показана частина складної петльової обмотки, що складається з двох простих ($m = 2$). Для того, щоб щітка з'єднувала паралельно ці обмотки довелося секційні сторони і колекторні пластини однієї обмотки розсунути і розмістити між ними секційні сторони

і колекторні пластини другої обмотки. Тому крок обмотки по колектору і результуючий крок по якорю складної обмотки, в порівнянні з цими ж параметрами простої петльової обмотки, збільшився в m раз

$$y_k = y = m.$$

Перший частковий крок обмотки по якорі підраховується по відомій формулі

$$y = \frac{Z_a}{2p} m \epsilon.$$

Проста хвильова обмотка. Проста хвильова обмотка виходить при послідовному з'єднанні секцій, що знаходяться під різними парами полюсів. Кінці секцій хвильової обмотки приєднані до колекторних пластин, віддалених одна від одної на відстань кроку обмотки по колекторі $y_k = y$. За один обхід по якорю укладається стільки секцій, скільки пар полюсів має машина, при цьому кінець останньої по обходу секції приєднують до колекторної пластини, розташованої поруч з вихідною.

Ця обмотка так само може бути виконана в двох варіантах послідовного з'єднання секцій (рис. 19.27).

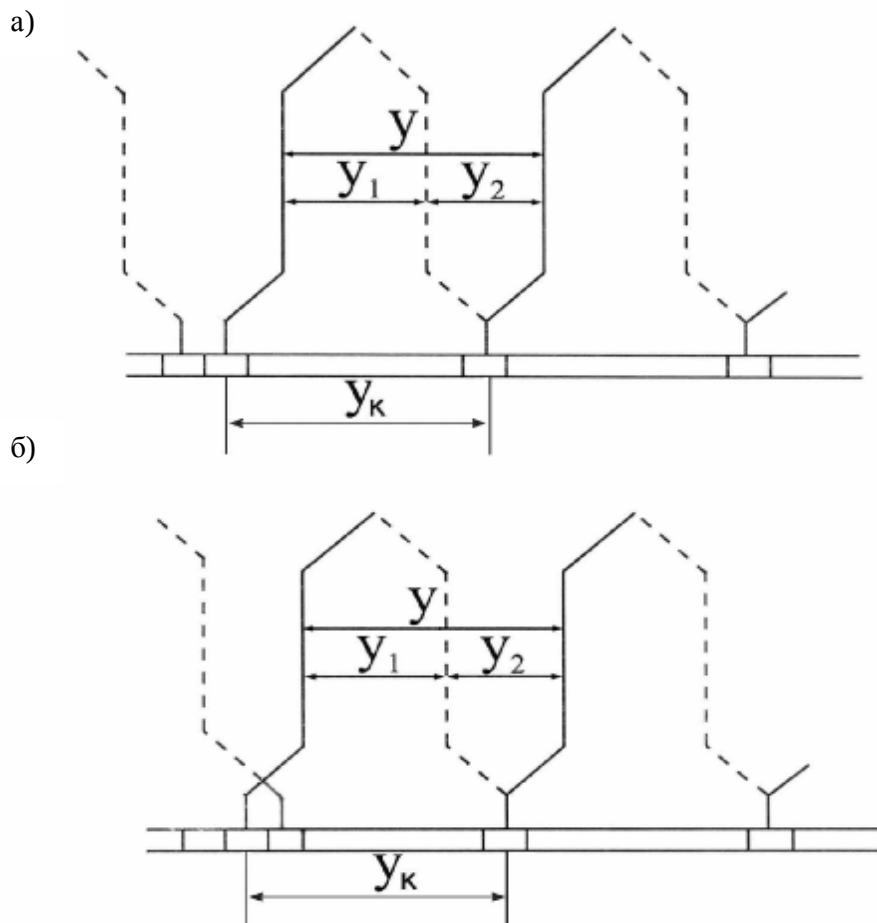


Рис. 19.27.Схеми простої хвильової обмотки: а – лівоходова; б – правоходова

В **1-му варіанті** – після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, розташованої ліворуч від вихідної пластини, тому вона називається лівоходовою (рис. 19.27, а).

В **2-му варіанті** – після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, що розташована праворуч від вихідної. Така обмотка називається правоходовою (рис. 19.27, б).

Тому що крок обмотки по колектору y_k охоплює простір по довжині окружності колектора, що відповідає парі полюсів, то зробивши один обхід по колектору, ми як би переміщаємося на число колекторних поділок, рівне $y_k p$, і переходимо до пластини, розташованої поруч з вихідною. На підставі сказаного можна записати

$$y_k p = \kappa \pm 1,$$

звідки крок обмотки по колектору, а отже, і результуючий крок по якорю, тобто

$$y_k = y = \frac{\kappa \pm 1}{p}. \quad (19.4)$$

Знак "мінус" відповідає лівоходовій обмотці, а "плюс" – правоходовій.

Виконання правоходової обмотки зв'язано з додатковою витратою міді через перехреснування лобових частин секцій, тому вона майже не має практичного застосування.

Перший частковий крок обмотки по якорю визначається по формулі (19.2), а другий крок

$$y_2 = y - y_1.$$

Розглянемо приклад побудови схеми простої хвильової обмотки.

Приклад 19.2. Чотириполюсна машина постійного струму має просту хвильову обмотку якоря, що складається з $S=15$ секцій. Побудувати розгорнуту схему цієї обмотки, а також виконати її електричну схему.

Рішення. 1. Визначаємо кроки обмотки

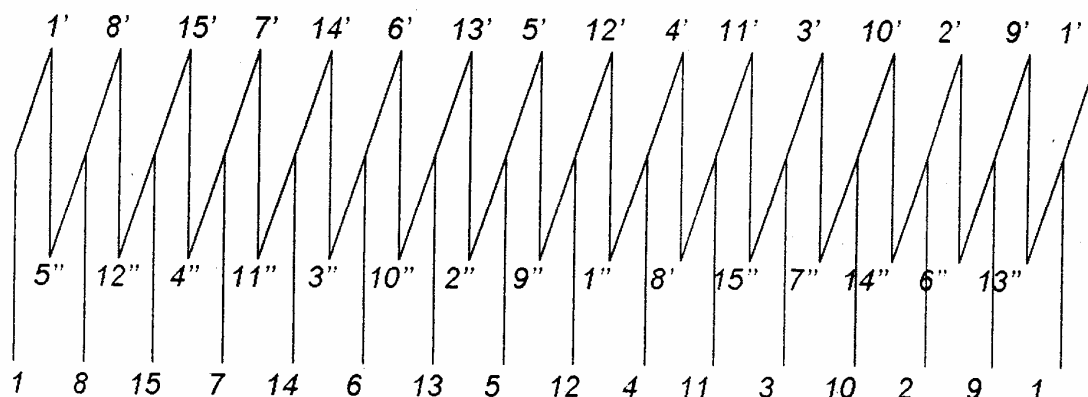
$$\begin{aligned} y_k = y &= \frac{\kappa \pm 1}{p} = \frac{15 - 1}{2} = 7; \\ y_1 &= \frac{Z_e}{2p} \pm e = \frac{15}{4} + \frac{1}{4} = 4; \\ y_2 &= y - y_1 = 7 - 4 = 3. \end{aligned}$$

При виконанні розгорнутої схеми обмотки верхні сторони секцій у пазу будемо зображувати суцільними лініями, нижні – пунктирними.

Однієї і тією же цифрою позначаємо номер паза, номер секції і номер колекторної пластини. Тому що в пазу знаходяться дві активні сторони секцій – одна у верхньому шарі, а інша в нижньому шарі, то при складанні обмотувальної таблиці верхню сторону позначаємо номером паза зі штрихом, нижню того ж паза – із двома штрихами, а номер колекторної пластини – відповідним номером паза.

2. Складаємо обмотувальну таблицю (табл. 19.2)

Таблиця 19.2



3. Користуючись таблицею, креслимо розгорнуту схему обмотки (рис. 19.28).

Як правило активні сторони секцій і її лобових частин розташовуємо симетрично щодо колекторних пластин, до яких приєднуються секції.

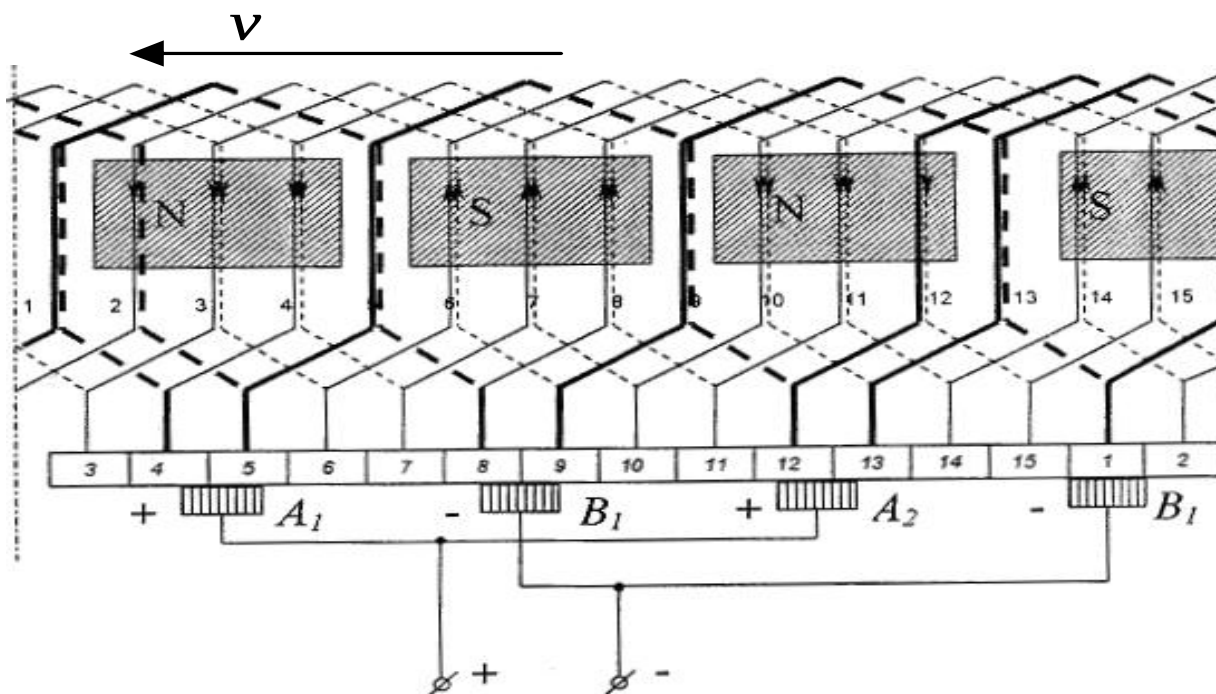


Рис. 19.28. Розгорнута схема простої хвильової обмотки: $2p = 4$; $S = 15$

При першому обході по якорі укладаємо секції 1 і 8 (рис. 19.28). Потім робимо другий обхід, третій і т.д., поки не будуть покладені всі п'ятнадцять секцій і обмотка не виявиться замкнутою.

3.1. Розставляємо щітки на колекторі. Вони встановлюються по лініях геометричних нейтралей (по центру (осі) полюсів) на відстані

$$t = \frac{Z_e}{2p} = \frac{15}{4} = 3.75 \text{ (пазових поділок).}$$

Жирними лініями на схемі показані секції, короткозамкнені щітками (при розглянутому положенні якоря).

3.2. Розставляємо полюси. Ширина полюсного наконечника

$$b_n = (0.65 \div 0.75)t = 0.75 \cdot 3.75 = 2.8 .$$

3.3. Вибираємо напрямок обертання обмотки якоря і визначаємо напрямок ЕРС у секціях обмотки.

3/4. Визначаємо полярність щіток.

3.5. Виділяємо короткозамкнені секції.

4. Складаємо електричну схему обмотки (рис. 19.29).

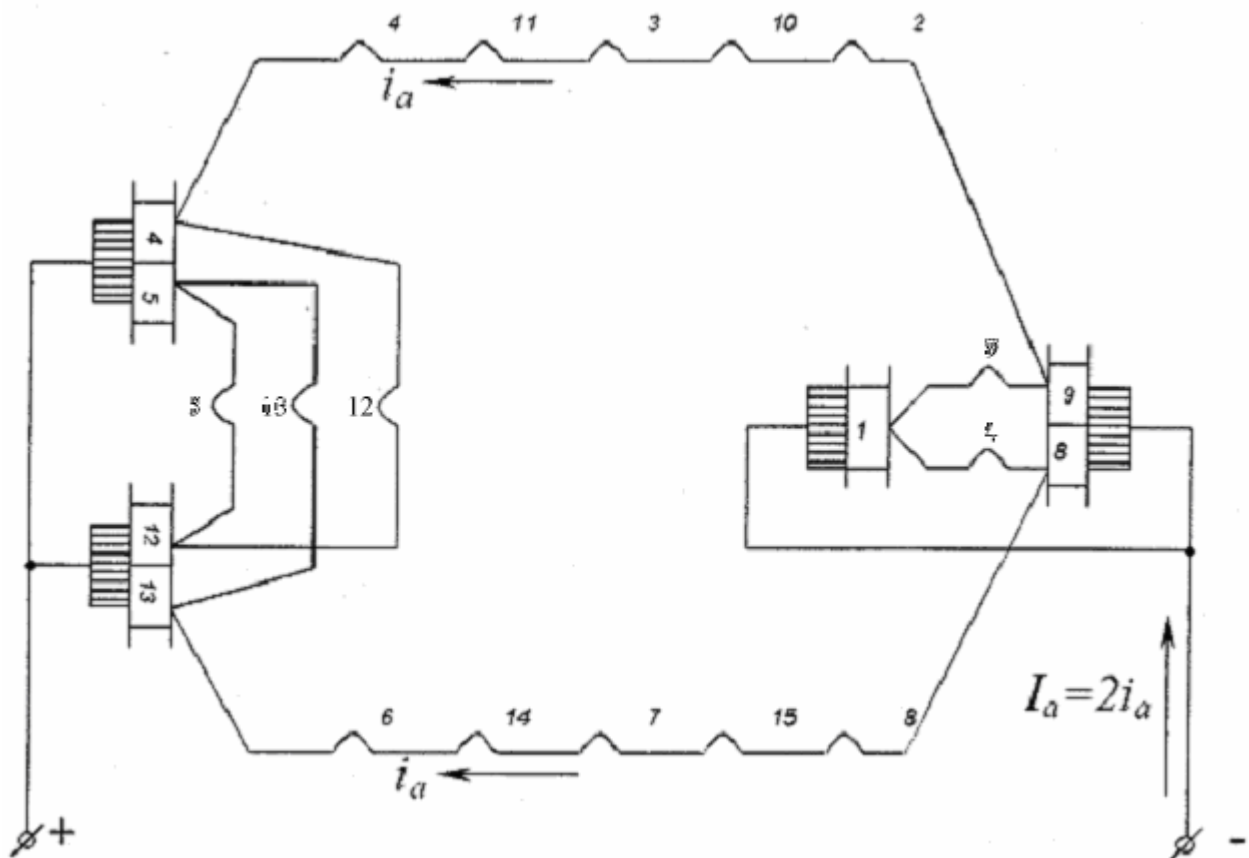


Рис. 19.29 Електрична схема обмотки, зображеної на рис. 19.28

З рис. 19.29 видно, що обмотка складається з двох паралельних віток ($2a = 2$). Зазначена залежність є характерною для простої хвильової обмотки, в якій число паралельних віток не залежить від числа полюсів і завжди дорівнює двом.

З приведених схем простої хвильової обмотки видно, що секції кожної паралельної вітки рівномірно розподілені під усіма полюсами машини. Слід також зазначити, що в такій обмотці можна було б обмежитися застосуванням тільки двох щіток, наприклад A_1 і B_1 . Однак у цьому випадку порушилася б симетрія обмотки, тому що число секцій в паралельних вітках стає неоднаковим: в одній вітці вісім секцій, а в іншій сім. Тому в машині як правило встановлюють стільки щіток, скільки головних полюсів, тим більше, що це дозволяє

зменшити величину струму, що приходить на кожну щітку, і зменшити розміри колектора.

Хвильові обмотки застосовують у високовольтних машинах.

Складна хвильова обмотка. У цій обмотці також можна виділити m простих обмоток, що замикаються по своїх пазах і своїх колекторних пластинах.

Особливістю складної хвильової обмотки є те, що після обходу послідовно з'єднаних секцій по окружності якоря, приходимо до колекторної пластини, що розташована ліворуч чи праворуч від вихідної на відстані m .

Результуючий крок цієї обмотки визначається виразом:

$$y = \frac{Z_e \pm m}{p} \left[\begin{array}{l} \text{елементарних} \\ \text{пазів} \end{array} \right]. \quad (19.5)$$

Перший частковий крок:

$$y_1 = \frac{Z_e}{2p} \pm e \left[\begin{array}{l} \text{елементарних} \\ \text{пазів} \end{array} \right].$$

Другий частковий крок:

$$y_2 = y - y_1 \quad [\text{елементарних пазів}].$$

Число паралельних віток цієї обмотки $2a = 2m$, тобто в m раз більше, ніж у простої обмотки.

Для виконання обмотки симетричною необхідно, щоб $2p/m$ дорівнювало цілому числу.

Ці обмотки застосовуються в машинах великої потужності.

Комбінована обмотка. Комбінована (жаб'яча) обмотка являє собою сполучення петльової і хвильовий обмоток, розташованих в одних пазах і приєднаних до загального колектора. Секція цієї обмотки показана на рис. 19.30.

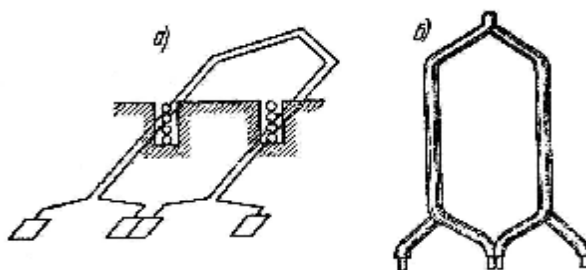


Рис. 19.30. Секція комбінованої обмотки: а – розташування в пазах; б – окрема секція

Так як кожна з простих обмоток двошарова, то комбінована обмотка укла-

дається в чотири шари, а до кожної пластини колектора припаюється чотири провідники.

Комбінована обмотка застосовується в потужних електричних машинах. Її основна перевага полягає в тому, що вона не вимагає вирівняльних з'єднань.

На рис. 19.31 показана принципова схема комбінованої обмотки.

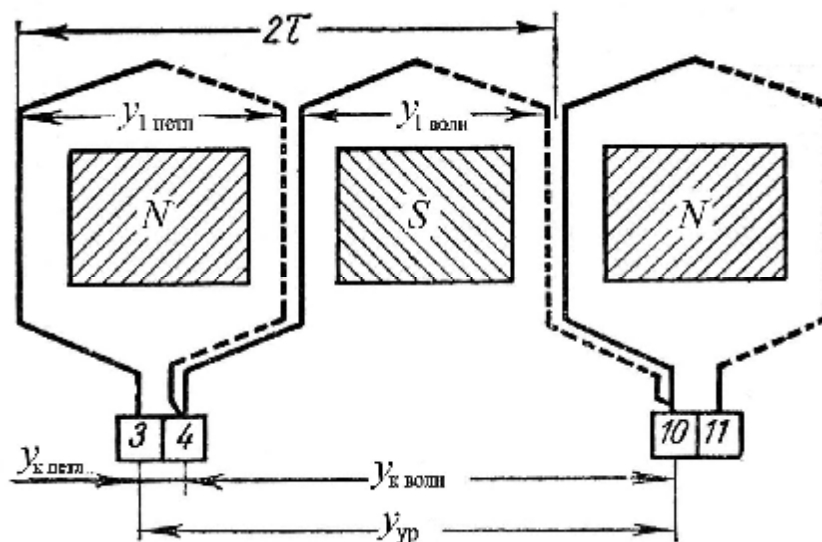


Рис. 19.31. Схема комбінованої обмотки.

Кроки по якорю обмоток, що складають комбіновану, роблять однаковими

$$y_{1петл} = y_{1хв}.$$

Крок комбінованої обмотки дорівнює сумі кроків простих обмоток

$$y_{1петл} + y_{1хв} = \frac{Z_e}{2p} + \frac{Z_e}{2p}. \quad (19.6)$$

Тому що $Z_e = K$, те $y_{1петл} + y_{1хв} = \frac{K}{p} = y_{зб}$, тобто крок обмотки по якорю дорівнює потенційному кроку.

Отже, ті колекторні пластини, що повинні бути з'єднані зрівнювачами, у комбінованій обмотці з'єднуються секціями, а тому вирівняльні з'єднання не застосовуються.

Вирівняльні з'єднання в обмотках якорів. В обмотках якорів машин постійного струму виконують вирівняльні з'єднання, які поділяють на вирівнювачі *першого* і *другого* роду.

Вирівнювачі першого роду. Необхідність установки цих вирівняльних з'єднань пояснюється наступними причинами. При зборці машини постійного

струму повітряний зазор між якорем і головними полюсами для однієї пари полюсів, може бути іншим, ніж для іншої пари полюсів. З цієї причини магнітний опір на шляху проходження магнітних силових ліній поля збудження може бути різним для різних пар полюсів. В результаті цього магнітні потоки головних полюсів в машині можуть відрізнятися за значенням. Тому ЕРС, індукована цими потоками в паралельних вітках може бути неоднакова за значенням. У цьому випадку між паралельними вітками починають протікати вирівняльні струми від паралельних віток з великим значенням ЕРС до паралельних віток з меншим значенням ЕРС.

Шлях, по якому протікає вирівняльний струм, схематично зображений на рис. 19.32.

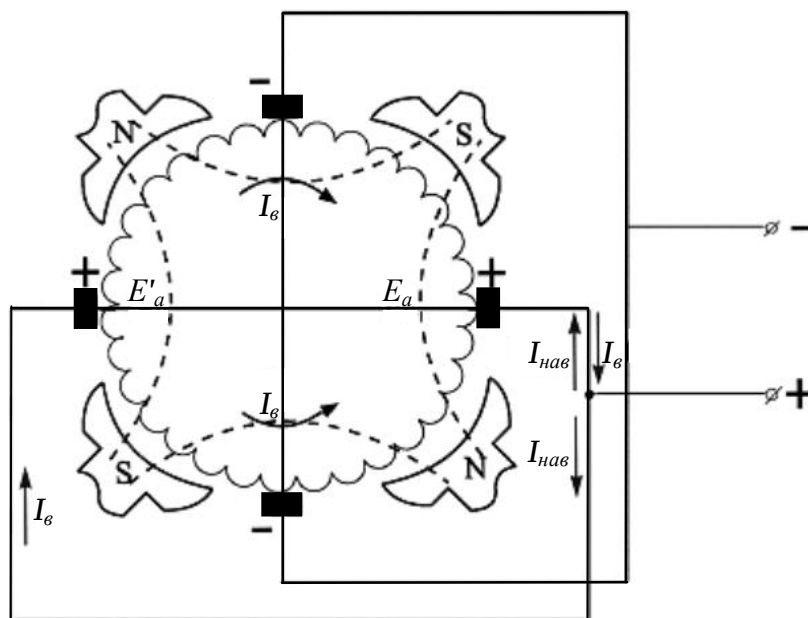


Рис. 19.32. Вирівняльні струми в паралельних вітках простої петльової обмотки при магнітній несиметрії

Нехай $E'_a > E_a$. Зі схеми випливає, що вирівняльний струм тече по шляху, що проходить через колектор і щітки.

Отже, крім навантажувального струму він додатково завантажує щітковий апарат машини, погіршуючи умови струмознімання на колекторі. З цієї причини підсилюється іскріння під щітками, що скорочує термін служби машини.

З тією метою, щоб змінити шлях вирівняльного струму, тобто, щоб він протікав, минаючи колектор і щітки, виконують **вирівняльні з'єднання першого роду**. Ці вирівнювачі з'єднують теоретично точки рівного потенціалу, що належать сусіднім паралельним віткам.

Ці точки знаходяться на відстані $y_e = S/a = K/a = Z_e/a$ - крок вирівнювача. Схематично вирівняльні з'єднання першого роду представлені на рис. 19.33.

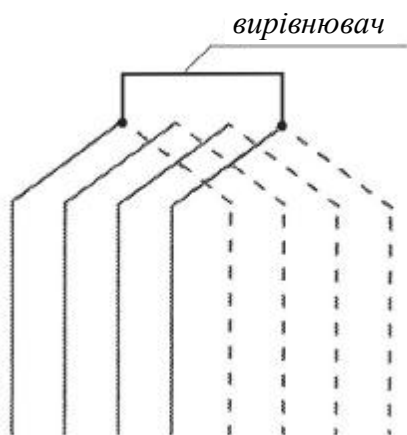


Рис. 19.33. Вирівняльні з'єднання першого роду

Повне число вирівнювачів першого роду дорівнює K/p . Однак, як правило, не виконують повне число вирівнювачів, а виконують від $1/6$ до $1/2$ повного числа.

Конструктивно вирівнювачі виконують проводом, перетин якого не більш 50% перетину секцій.

Ці вирівнювачі можуть бути встановлені з боку колектора, з'єднуючи рівнопотенційні колекторні пластини, чи з боку, протилежному колектору, як це показано на приведеній вище схемі.

Вирівнювачі другого роду. Ці вирівнювачі встановлюються в складних обмотках якорів, тобто

в складних петльових і хвильових обмотках.

Необхідність установки таких вирівнювачів пояснюється у такий спосіб. В складних петльових і хвильових обмотках прості обмотки, що утворюють складну, з'єднані паралельно через щітковий контакт. Але забезпечити однаковий контакт щіток із усіма простими обмотками практично неможливо, тому струм між простими обмотками розподіляється неоднаково, що порушує рівномірний розподіл потенціалу по колектору і може викликати на ньому іскріння. Для усунення цього небажаного явища застосовують **вирівняльні з'єднання другого роду**, за допомогою яких прості обмотки, що входять в складну, електрично з'єднують між собою в точках рівного потенціалу. Таким чином, якщо вирівнювачі першого роду усувають небажані наслідки магнітної несиметрії, то вирівнювачі другого роду усувають нерівномірність розподілу потенціалу по колектору при складних обмотках якоря.

На розгорнутій схемі обмотки вирівнювачі другого роду представлені на рис. 19.34.

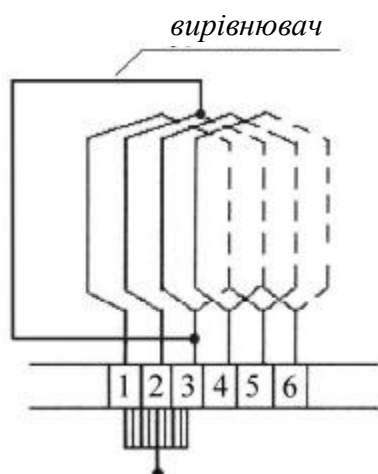


Рис. 19.34. Вирівняльні з'єднання другого роду

З приведеної схеми випливає, що вирівнювачі другого роду з'єднують рівнопотенційні точки, розташовані на протилежних сторонах якоря. Отже, для конструктивного виконання таких вирівнювачів необхідно передбачити канали в корпусі якоря в осьовому напрямку.

Таким чином, установка вирівнювачів другого роду поліпшує умову струмознімання на колекторі в складних обмотках якорів.

Розглядаючи область застосування вирівнювачів першого і другого роду в обмотках якорів необхідно відзначити наступне:

1. Прості петльові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів першого роду.
2. Складні петльові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів першого і другого роду.

3. Прості хвильові обмотки якорів не вимагають установки вирівнювачів.
4. Складні хвильові обмотки якорів вимагають установки вирівнювачів другого роду.
5. Комбіновані обмотки не вимагають установки вирівнювачів.

19.4 Електрорушійна сила обмотки якоря та електромагнітний момент

Значення ЕРС, індукованої в провіднику обмотки якоря, визначається виразом (19.1)

$$e = Blv$$

Магнітна індукція B в повітряному зазорі між полюсними наконечниками і поверхнею якоря має неоднакові значення. Як правило в машинах постійного струму її розподіл по поверхні якоря визначається кривою $ABCD$, форма якої близька до трапеції (рис. 19.35). Площа, обмежена цією кривою і віссю абсцис, пропорційна магнітному потоку в повітряному зазорі під одним полюсом. Так як значення індукції B в межах полюсного поділку t різні, то для визначення ЕРС зручно скористатися середнім значенням магнітної індукції, прийнявши його рівним висоті прямокутника $AB'C'D$ з основою t , площа якого дорівнює площі фігури $ABCD$. Тоді середнє значення ЕРС, індукованої в одному провіднику, покладеному на поверхні якоря, дорівнює

$$E_{cp} = B_{cp} l u .$$

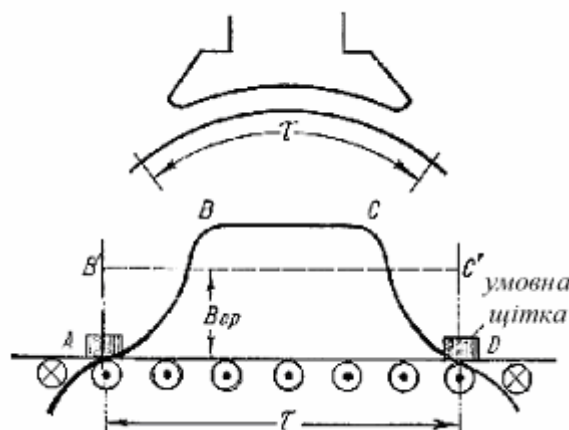


Рис. 19.35. Розподіл магнітної індукції в зазорі машини постійного струму

Обмотка якоря складається з N провідників, однак ЕРС обмотки визначається величиною ЕРС лише однієї паралельної вітки, що містить $\frac{N}{2a}$ послідовно з'єднаних провідників.

Тому ЕРС обмотки якоря

$$E_a = E_{cp} \frac{N}{2a} = B_{cp} l u \frac{N}{2a}, \quad (19.7)$$

де u - окружна швидкість обертового якоря, м/с;

$$u = \frac{p D n}{60},$$

l – довжина якоря, м; n – швидкість обертання якоря, об/хв; D – діаметр якоря, м.

Довжину окружності якоря $p D$ можна виразити у такий спосіб:

$$p D = t 2 p,$$

тоді

$$u = \frac{t 2 p n}{60}.$$

Підставивши цей вираз в (19.7), одержимо:

$$E_a = B_{cp} l \frac{t 2 p n}{60} \cdot \frac{N}{2a}.$$

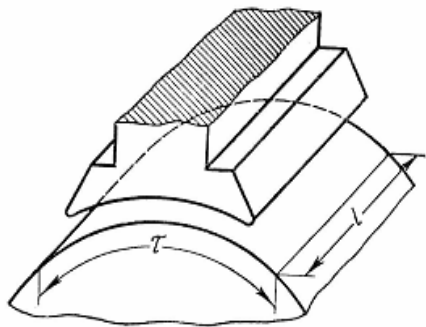


Рис. 19.36. До висновку формули ЕРС обмотки якоря

Добуток $l t$ є площа, що пронизує магнітний потік одного полюса (рис. 19.36), тому

$$B_{cp} l t = \Phi,$$

де Φ – магнітний потік у повітряному зазорі під одним полюсом.

Отже, ЕРС обмотки якоря

$$E_a = \frac{p N}{60 a} \Phi n. \quad (19.8)$$

ною

Величина $\frac{p N}{60 a}$ для даної машини є постій-

$$c_e = \frac{p N}{60 a}. \quad (19.9)$$

Остаточню

$$E_a = c_e \Phi n. \quad (19.10)$$

Тут ЕРС E_a виражена у вольтах, а магнітний потік Φ – у веберах (Вб).

Значення ЕРС обмотки якоря залежить від ширини секції y_1 . Найбільше значення ЕРС відповідає повному (діаметральному) кроку ($y_1 = t$), тому що в цьому випадку з кожною секцією обмотки зчіплюється весь основний магнітний потік Φ . Якщо ж секція укорочена ($y_1 < t$), то кожна секція зчіплюється лише з частиною основного потоку, а тому ЕРС обмотки якоря зменшується. Такий же ефект при подовженому кроці секцій ($y_1 > t$), тому що в цьому випадку кожна секція обмотки зчіплюється з основним потоком однієї пари полюсів і частково з потоком сусідньої пари, що має протилежний напрямок, так що результуючий потік, зчеплений з кожною секцією, стає менше потоку однієї пари полюсів. З цієї причини в машинах постійного струму практичне застосування одержали секції з повним або укороченим кроком.

На ЕРС машини впливає положення щіток: при перебуванні щіток на геометричній нейтралі ЕРС найбільша, тому що в цьому випадку в кожній паралельній вітці обмотки всі секції мають однаковий напрямок ЕРС; якщо ж щітки змістити з нейтралі, то в паралельних вітках виявляться секції з протилежним напрямком ЕРС, в результаті ЕРС обмотки якоря буде зменшена.

При досить великому числі колекторних пластин зменшення ЕРС машини при зрушенні щіток з нейтралі враховується множником $\cos b$:

$$E_a = c_e \Phi n \cos b \quad (19.11)$$

де b – кут зсуву осі щіток відносно нейтралі.

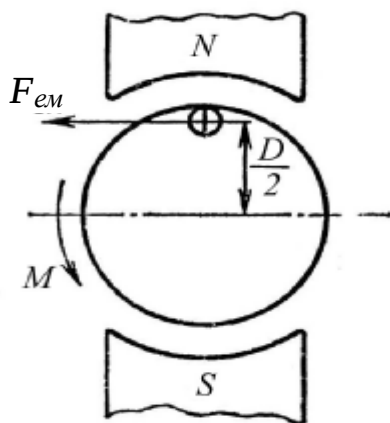


Рис. 19.37. До поняття про електромагнітний момент машини постійного струму

Електромагнітний момент. При проходженні по пазових провідниках обмотки якоря струму $i_a = I_a / (2a)$, він взаємодіє з основним магнітним полем машини і на кожний провідник обмотки діє електромагнітна сила (рис. 19.37)

$$F_{em} = B_{cp} l i_a,$$

де B_{cp} – середнє значення магнітної індукції в зазорі; l – довжина якоря.

Напрямок цих сил визначають за правилом лівої руки. Сукупність електромагнітних сил створює електромагнітний момент.

Величину електромагнітного моменту

M_{em} можна представити виразом

$$M_{em} = F_{em} \frac{D}{2} N = B_{cp} l i_a \frac{D}{2} N,$$

де N - кількість активних провідників в обмотці якоря.

Враховуючи, що $i_a = \frac{I_a}{2a}$, $pD = 2pt$, а корисний магнітний потік збудження $\Phi = B_{cp}lt$ (рис. 19.35), одержимо

$$M_{em} = B_{cp}l \frac{I_a}{2a} \cdot \frac{2pt}{2p} N = \frac{pN}{2pa} \cdot \Phi I_a,$$

або

$$M_{em} = C_m \Phi I_a,$$

де $C_m = \frac{pN}{2pa}$ – величина, постійна для даної машини.

Потік Φ виражається у веберах (Вб), а момент M_{em} – у ньютонно-метрах ($H \cdot m$).

Контрольні питання

1. Яке призначення колектора в генераторі і двигуні?
2. Чому станину машини роблять із сталі?
3. У чому принципова відмінність обмоток якоря від обмоток статора безколекторних машин змінного струму?
4. Якими параметрами характеризується обмотка якоря?
5. Скільки паралельних віток має обмотка якоря шестиполусної машини у випадках простої петльової і простої хвильової обмоток.
6. В скільки разів зміниться ЕРС обмотки якоря шестиполусної машини, якщо просту хвильову обмотку замінити простою петльовою при тій же числі секцій?
7. В яких обмотках якоря застосовують вирівнювачі першого і другого ряду?
8. Які достоїнства комбінованої обмотки?
9. Як впливають ширина секції і положення щіток на ЕРС машини?
10. Якими розуміннями керуються при виборі типу обмотки якоря?

Глава 20. Магнітне поле машини постійного струму

20.1. Магнітне коло машини постійного струму при холостому ході і метод його розрахунку

Якщо машина постійного струму працює в режимі холостого ходу, то струм її силового кола, тобто кола якоря $I_a = 0$ (у випадку генератора) чи $I_a \approx 0$ (у випадку двигуна).

Отже, в магнітному колі машини в цьому режимі існує магнітне поле, створене тільки обмоткою збудження.

Умовно це магнітне поле можна представити з двох потоків:

Φ_0 – основного магнітного потоку;

Φ_s – потоку розсіювання головних полюсів.

Основний магнітний потік Φ_0 – є магнітний потік в повітряному зазорі машини між якорем і головним полюсом на довжині окружності по якорю, рівному одному полюсному поділку t . Цей магнітний потік визначає величину ЕРС E_a , що індукується в обмотці якоря полем збудження. При проектуванні машин постійного струму з заданими номінальними даними, виникає необхідність розрахувати необхідну величину основного магнітного потоку, що забезпечує необхідну ЕРС E_a і, отже, U_n .

З цією метою виконується розрахунок магнітного кола машини. В основі такого розрахунку використовується закон повного струму:

$$\oint H dl = \sum i, \quad (20.1)$$

де H – напруженість магнітного поля уздовж замкнутої силової лінії; dl – елемент довжини лінії; $\sum i$ – повний струм, що охоплюється замкнутою силовою лінією.

Застосувати закон повного струму в загальному виді для магнітного кола машини постійного струму важко, тому що ця силова лінія проходить в середовищах з різною магнітною проникністю.

Тому приймаємо наступні допущення:

- 1) магнітне коло машини поділяють на ділянки, для яких вважають, що напруженість магнітного поля уздовж силової лінії постійна;
- 2) вважають, що в області повітряного зазору силові лінії йдуть через зубці якоря і не проходять через паз якоря.

Представимо магнітне коло машини постійного струму, що складається з таких ділянок (рис. 20.1):

- $L_{\text{я}}$ – довжина середньої магнітної силової лінії в ярмі з розрахунку на один полюс;
- h_m – довжина середньої магнітної силової лінії в головному полюсі;
- d – довжина середньої магнітної силової лінії в повітряному зазорі;

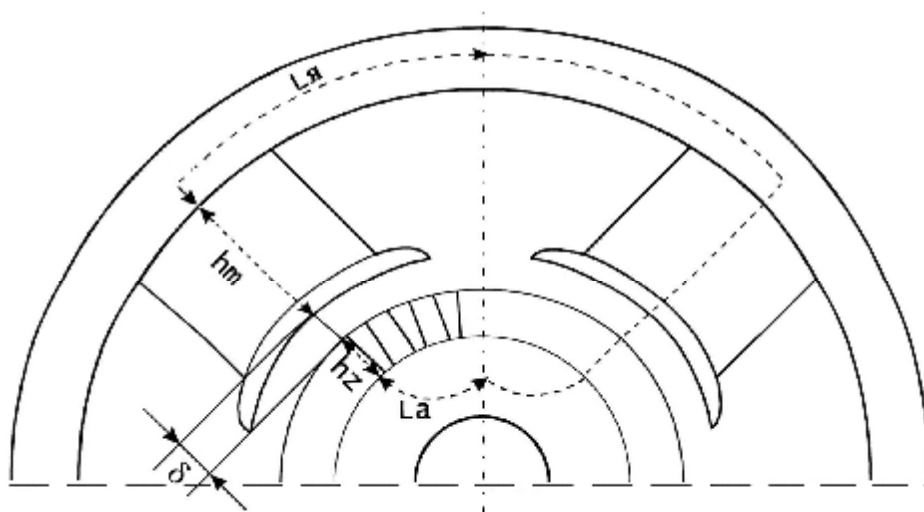


Рис 20.1. Магнітне коло машини постійного струму

- h_z – довжина середньої магнітної силової лінії в зубці якоря;
- L_a – довжина середньої магнітної силової лінії в спинці якоря

З урахуванням прийнятих допущень закон повного струму для замкнутої силової лінії основного магнітного потоку записується так:

$$H_{\text{я}} 2L_{\text{я}} + H_m 2h_m + H_d 2d + H_z 2h_z + H_a 2L_a = 2I_3 W_3, \quad (20.2)$$

де $H_{\text{я}}$, H_m , H_d , H_z , H_a – напруженість магнітного поля уздовж силової лінії на відповідних ділянках магнітного ланцюга; $I_3 W_3$ – повний струм, що охоплюється силовою лінією і представляє МРС збудження, з розрахунку на один полюс.

У **лівій частині** приведенного рівняння представлені МРС окремих ділянок магнітного кола машини.

У **правій частині** представлена МРС збудження.

Тому в загальному виді це рівняння з розрахунку на один полюс має вигляд:

$$F_{\text{я}} + F_m + F_d + F_z + F_a = F_3. \quad (20.3)$$

Використовуючи це рівняння, розрахунок магнітного кола машини постійного струму виконується в наступній послідовності:

1. По заданій величині номінальної напруги визначається необхідне значення ЕРС обмотки якоря.

$$E_a = U_n \pm DU, \quad (20.4)$$

де $DU \approx 10B$ – спад напруги в колі якоря; "+" – для генератора; "-" – для двигуна.

2. За значенням ЕРС обмотки якоря E_a знаходиться необхідне значення основного магнітного потоку Φ_0 .

З огляду на те, що

$$E_a = c_e \cdot n_n \cdot \Phi_0 \quad \Rightarrow \quad \Phi_0 = E_a / (c_e n_n), \quad (20.5)$$

де n_n - номінальна частота обертання машини (об/с).

3. За знайденим значенням Φ_0 розраховується значення індукції в поперечному перерізі кожної з ділянок магнітного кола.

$$B_j = \Phi / C_j, \quad (20.6)$$

де C_j - поперечний переріз відповідної ділянки.

4. За значенням індукції B_j розраховується напруженість магнітного поля уздовж силової лінії на кожній з ділянок H_j . На ділянках по сталі, напруженість розраховується з використанням **кривої намагнічування** сталі.

5. Використовуючи попередній ескіз магнітного ланцюга машини, визначається середня довжина магнітної силової лінії на кожній з ділянок L_j і розраховується МРС для кожної з ділянок магнітного кола:

$$F_j = H_j L_j \quad (20.7)$$

6. Підсумовуючи МРС ділянок магнітного кола, розраховуємо необхідне значення МРС збудження, тобто:

$$F_d + F_z + F_m + F_{\text{я}} + F_a = F_3 \quad (20.8)$$

За значенням МРС збудження визначається необхідне значення струму збудження I_B і число витків обмотки збудження W_3 , з огляду на $F_3 = I_3 W_3$.

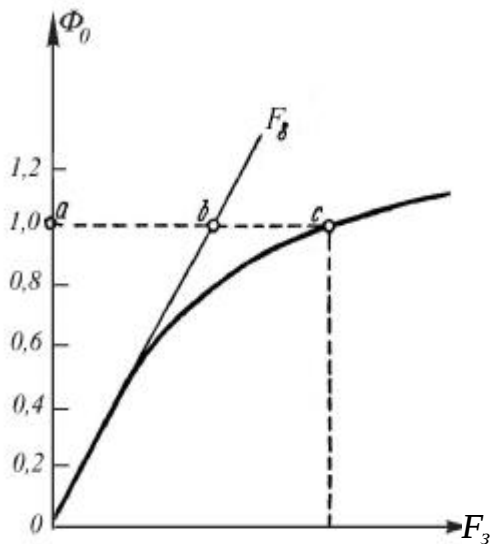
Після цього виконується розміщення обмотки збудження на полюсі з використанням попереднього ескізу магнітного кола.

Якщо обмотка збудження не розміщається, чи навпроти, у міжполюсному просторі багато вільного місця, то ескіз коректується, і розрахунок у приведеному порядку повторюється. Таким чином, **розрахунок** магнітного кола машини виконується **методом послідовного наближення**.

Розглядаючи порядок розрахунку магнітного кола, було встановлено, що Φ_0 розраховується відповідно значенню U_n .

Якщо взяти частки цього потоку ($0,25 \Phi_0$; $0,5 \Phi_0$; $0,75 \Phi_0$; $1,0 \Phi_0$; $1,25 \Phi_0$) і для кожної з цих часток, розглянутим вище способом, визначити F_3 , одержимо залежність $\Phi_0 = f(F_3)$, що називається кривою намагнічування машини.

У початковій частині крива намагнічування має характер прямої лінії. Це пояснюється тим, що при малих значеннях потоку Φ_0 , сталь машини слабо насичена, і МРС витрачається на проведення потоку практично тільки через зазор, тобто середовище з постійною магнітною проникністю. Продовживши прямолінійну частину кривої, ми одержимо залежність МРС зазору від потоку Φ_0 , зображену на рис. 20.2 прямої Ob .



В міру збільшення потоку Φ_0 , усе більша частина МРС витрачається на проведення потоку по сталі. Ця частина МРС визначається відрізком bc . По відношенню відрізків bc і ab можна судити про ступінь насичення стали при заданому значенні потоку Φ_0 .

Ступінь насичення магнітного ланцюга оцінюється коефіцієнтом насичення:

$$K_m = ac / ab$$

як правило

Рис. 20.2. Залежності $\Phi_0 = f(F_3)$

$$K_m = 1,2 - 1,35.$$

Змінюючи величину індукції в окремих ділянках кола, а отже, і ступінь їхнього насичення, можна змінити вид кривої намагнічування.

20.2. Магнітне коло машини постійного струму при навантаженні

А. Фізична картина магнітного поля в машині, що працює під навантаженням. Реакція якоря

Основний магнітний потік Φ_0 . Як відзначалося, при холостому ході машини постійного струму, струм обмотки якоря $I_a = 0$ й в магнітному колі існує поле, створене тільки обмоткою збудження, якщо $I_z > 0$.

Фізична картина магнітних силових ліній поля збудження на двополюсній моделі представлена на рис. 20.3.

На рис. 20.3 поверхня якоря і поверхня колектора умовно сполучені. Вісь, що проходить в міжполюсному просторі головних полюсів, називається **геометричною нейтраллю**.

Розподіл основного магнітного потоку має симетричний характер як щодо осової лінії $y-y_1$ основних полюсів, так і щодо геометричної нейтралі, що

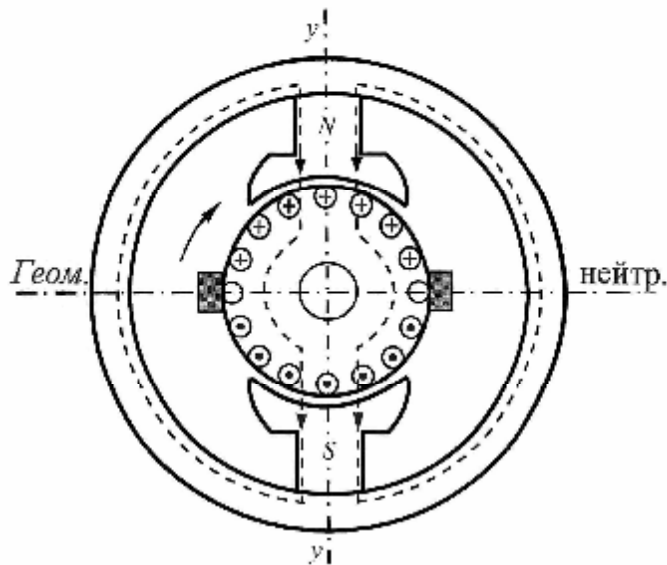


Рис. 20.3. Поле основних полюсів
(знаки "+" і "•" визначають напрямок ЕРС, що наводиться в якорі).

займає незмінне положення в просторі.

При обертанні якоря за годинниковою стрілкою в обмотці якоря наводиться ЕРС у напрямках, показаних на рис. 20.3 крапками і хрестиками.

Потік якоря Φ_a . Припустимо, що машина не збуджена і якорі нерухомий ($I_s = 0$ і $n = 0$). Щітки поставимо по геометричній нейтралі і підведемо до них струм від якого-небудь стороннього джерела постійного струму, наприклад, акумуляторної батареї, у такому напрямку, щоб напрямок струмів у вітках обмотки збіглися з напрямком ЕРС на рис. 20.3. Поле навколо провідників розташовується з ним концентрично, і, напрямок магнітних силових ліній визначається за правилом буравчика (рис. 20.4).

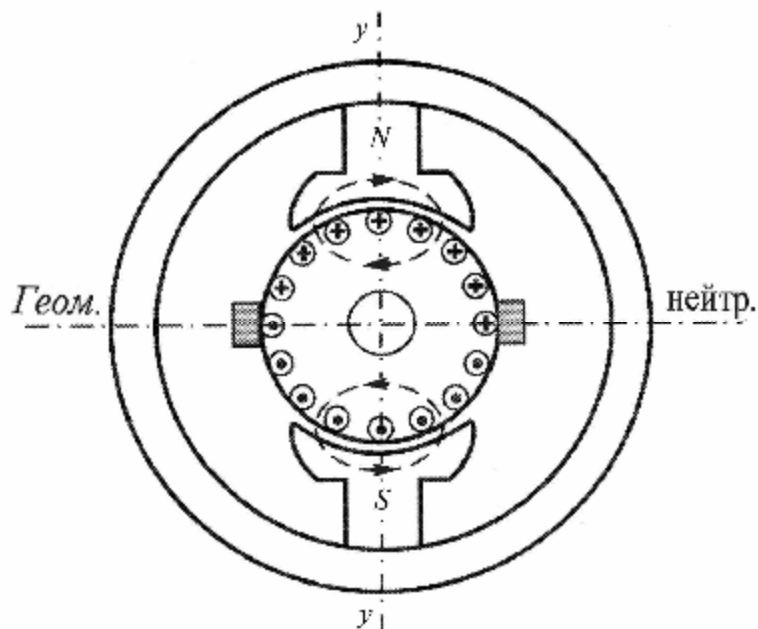


Рис. 20.4. Поле якоря (знаки "+" і "•" визначають напрямок струму в обмотці якоря).

З рис. 20.4 випливає, що при установці щіток на геометричній нейтралі, магнітні силові лінії поля якоря йдуть впоперек осі головних полюсів.

В реальній машині постійного струму, що працює під навантаженням, існує результуюче магнітне поле, утворене в результаті взаємодії поля збудження з полем обмотки якоря.

Картину магнітних силових ліній цього результуючого поля одержуємо накладенням на поле збудження поля обмотки якоря.

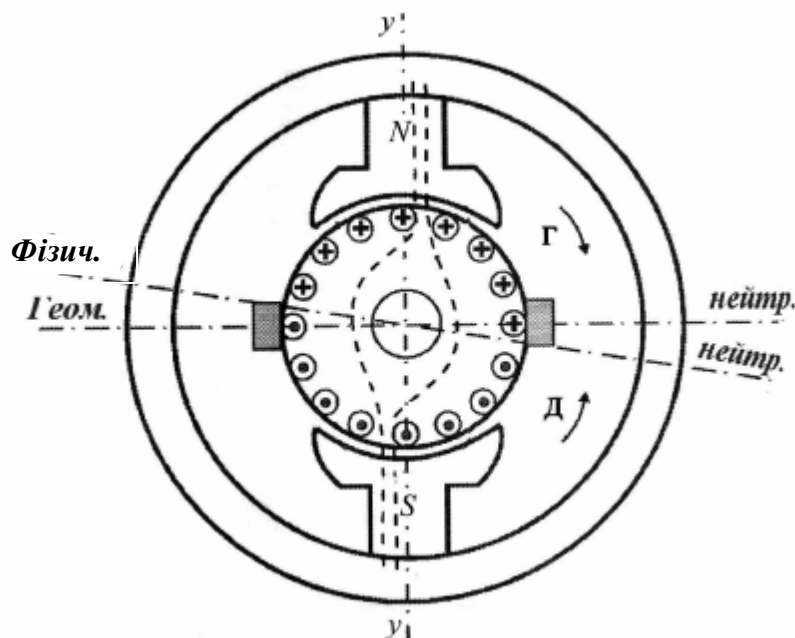


Рис. 20.4. Результуюче поле якоря

З картини силових ліній результуючого поля видно, що поле обмотки якоря впливає на поле збудження.

Цей **вплив** називається **реакцією якоря**. Відповідно, поле обмотки якоря називається полем реакції якоря, як і в синхронних машинах.

При установці щіток на геометричній нейтралі, силові лінії поля реакції якоря йдуть впоперек осі головних полюсів. Тому реакція якоря в даному випадку називається **поперечною**.

Під дією поперечної реакції якоря нейтральна лінія поля машини зміщується з геометричної нейтралі в положення **фізичної нейтралі**.

Фізична нейтраль проходить через такі дві точки на поверхні якоря, в яких провідники обмотки якоря ковзають уздовж силових ліній, не перетинаючи їх.

У **генератора фізична нейтраль**, при роботі машини під навантаженням, зміщується з геометричної нейтралі **по напрямку обертання** якоря.

У двигуна – проти напрямку обертання.

Якщо чи свідомо, чи випадково змістити щітки з геометричної нейтралі на 90° , то силові лінії поля реакції якоря будуть розташовуватися уздовж осі головних полюсів, тобто реакція якоря буде подовжньою.

В залежності від того, у яку сторону змістити щітки, подовжня реакція якоря буде **розмагнічуючою** або **намагнічуючою**.

Ця реакція якоря не спотворює магнітне поле машини, тобто вона відповідно розмагнічує або підмагнічує поле збудження.

У тому випадку, коли щітки зміщені на кут менший 90° , то крім поперечної складової МРС виникає подовжня складова МРС, що спрямована по осі полюсів. Якщо машина працює в генераторному режимі, то при зсуві щіток у напрямку обертання якоря подовжня складова МРС діє зустрічно з МРС збудження, що послабляє основний магнітний потік машини. При зсуві щіток проти обертання якоря генератора подовжня складова МРС якоря діє згідно з МРС обмотки збудження, що викликає деяке підмагнічування машини і може з'явитися причиною іскріння на колекторі.

Б. Кількісний облік реакції якоря машини постійного струму

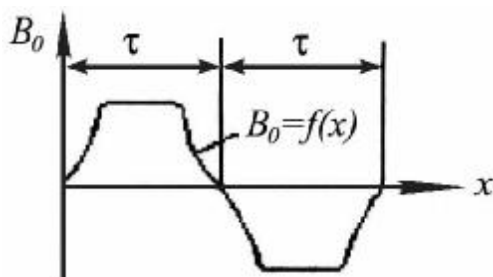


Рис. 20.5. Крива розподілу магнітної індукції в повітряному зазорі (x — просторова координата уздовж окружності повітряного зазору.)

При холостому ході машини постійного струму, коли в її магнітному колі існує лише поле збудження, розподіл індукції в повітряному зазорі машини на кожному полюсному поділці може бути представлений так (рис. 20.5).

Крива $B_0 = f(x)$ не синусоїдальна, тому що магнітне коло машини трохи насичене.

Коли машина постійного струму працює під навантаженням, в магнітному колі машини існує результуюче магнітне поле, утворене в результаті взаємодії поля обмотки збудження і поля реакції якоря.

Щоб одержати криву розподілу індукції результуючого магнітного поля $B_{рез} = f(x)$, необхідно знати розподіл індукції поля збудження $B_0 = f(x)$ і розподіл індукції поля реакції якоря $B_a = f(x)$.

Для того, щоб знайти криву розподілу індукції поля реакції якоря, розглянемо магнітне коло двополусної машини постійного струму, яку представимо в розгорнутому виді (рис. 20.6).

Розглядаємо найбільш характерний випадок, коли щітки встановлені на геометричній нейтралі.

Представимо на рис. 20.6 замкнуту магнітну силову лінію поля реакції якоря, віддалену на відстань x від середини головного полюса.

Для цієї замкнутої силової лінії:

$$\oint H dl = \sum i \quad (20.9)$$

Вирішити це рівняння в загальному виді для розглянутої силової лінії важко, тому що вона проходить в середовищах з різною магнітною проникністю. Приймаємо допущення, що магнітна проникність сталі $m_{cm} = \infty$, тоді на

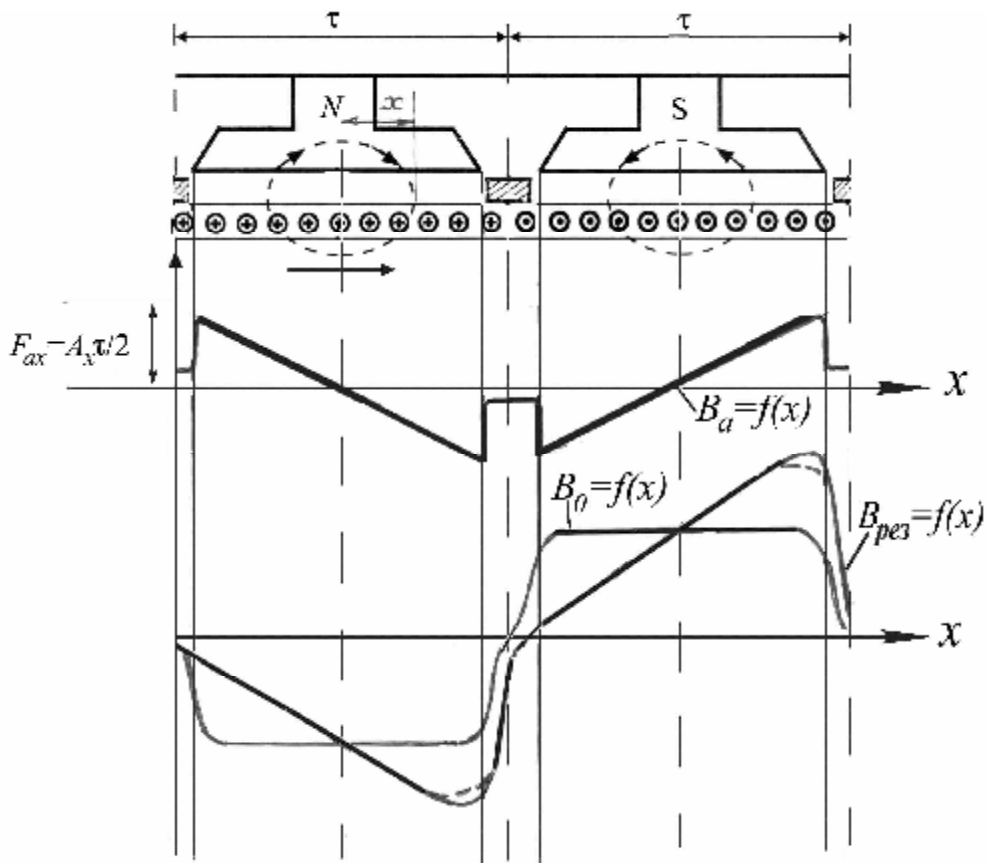


Рис. 20.6. Розподіл індукції результуючого поля.

пруженість магнітного поля уздовж силової лінії на ділянках по сталі $H_{ст} = 0$.

В цьому випадку, обходячи замкнуту силову лінію, враховуємо напруженість магнітного поля тільки в повітряному зазорі H_d .

У межах наконечника головного полюса силові лінії в повітряному зазорі розподілені рівномірно. Тому можна прийняти, що $H_d = const$.

При цьому закон повного струму для розглянутої силової лінії:

$$H_d \cdot 2d = A_a \cdot 2x, \quad (20.10)$$

тут $d = K_d d$ – розрахунковий повітряний зазор, що враховує збільшення магнітного опору полю реакції якоря, через наявність зубців і пазів на якорі ($K_d > 1$); $A_a = I_a N / (2apD_a)$ – лінійне навантаження якоря, тобто величина, що характеризує скільки амперів проходить на 1 од. довжини зовнішньої окружності якоря; N – число провідників обмотки якоря; D_a – зовнішній діаметр якоря.

В правій частині приведенного виразу представлена МРС реакції якоря для ділянки довжини $2x$ по окружності якоря.

Тому

$$F_{ax} = A_a \cdot 2x \quad (\text{ампер-провідників})$$

$$F_{ax} = A_a x \quad (\text{ампер-витків})$$

Залежність $F_{ax} = f(x)$ – лінійна:

При $x=0 \Rightarrow F_{ax}=0$;

При $x=t/2 \Rightarrow F_{ax}=A_x \cdot t/2$.

Знак F_{ax} – ординати приймаємо залежним від напрямку силової лінії поля реакції якоря.

Якби повітряний зазор між головним полюсом і якорем був рівномірним на всьому полюсному поділку t , то індукція поля реакції якоря B_a розподілялася б по такому ж законі як МРС.

Однак, при виході в міжполюсний простір, повітряний зазор різко збільшується, тобто магнітний опір полю реакції якоря зростає.

З цієї причини B_a в області міжполюсного простору різко знижується.

Це враховуємо, розглядаючи залежність $B_a = f(x)$.

Якщо навантаження відсутнє, тобто машина працює в холосту, то в магнітному колі існує лише поле збудження, а індукція цього поля на кожному полюсному поділку розподіляється по кривій $B_0 = f(x)$.

В режимі роботи під навантаженням в магнітному колі машини постійного струму існує результуюче поле, що є результатом взаємодії полів збудження і реакції якоря.

Розподіл індукції цього поля $B_{рез} = f(x)$, знаходимо сумуванням ординат кривих $B_0 = f(x)$ і $B_a = f(x)$.

Крива $B_{рез} = f(x)$, відрізняється за формою від кривої $B_0 = f(x)$, тобто під впливом поперечної реакції, при установці щіток на геометричній нейтралі, магнітне поле в навантаженій машині спотворюється.

Контрольні питання

1. Які ділянки містить магнітне коло машини постійного струму?
2. У чому сутність явища реакції якоря машини постійного струму?
3. Чому МРС якоря, що діє по поперечній осі, викликає розмагнічування машини по подовжній осі?
4. Як враховується розмагнічуюча дія реакції якоря при розрахунку числа витків полюсної котушки обмотки збудження?
5. З якою метою компенсаційну обмотку включають послідовно з обмоткою якоря?
6. Чому зі збільшенням повітряного зазору послаблюється вплив розмагнічуючої реакції якоря?

Глава 21. Комутація в машинах постійного струму

21.1. Фізична сутність комутації і її вплив на роботу машини

При обертанні якоря машини постійного струму колекторні пластини по черзі вступають в дотик зі щітками. При цьому перехід щітки з однієї пластини на іншу супроводжується перемиканням секції обмотки з однієї паралельної вітки в іншу і зміною струму в цій секції. *Процес зміни струму в секціях при перемиканні їх з однієї паралельної вітки в іншу називається **комутацією***. Секція, в якій відбувається комутація, називається **комутуючою секцією** а час, протягом якого відбувається процес комутації, називається **періодом комутації** T_k . Величина періоду комутації визначається відрізком часу, починаючи з моменту, коли колекторна пластина вступає в дотик зі щіткою, і, кінчаючи моментом, коли пластина цілком виходить із дотику з цією щіткою

$$T_k = \frac{60}{kn} \cdot \frac{b_{щ}}{b_k}, \quad (21.1)$$

де k - число колекторних пластин; n - частота обертання якоря; $b_{щ}$ - ширина щітки; b_k - відстань між серединами сусідніх колекторних пластин (колекторний поділок).

Розглянемо процес комутації за умови, що щітки розташовані на геометричній нейтралі і що в комутуючій секції протягом усього періоду комутації не індукуються електрорушійні сили. Крім того, ширину щітки приймемо рівній колекторному поділу ($b_{щ} = b_k$).

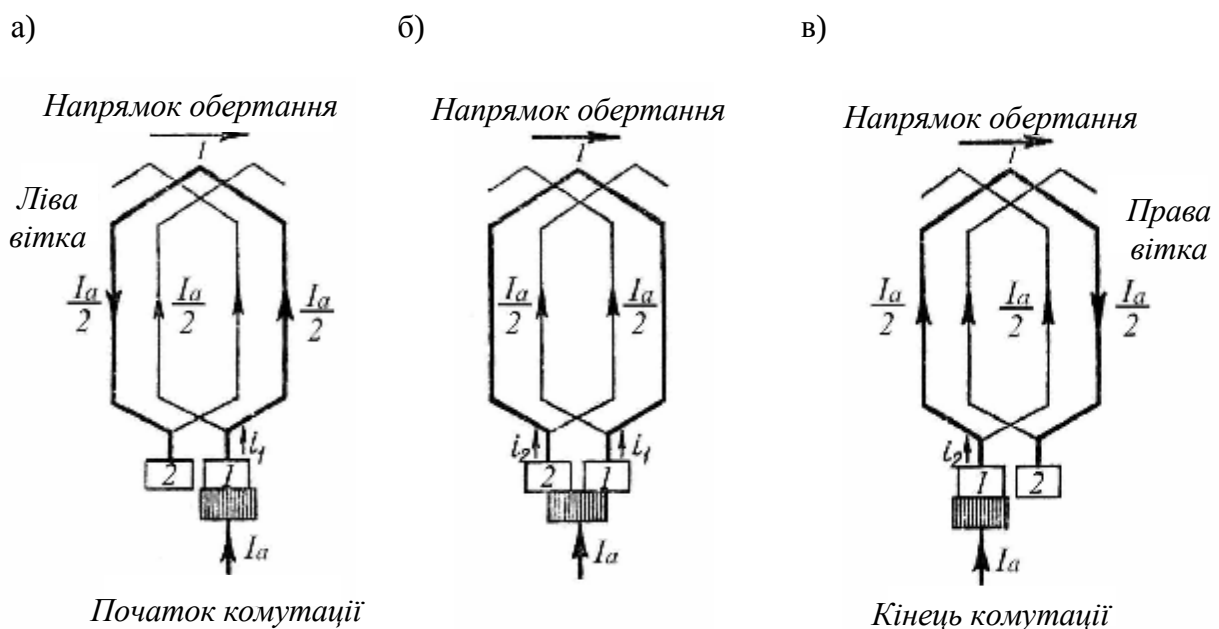


Рис. 21.1. Зміна напрямку струму в секції, що комутується

В початковий момент комутації (рис. 21.1, а) контактна поверхня щітки торкається лише пластини 1, а секція 1 (комутуюча секція) відноситься до лівої паралельної вітки обмотки і струм в ній $i = I_a / 2$. Потім пластина 1 поступово збігає з щітки і на зміну їй набігає пластина 2. У результаті комутуюча секція виявляється замкнутою щіткою, і струм по ній поступово зменшується. Пояснюється це тим, що струми i_1 й i_2 в пластинах 1 і 2 зворотно пропорційні перехідним опорам $r_{\omega 1}$ (між щіткою і пластиною 1, що збігає) $r_{\omega 2}$ і (між щіткою і пластиною 2, що набігає), що ж стосується струму i в секції, що комутує, то він дорівнює різниці струмів i_1 і i_2 .

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_{\omega 2}}{r_{\omega 1}},$$

В міру того як пластина 1 втрачає контакт із щіткою, зростає величина $r_{\omega 1}$ і тому зменшується струм i_1 .

Одночасно щітка переходить на пластину 2, при цьому опір $r_{\omega 2}$ зменшується і струм i_2 збільшується. Коли ж контактна поверхня щітки рівномірно перекриває обидві колекторні пластини $r_{\omega 1} = r_{\omega 2}$ (рис. 21.1, б), струм в комутуючій секції стає рівним нулю, тому що $i_1 = i_2$ або $i_1 - i_2 = 0$. Наприкінці процесу комутації щітка цілком переходить на пластину 2 (рис. 21.1, в), а струм i в комутуючій секції знову досягає величини $I_a / 2$. Однак по напрямку цей струм протилежний струму на початку комутації, а сама комутуюча секція тепер виявилася в правій паралельній вітці обмотки якоря.

Таким чином, за період комутації струм в комутуючій секції, змінюється від $+i$ до $-i$, а графік зміни струму являє собою пряму лінію (рис. 21.2, а). Таку комутацію називають **прямолінійною**, або **ідеальною**.

Прямолінійна комутація є найбільш бажаним видом комутації, тому що вона не викликає в машині ніяких шкідливих наслідків. Густина струму під щіткою протягом усього періоду комутації залишається незмінною. Пояснюється це тим, що при прямолінійній

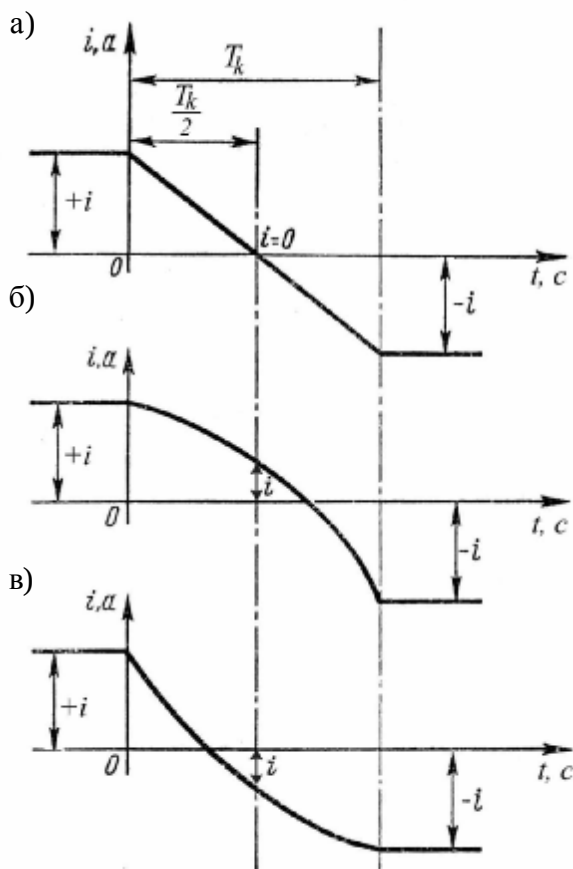


Рис. 21.2. Графіки зміни струму в комутуючій секції

комутації величина струму в контакті "щітка - колекторна пластина" змінюється пропорційно зміні площі цього контакту.

Однак в реальних умовах роботи машин постійного струму процес комутації проходить значно складніше. Справа в тому, що період комутації як правило дуже малий і приблизно складає $10^{-4} - 10^{-5}$ с. При такій швидкій зміні струму в комутуючій секції виникає значна ЕРС самоіндукції

$$e_L = -L_s \frac{di}{dt}, \quad (21.2)$$

де L_s - індуктивність секції; i - струм в комутуючій секції.

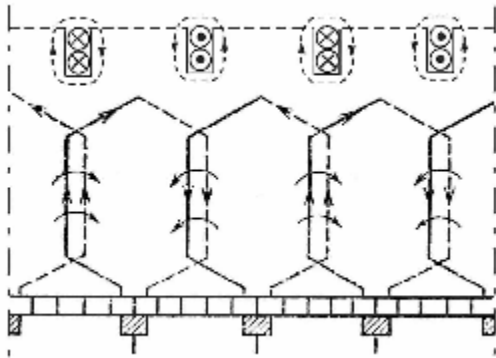


Рис. 21.3. До поняття про ЕРС взаємоіндукції.

других *ЕРС взаємоіндукції*

Як правило в кожному пазу якоря знаходяться кілька активних сторін (не менш двох), що належать різним секціям. При цьому всі ці секції знаходяться в стані комутації, будучи замкнутими різними щітками (рис. 21.3). При цьому варто врахувати, що як правило ширина щітки більша колекторного поділку ($b_{щ} > b_k$) і кожна щітка замикає одночасно кілька секцій.

Тому що сторони комутуючих секцій лежать в одних пазах, то змінний магнітний потік кожної із цих сторін наводить в

$$e_M = -M_s \frac{di}{dt}, \quad (21.3)$$

де M_s - взаємна індуктивність секцій, що одночасно комутують.

Обидві ЕРС створюють в комутуючій секції результуючу ЕРС

$$e_p = e_L + e_M,$$

що перешкоджає зміні струму в секції, що комутує, і тому називається **реактивною**. Крім того, під впливом реакції якоря магнітна індукція в зоні комутації (на геометричній нейтралі) здобуває деяке значення B_k (див. рис. 20.6), під дією якої в комутуючій секції наводиться ЕРС зовнішнього поля

$$e_k = B_k 2lw_s v, \quad (21.4)$$

де l - довжина активних сторін секції; v - лінійна швидкість руху секції; w_s - число витків в секції.

Таким чином, в комутуючій секції наводиться ЕРС зовнішнього поля

$$\Sigma e = e_p + e_k.$$

Якщо машина не має додаткових полюсів, то ЕРС e_p і e_k спрямовані в одну сторону і створюють в комутуючій секції **додатковий струм комутації** i_k такого ж напрямку, що і робочий струм цієї секції i в початковий період комутації (рис. 21.1, а). Така взаємодія струмів i_k і i приводить до того, що зміна струму в комутуючій секції затримується.

Уповільнена дія струму комутації пояснюється тим, що цей струм створюється, головним чином, реактивною ЕРС, що, як відомо, своєю дією перешкоджає зміні струму в електричному колі. Тому в момент рівномірного перекриття щіткою пластин 1 і 2 струм в комутуючій секції не досягає нульового значення, як це відбувається при ідеальній комутації. Струм у секції, що комутує, досягає нульового значення в другому напівперіоді комутації, тобто комутація стає **криволінійною сповільненою**. Графік комутації представлений на рис. 21.2, б.

Як по величині, так і по напрямку ЕРС e_k залежить від положення щіток відносно нейтралі: при положенні щіток на фізичній нейтралі $e_k = 0$, при зсуві щіток з нейтралі в одну сторону, під полюс однієї полярності - ЕРС e_k має один знак, а при зсуві в іншу, під полюс другої полярності - іншої. Отже, в одному випадку ЕРС e_k може бути спрямована погоджено з ЕРС e_p , а в іншому - зустрічно, тому що ЕРС e_p завжди сповільнює комутацію. В першому випадку дія ЕРС e_p ще підсилиться, і комутація струму буде ще більше уповільнена (рис. 21.2, б); в другому випадку ЕРС e_p і e_k будуть прагнути компенсуватися й умови комутації будуть поліпшуватися. При $e_p = e_k$ усе буде відбуватися так, ніби не було ні e_p ні e_k , тобто ми будемо мати **прямолінійну** комутацію.

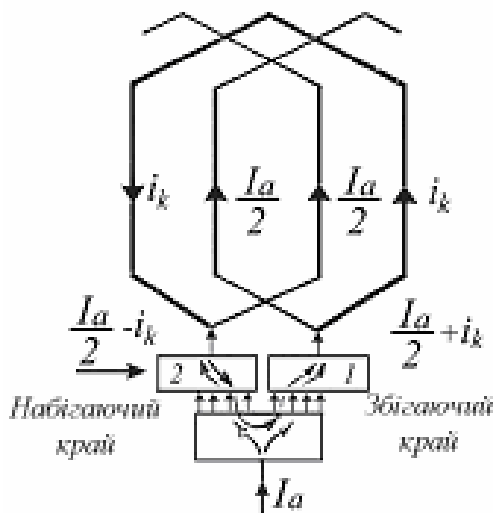


Рис. 21.4. Розподілу густини струму в контакті щітки при сповільненій комутації

Якщо ж, нарешті, e_k перевищить e_p , то комутація буде відбуватися по кривій рис. 21.2, в, тобто в цьому випадку вона буде **прискореною**. Струм i_k буде мати напрямок, зворотний тому, який він має на рис. 21.4, відповідно чому густина струму j_{u1} під збігаючим краєм щітки буде до визначеного моменту зменшуватися, а густина j_{u2} струму під набігаючим краєм щітки збільшуватися.

При значних навантаженнях машини густина струму під збігаючим краєм щітки може досягти неприпустимо великих значень, викликати перегрів щітки і стати причиною іскріння.

Однак досвід показує, що іскріння на

колекторі виникає і при невеликих навантаженнях. Це свідчить про те, що головною причиною іскріння на колекторі є не збільшення густини струму під щіткою, а процес розмикання щіткою кола комутуючої короткозамкненої секції при виході збігаючої пластини колектора з-під щітки. В момент розмикання комутуючої секції з додатковим струмом комутації i_k накопичена в ній енергія магнітного поля

$$W_M = \frac{1}{2} L_s i_k^2$$

витрачається на створення електричної дуги між збігаючим краєм щітки і колекторною пластиною.

Зі збільшенням навантаження зростає величина струму в секціях і підсилюється реакція якоря. А це, як видно з виразів (21.2), (21.3) і (21.4), сприяє росту $\sum e = e_p + e_k$, збільшенню струму i_k , а, отже, веде до посилення іскріння.

21.2 Причини, що викликають іскріння на колекторі

Процес комутації струму якоря може супроводжуватися іскрінням щіток на колекторі. Це іскріння оцінюється по балах, тобто розрізняють іскріння в 1 бал; $1\frac{1}{4}$ бала; $1\frac{1}{2}$ бала; 2 бали; 3 бали. Ці бали встановлюються в залежності від кількості точок іскріння на збігаючому краї щітки.

В машинах загальнопромислового призначення допускається іскріння в $1\frac{1}{2}$ бала і не більше, тому що при більшій величині іскріння знижується надійність роботи машини і різко скорочується термін її служби.

При роботі машини постійного струму щітки і колектор утворюють ковзний контакт. Площа контакту щіток вибирається по величині робочого струму машини, що приходить на одну щітку, і за припустимим значенням густини струму для обраної марки щіток.

Якщо з якої-небудь причини щітка прилягає до колектора не всією поверхнею, а лише її частиною, то виникають надмірні місцеві густини струму, що приводять до появи іскріння на колекторі. Причиною виникнення надмірної густини струму може бути також збільшення струму в щітці.

Класична теорія комутації струму якоря розрізняє три причини іскріння щіток на колекторі:

1. Механічного характеру;
2. Потенційного характеру;
3. Електромагнітного (комутаційного) характеру.

Причини іскріння механічного характеру. До механічних причин відносяться: слабкий тиск щіток на колектор, неправильна конфігурація або негладка поверхня колектора, забруднення поверхні колектора, виступ ізоляції

над колекторними пластинами, нещільне закріплення траверси або пальців щіткотримачів, а також інші недоліки, що виникли в процесі експлуатації машини. При зазначених несправностях в окремі моменти часу порушується контакт щітки з колектором, що приводить до іскріння.

Причини іскріння потенційного характеру. Ці причини пояснюються тим, що між колекторними пластинами *завжди існує різниця потенціалів*. Ця різниця потенціалів визначається значенням ЕРС, що індукується в секції.

Миттєве значення цієї ЕРС визначається у такий спосіб:

$$e_c = 2B_x lv \quad (21.5)$$

де B_x - індукція магнітного поля в місці розташування секції в даний момент часу; l - активна довжина сторони секції; v - лінійна швидкість переміщення секції відносно поля.

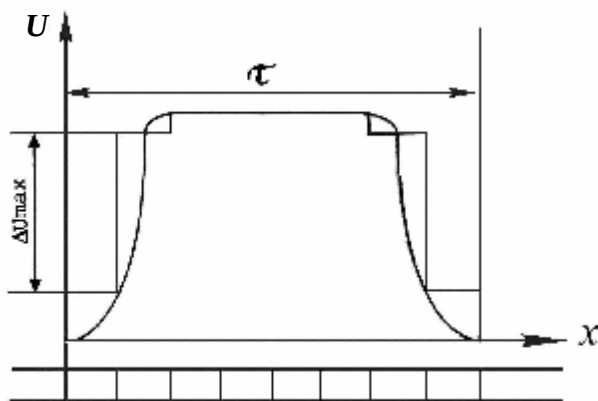
Якщо прийняти $l = const$, $v = const$, то $e_c \sim B_x$.

Звідси висновок, що розподіл потенціалу колекторних пластин по окружності колектора відбувається по такому ж закону, як і закон розподілу індукції в повітряному зазорі машини на кожному полюсному поділку. Але це справедливо при числі колекторних пластин рівному нескінченності.

При кінцевому числі пластин, крива розподілу індукції є середньою кривою для закону розподілу потенціалів по окружності колектора.

Раніше було встановлено, що розподіл індукції в повітряному зазорі машини на полюсному поділку залежить від режиму роботи машини.

а)



б)

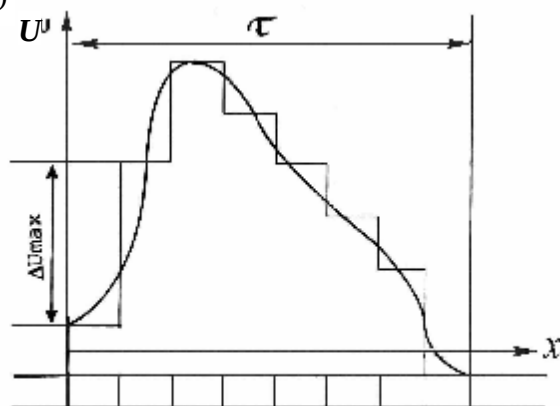


Рис. 21.5. Криві розподілу потенціалу по колектору машини постійного струму в режимі холостого ходу (а) і під навантаженням (б)

При побудові кривої розподілу потенціалу по колектору враховуємо, що кожна колекторна пластина є провідником і тому здобуває однаковий потенціал.

Як впливає з малюнка, дійсний розподіл потенціалу по окружності колектора представляє ламану лінію.

Найбільшу небезпеку представляє максимальна різниця потенціалів між якимись сусідніми колекторними пластинами - DU_{max} .

Досвід експлуатації машин постійного струму показав, що в машинах загальнопромислового призначення ця максимальна різниця потенціалу не повинна перевищувати:

35 - 60 В	в машинах до 100 кВт;
30 - 35 В	в машинах від 100 до 1000 кВт;
25 - 30 В	в машинах понад 1000 кВт.

Якщо різниця потенціалів між сусідніми колекторними пластинами перевищить зазначені значення, між цими пластинами з'явиться стійко палаюча електрична дуга.

В результаті обертання колектора і через наявність вугільного пилу на його поверхні, дуга може бути розтягнута, в результаті виникає коловий вогонь по колектору. Він приводить до аварії машини постійного струму, тому що вигорає ізоляція між колекторними пластинами, відпадають секції від колектора і т.д.

Причини іскріння щіток потенційного характеру в колекторній машині усунути не можна, тому що завжди між колекторними пластинами має різниця потенціалів. Але поліпшити потенційні умови на колекторі можна.

Причини іскріння електромагнітного характеру. Вони викликаються фізичними процесами, що відбуваються в машині при переході секцій обмотки якоря з однієї паралельної вітки в іншу. Докладно ці процеси розглянуті в параграфі 21.1.

21.3. Основні способи поліпшення комутації

Основна причина незадовільної комутації в машинах постійного струму - додатковий струм комутації

$$i_k = \sum e / \sum r_k .$$

Тут $\sum r_k$ - сума електричних опорів додатковому струму комутації i_k : опір секції, опір місць пайки в петушках, опір перехідного контакту між колекторними пластинами і щіткою і, нарешті, опір щітки.

Однак з перерахованих опорів, що входять в $\sum r_k$, найбільше значення має опір щітки і перехідного контакту, тому, позначивши їх $r_{щ}$, з деяким наближенням можна записати

$$i_k = \sum e / r_{щ} .$$

З отриманого виразу випливає, що зменшити струм i_k , а, отже, поліпшити комутацію, можна або збільшенням опору $r_{щ}$, або зменшенням сумарної ЕРС $\sum e$ в комутуючій секції. Звідси випливає ряд способів поліпшення комутації, основні з яких розглянуті нижче.

Вибір щіток. З погляду забезпечення задовільної комутації доцільно застосовувати тверді щітки (вугільно-графітні, графітні і електрографітовані), тому що вони забезпечують найбільшу величину перехідного опору. Однак припустима густина струму в щітковому контакті цих щіток невелика, а тому їхнє застосування в машинах постійного струму веде до необхідності збільшення площі щіткового контакту, що вимагає збільшення площі колектора за рахунок його довжини. Це привело б до збільшення габаритів машини і додатковій витраті міді. Тому щітки з великим $r_{щ}$ застосовують переважно в машинах з відносно високою напругою, а отже, з невеликим робочим струмом.

Найбільше застосування в машинах постійного струму напругою 110-440 В мають електрографітовані щітки, а в машинах зниженої напруги (до 30 В) - мідно- чи бронзово-графітні.

Зменшення реактивної ЕРС. Істотний вплив на сумарну ЕРС в комутуючій секції робить реактивна ЕРС $e_p = e_L + e_M$. ЕРС взаємоіндукції e_M в значній мірі залежить від ширини щітки: чим ширше щітка, тим більше число колекторних пластин перекриває вона одночасно, а отже, тим більше секцій одночасно комутується, що викликає підвищення ЕРС взаємоіндукції e_M . Однак занадто вузькі щітки також небажані через недостатню механічну міцність, а також тому, що для створення необхідної площі контактної поверхні у вузькій щітці довелося б збільшити її довжину, а це привело б до необхідності збільшення довжини колектора. Найбільш доцільні щітки шириною в 2-3 колекторні поділки.

Помітний вплив на реактивну ЕРС робить тип обмотки якоря. Так, якщо обмотку якоря виконати з укороченими кроком ($y_1 < t$), то активні сторони секцій, що комутують одночасно виявляться в різних пазах, що буде сприяти зменшенню ЕРС взаємоіндукції.

Реактивна ЕРС може бути в значній мірі зменшена або навіть цілком усунута створенням в зоні комутації (по осі щіток) комутуючого поля визначеної полярності і величини. Створюється таке поле додатковими полюсами або зсувом щіток з геометричної нейтралі.

Додаткові полюси. Призначення додаткових полюсів - створити в зоні комутації магнітне поле такої величини і напрямку, щоб наводима цим полем в комутуючій секції ЕРС обертання e_k компенсувала реактивну ЕРС e_p . В машині постійного струму без додаткових полюсів ЕРС e_p і e_k спрямовані в одну сторону, тобто діють узгоджено

$$\Sigma e = \dot{e}_p + \dot{e}_k.$$

Сумарна ЕРС в комутуючій секції Σe буде рівною нулю, якщо за допомогою додаткових полюсів створити в зоні комутації магнітне поле e з магнітною індукцією B_k такої величини і напрямку, щоб ЕРС обертання e_k змінила

свій напрямок на зворотній, а її значення було б рівним ЕРС реактивної e_p . В цьому випадку

$$\Sigma e = \dot{e}_p + \dot{e}_\kappa = 0$$

і комутація стає прямолінійною (ідеальною).

Додаткові полюси розташовують між головними. При цьому щітки встановлюють на геометричній нейтралі.

Усі машини постійного струму потужністю понад 1 кВт забезпечуються додатковими полюсами, число яких приймають рівним числу головних полюсів або удвічі меншим.

Як правило МДС додаткових полюсів $F_\partial = (1,15 - 1,30)F_a$, тобто на 15-30 % більше МДС якоря.

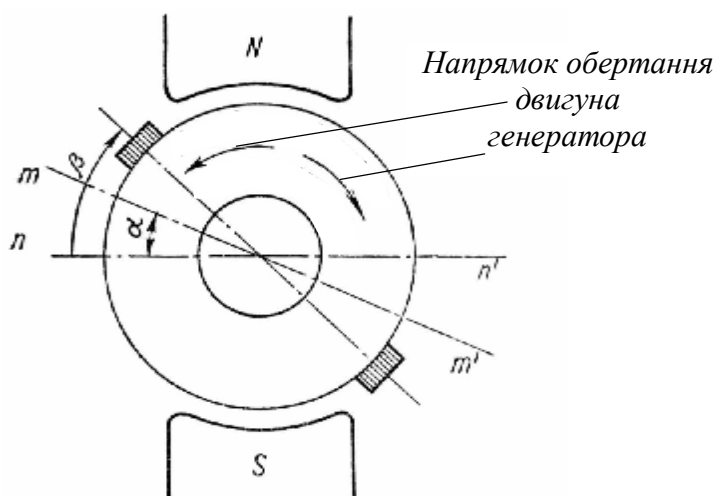


Рис. 21.6. Зсув щіток з геометричної нейтралі

Одержання комутуючого поля зсувом щіток. В машинах постійного струму потужністю до 1 кВт, що виконуються без додаткових полюсів комутуюче поле в зоні комутації створюється зсувом щіток з геометричної нейтралі.

Якщо щітки встановлені на геометричній нейтралі, то поперечне магнітне комутуюче поле якоря з магнітною індукцією B_{aq} створює в зоні комутації індукцію B_κ . В результаті в комутуючих секціях, що комутують наводиться

ЕРС обертання e_κ , спрямована узгоджено з реактивною ЕРС e_p і сприяє уповільненій комутації. При зсуві щіток з геометричної нейтралі $n - n'$ на фізичну нейтраль $m - m'$ (рис. 21.6) комутуюче поле з індукцією B_κ зникає і ЕРС обертання $e_\kappa = 0$. При цьому в комутуючих секціях наводиться лише реактивна ЕРС e_p . Якщо ж щітки зсунути на кут b , тобто за фізичну нейтраль $m - m'$, то комутуюче поле, що комутує, з індукцією B'_κ змінить свій напрямок відносно того, коли щітки знаходились на геометричній нейтралі. Це поле буде наводити в комутуючих секціях ЕРС обертання рівну реактивній ЕРС і протилежну їй по напрямку ($e_\kappa - e_p = 0$), тобто реактивна ЕРС виявиться скомпенсованою і комутація стає прямолінійною (ідеальною). Для одержання необхідного ефекту щітки варто зміщати в напрямку обертання якоря в генераторів і проти обертання в двигунів.

Компенсаційна обмотка. Додаткові полюси компенсують дію реакції якоря тільки в зоні комутації. Поза цією зоною реакція якоря продовжує спотворювати основне поле (рис. 21.5). Це приводить до різкої різниці між ЕРС, наведених в сусідніх секціях обмотки якоря, і відповідно до різкої різниці потенціалів між сусідніми пластинами колектора U_k . Як тільки U_k перевершить безпечну межу, між пластинами може виникнути дуга, що, розтягуючись, перекинеться на сусідню щітку іншої полярності і перекриє поверхню колектора.

Таке явище зветься коловим вогнем. Воно дуже небезпечне і часто тягне за собою важкі аварії машини.

Одним з ефективних засобів боротьби з коловим вогнем є компенсаційна обмотка, схематично показана на рис. 21.7.

В полюсні наконечники головних полюсів укладаються провідники (стержні), що з'єднуються за схемою, зазначеною на рисунку, і включаються послідовно з обмоткою якоря. Струм в компенсаційній обмотці повинний мати такий напрямок і таку величину, щоб МДС була спрямована назустріч МДС якоря і дорівнювала їй по величині. В цих умовах усе відбувається так, ніби в машині зовсім не існує реакції якоря.

Компенсаційна обмотка вимагає великої витрати міді, тому застосовується тільки в тих випадках, коли машина працює у важких умовах, - прокатні гребні двигуни, генератори великої потужності і т.д.

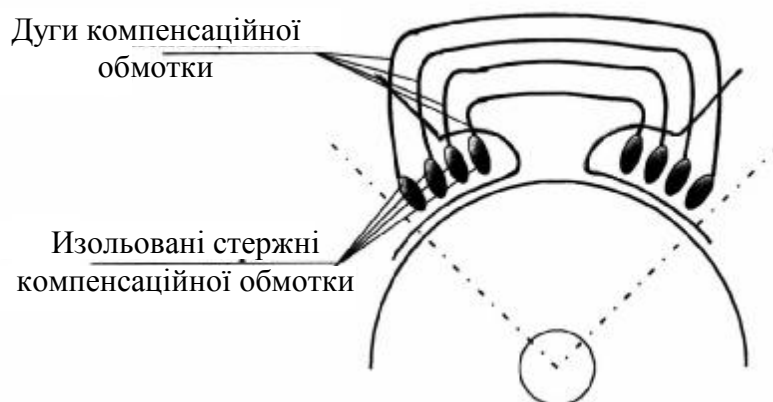


Рис. 21.7. Машина постійного струму з компенсаційною обмоткою.

Причини іскріння *механічного характеру* усуваються підвищенням культури виробництва й експлуатації машин постійного струму.

Контрольні питання

1. Які причини можуть викликати іскріння на колекторі?
2. Які ступені іскріння передбачені ДСТУ? Дайте кожній з них характеристику і вкажіть умови допустимості.
3. Чому прямолінійна комутація не супроводжується іскрінням?
4. Які причини, що викликають іскріння, виникають при уповільненій комутації?
5. Поясніть призначення і будову додаткових полюсів.
6. Які причини здатні викликати коловий вогонь по колектору?

Глава 22. Генератори постійного струму

22.1 Класифікація генераторів постійного струму по способу збудження

Генератори постійного струму можуть мати різні способи збудження. У найбільш загальному випадку їх поділяють:

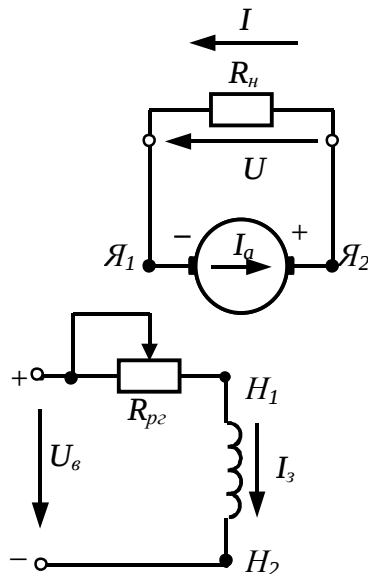
- генератори зі збудженням від постійних магнітів;
- генератори з електромагнітним збудженням.

Тому що генератори з збудженням від постійних магнітів мають обмежене значення, то надалі ми будемо мати на увазі генератори з електромагнітним збудженням.

Таким чином, основний спосіб збудження генераторів постійного струму – це збудження електромагнітним шляхом.

Ці генератори поділяють на:

- генератори незалежного збудження;
- генератори із самозбудженням.



Генератори незалежного збудження (рис. 22.1)

На рисунку позначено:

$Я_1 - Я_2$ – коло обмотки якоря;

$H_1 - H_2$ – коло обмотки збудження;

U – напруга в колі якоря;

I – струм навантаження;

I_a – струм якоря;

U_z – напруга на обмотці збудження;

I_z – струм збудження.

Рис. 22.1. Принципова схема генератора незалежного збудження.

В генераторах незалежного збудження обмотка збудження підключена до незалежного джерела постійного струму. Струм збудження I_z залежить тільки від напруги на затискачах кола збудження U_z й опору цього кола. Потужність, що втрачається на збудження, як правило не перевищує 2-3% від потужності генератора. Незалежне збудження є зараз дуже розповсюдженим і застосовується в машинах низької напруги (4-12 В), високої напруги (понад 500 В), в машинах великої потужності й у тих випадках, коли потрібно широке регулювання напруги.

Відповідно до схеми, у загальному випадку

$$U = U_z \text{ і } I_a = I.$$

Генератори постійного струму із самозбудженням поділяють на машини з паралельним, послідовним і змішаним збудженням.

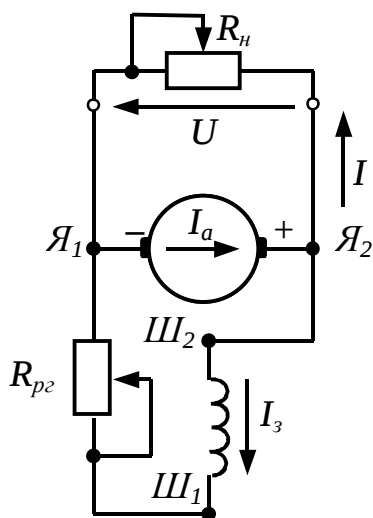


Рис. 22.2. Принципова схема генератора паралельного збудження.

Генератори паралельного збудження (шунтові) (рис. 22.2)

На рисунку позначено:

$\text{Ш}_1 - \text{Ш}_2$ – коло обмотки збудження.

Відповідно до схеми

$$U_з = U, \quad I_a = I + I_з.$$

В генераторах паралельного збудження обмотка збудження підключена до затискачів обмотки якоря. Зі схеми видно, що струм збудження $I_з$ залежить від напруги на затискачах якоря і що струм якоря I_a дорівнює сумі струму навантаження I і струму збудження $I_з$.

Генератори паралельного збудження є дуже розповсюдженим типом генератора постійного струму, тому що не вимагають окремого джерела струму для збудження і дають в межах нормального навантаження досить стійку напругу.

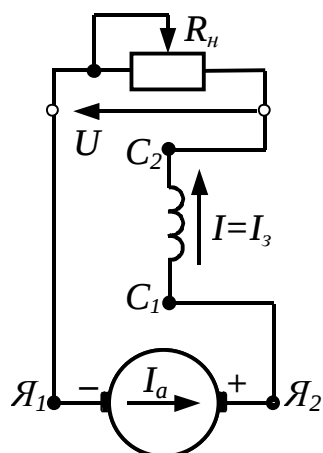


Рис. 22.3 Принципова схема генератора послідовного збудження.

Генератори послідовного збудження (серієсні) (рис. 22.3)

На рисунку позначено:

$C_1 - C_2$ – коло обмотки збудження.

Відповідно до схеми

$$I_a = I_з = I.$$

Зі схеми видно, що струм збудження $I_з$ дорівнює струму якоря I_a , тобто цілком залежить від навантаження генератора. Ця обставина негативно впливає на робочі властивості генератора, тому що його напруга змінюється в залежності від струму навантаження I , тоді, як правило потрібно, щоб воно залишалося більш-менш постійним. В генераторах таке збудження зараз майже не застосовується.

Генератори змішаного збудження (компаундні) (рис. 22.4)

Генератори змішаного збудження мають дві обмотки збудження паралельну ($\text{Ш}_1 - \text{Ш}_2$) і послідовну ($C_1 - C_2$).

Як правило, головне значення має паралельна обмотка, а послідовна відіграє роль додаткової обмотки.

Як ми побачимо нижче, наявність двох обмоток збудження дозволяє автоматично підтримувати необхідну напругу на затискачах приймача. По способу приєднання паралельної обмотки до якоря розрізняють:

- а) короткий шунт;
- б) довгий шунт.

Перший показаний на рис. 22.4 суцільною лінією, другий – переривчастою. Практично різниця між обома способами несуттєва.

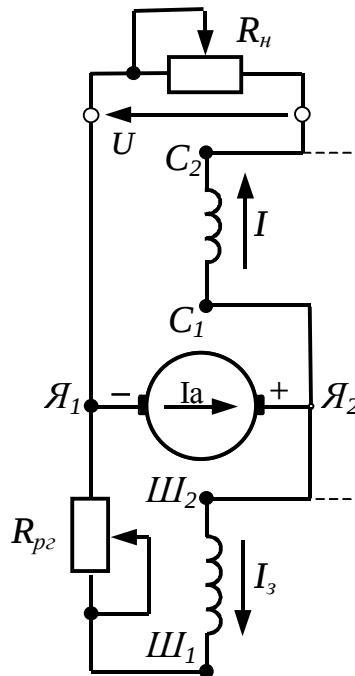


Рис. 22.4. Принципова схема генератора змішаного збудження.

22.2 Основні рівняння генераторів постійного струму

Незалежно від способу збудження для генераторів постійного струму справедливі наступні основні рівняння:

1. Рівняння напруг для кола якоря:

$$U = E_a - I_a R_a, \quad (22.1)$$

де U – вихідна напруга генератора; $E_a = c_e n \Phi$ – ЕРС обмотки якоря, $c_e = \frac{pN}{60a}$ – постійна машини; p – число пар полюсів; N – число провідників обмотки якоря; a – число паралельних віток обмотки якоря; $I_a R_a$ – спад напруги в колі обмотки якоря й в обмотках, включених послідовно з обмоткою якоря (обмотка додаткових полюсів, компенсаційна обмотка); I_a – струм якоря; R_a – активний опір кола обмотки якоря.

З приведеного рівняння випливає, що вихідна напруга генератора залежить від навантаження, а також від частоти обертання машини n .

Величину цієї напруги можна регулювати, насамперед, зміною магнітного потоку Φ на кожному полюсному поділці, що практично зводиться до регулювання струму збудження.

2. Електромагнітний момент генератора визначається за виразом:

$$M_{em} = C_m I_a \Phi, \quad (22.2)$$

де $C_m = \frac{pN}{2p a}$ – постійна машини.

Електромагнітний момент генератора є гальмовим і в сталому режимі врівноважується обертальним моментом приводного двигуна:

$$M_1 = M_{em} + M_0, \quad (22.3)$$

де M_1 – обертальний момент приводного двигуна; M_{em} – електромагнітний момент генератора; M_0 – момент холостого ходу генератора, що відповідає механічним втратам генератора і втратам в сталі його якоря.

22.3 Робочі характеристики генераторів постійного струму

До робочих характеристик, що описують поведінку генераторів в сталому режимі роботи під навантаженням, відносяться:

1. Навантажувальна характеристика

$$U = f(I_z) \quad \text{при } I = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $I = 0$, залежність $U_0 = f(I_z)$ – є характеристикою холостого ходу генератора.

2. Зовнішня характеристика

$$U = f(I) \quad \text{при } R_z = \text{const} (I_z = \text{const}), n = \text{const}.$$

3. Регулювальна характеристика

$$I_z = f(I) \quad \text{при } U = \text{const}, n = \text{const}.$$

В окремому випадку при $U = 0$ залежність $I_K = f(I_z)$ – є характеристикою короткого замикання генератора.

Розглянемо робочі характеристики генераторів постійного струму, як отримані експериментально.

Характеристика холостого ходу

Ця характеристика являє собою залежність напруги на виході генератора в режимі холостого ходу U_0 від струму збудження I_z при струмі навантаження $I = 0$ і частоті обертання $n = \text{const}$.

Приблизний вид характеристики холостого ходу генератора з незалежним збудженням представлений на рис. 22.5. Експеримент зняття характеристики варто починати зі значення $I_z = "0a"$, при якому напруга $U_0 = "ab"$ перевищує номінальне на 10 – 20 %. Після цього зменшують струм збудження до нуля

($I_3 = 0$), а потім змінюють його напрямок на зворотний ($-I_3$). Це дає нам *спадну вітку 1-1* характеристики холостого ходу. Щоб одержати її *висхідну вітку 2-2*, досить повернути вітку 1-1 на 180° навколо точки 0.

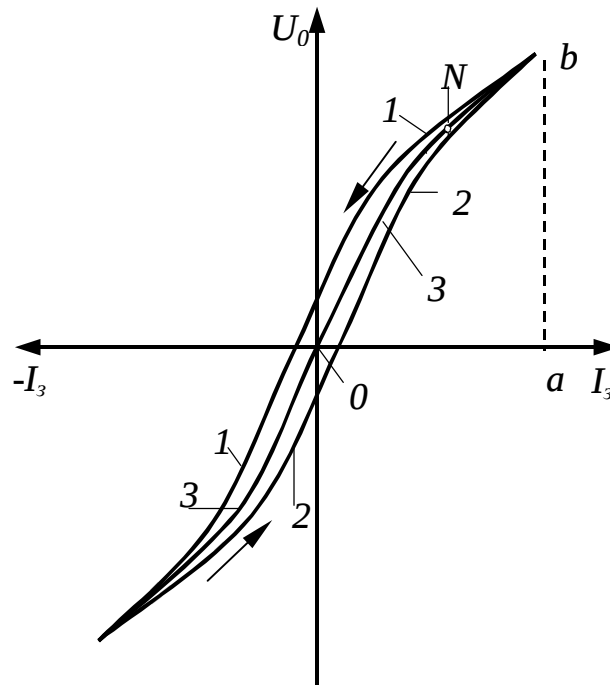


Рис. 22.5 Характеристика холостого ходу генератора незалежного збудження

При практичному використанні характеристики холостого ходу користуються не тією чи іншою її віткою, а кривою 3-3, проведеної саме між кривими 1-1 і 2-2.

По характеристиці холостого ходу ми можемо судити про властивості магнітного кола машини. Справді, точка характеристики при $I_3 = 0$ свідчить про величину потоку залишкового намагнічування $\Phi_{зал.}$. Як правило $\Phi_{зал.} = 1 \div 3\%$ від потоку машини Φ , що відповідає номінальному режиму роботи генератора.

Далі, вітки 1-1 і 2-2 утворюють гістерезисну петлю, що дає нам уяву про властивості сталі полюсів і ярма.

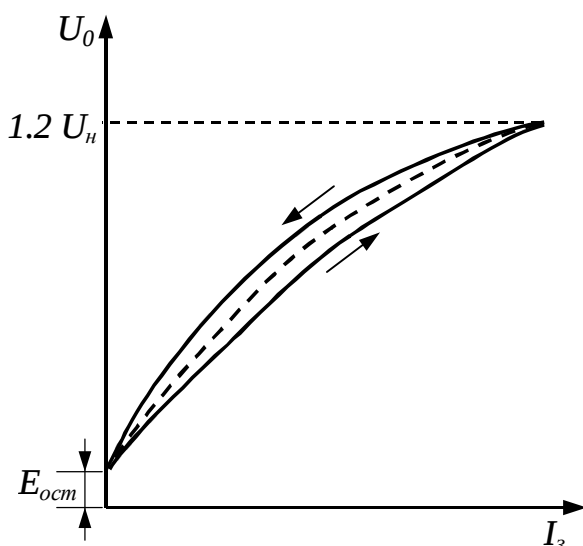


Рис. 22.6. Характеристика холостого ходу генератора паралельного збудження

Нарешті, по положенню на характеристиці точки N , що відповідає номінальній ЕРС, ми можемо судити про ступінь насичення магнітного кола. Як правило ця точка лежить на перегині кривої, тому що робота на прямолінійній частині кривої викликала б хитливу напругу, а робота за перегином, тобто в насиченій частині кривої, обмежувала б можливість регулювання напруги.

Характеристика холостого ходу генераторів паралельного збудження (рис. 22.6) знімається так само, як і при незалежному збудженні, але оскільки са-

мозбудження можливе лише в одному напрямку, характеристику холостого ходу можна зняти теж тільки при одному напрямку струму збудження. На малюнку $E_{зал.}$ – ЕРС обмотки якоря від потоку залишкового намагнічування.

У генератора послідовного збудження характеристика холостого ходу може бути знята тільки при незалежному живленні обмотки збудження. Вона має такий же вид як у генераторів з незалежним збудженням. У генераторів змішаного збудження характеристика холостого ходу має такий же вид, як у генераторів паралельного збудження, тому що при розімкнутому колі якоря послідовна обмотка збудження не бере участі у створенні магнітного потоку збудження.

Характеристика короткого замикання

Ця характеристика являє собою залежність струму якоря при короткому замиканні I_k від струму збудження I_z при напрузі на виході генератора $U = 0$ і частоті обертання $n = const$ (рис. 22.7).

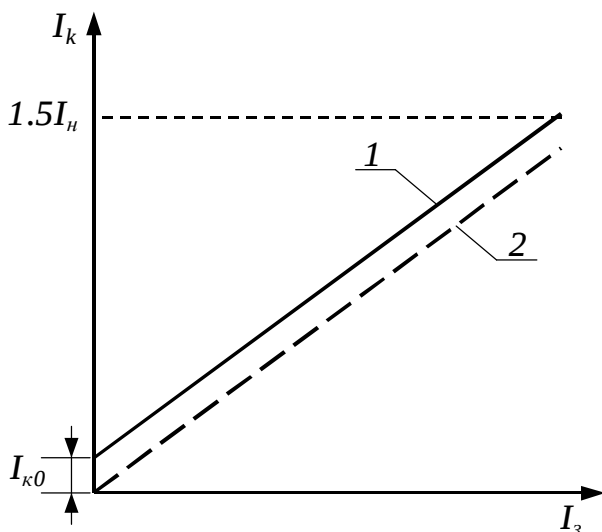


Рис. 22.7. Характеристика короткого замикання генератора незалежного збудження (1), розрахункова характеристика короткого замикання (2).

Характеристика короткого замикання знімається при замкнутах накоротко затискачах кола якоря шляхом збільшення струму збудження I_z до такої межі, щоб струм якоря при короткому замиканні I_k не перевищував $1,5I_n$. Так як магнітне коло при цьому не насичене, то характеристика має лінійний характер.

При всіх способах збудження характеристика короткого замикання може бути знята тільки **при незалежному живленні** обмотки збудження.

Навантажувальна характеристика

Ця характеристика виражає залежність напруги U на виводах генератора від струму збудження I_z при незмінному струмі навантаження $I = const$ і незмінній частоті обертання $n=const$.

При зазначених умовах напруга на виводах генератора менше ЕРС (22.1).

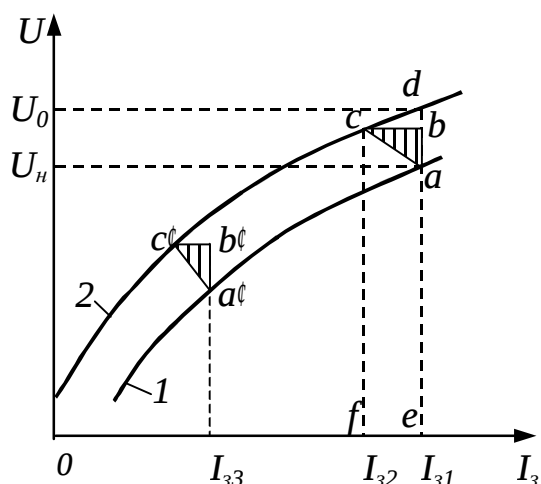


Рис. 22.8. Навантажувальна характеристика генератора незалежного збудження.

I_{z1} напруга на виводах дорівнює $U_0 = de$; з підключенням навантаження (при незмінному струмі збудження) напруга генератора знизиться до значення $U_n = ae$.

Таким чином, відрізок da виражає величину напруги $DU = U_0 - U_n$ при $I_z = I_{z1}$

Зменшення напруги на виводах генератора в цьому випадку відбулося в результаті двох причин: спаду напруги в колі якоря (22.1) і впливу розмагнічуючої реакції якоря. Вимірявши величину опору кола якоря r_a і підрахувавши спад напруги $I_a r_a$ можна визначити ЕРС генератора при заданому струмі навантаження:

$$E = U + I_a R_a$$

На рис. 22.8. ця ЕРС представлена відрізком be . ЕРС генератора при навантаженні менше, ніж у режимі холостого ходу ($be < de$), що пояснюється впливом розмагнічуючої реакції якоря. Для кількісної оцінки цього впливу з точки b проводиться відрізок bc паралельно осі абсцис, до перетинання з характеристикою холостого ходу. Отриманий у такий спосіб відрізок cf являє собою ЕРС генератора при навантаженні; а в режимі холостого ходу для створення цієї ЕРС необхідний струм збудження $I_{z2} < I_{z1}$. Отже, відрізок fe , рівний різниці струмів $(I_{z1} - I_{z2})$, являє собою величину струму збудження, що компенсує розмагнічуючий вплив реакції, якоря.

Сторони реактивного трикутника визначають фактори, що викликають зменшення напруги генератора при його навантаженні: сторона ab – спадання напруги в колі якоря, а сторона bc – вплив розмагнічуючої реакції якоря. Реактивний трикутник $a'b'c'$ побудований для іншого значення струму збудження (I_{z3}). Сторона $a'b'$ трикутника залишилася незмінної ($a'b' = ab$), що порозумівається незмінністю струму навантаження, але сторона $b'c'$ зменшилася ($b'c' < bc$), тому що при меншому струмі збудження зменшився ступінь насичення магніт-

Тому навантажувальна характеристика (крива 1) розташовується нижче характеристики холостого ходу (крива 2) на рис. 22.8.

Якщо від точки a , що відповідає номінальній напрузі U_n , відкласти нагору відрізок ab , рівний $I_a r_a$, і провести горизонтально відрізок bc до перетину з характеристикою холостого ходу, а потім з'єднати точки a і c , то одержимо трикутник abc , називаний **реактивним трикутником**.

Так, при роботі генератора в режимі холостого ходу при струмі збудження

ного кола генератора, а отже, і зменшилася дія розмагнічуючої реакції якоря.

Навантажувальні характеристики генераторів **паралельного** збудження мають такий же вид і значення, що й у генераторі незалежного збудження.

Навантажувальну характеристику генератора **послідовного** збудження експериментальним шляхом можна одержати тільки за схемою з незалежним збудженням.

Навантажувальні характеристики генератора **змішаного** збудження мають такий же вигляд, як і для генераторів паралельного або незалежного збудження, але можуть розташовуватися вище характеристики холостого ходу, тому що при навантаженні позначається вплив обмотки послідовного збудження.

Зовнішня характеристика генератора

Ця характеристика являє собою залежність напруги на виході генератора U від струму навантаження I при постійній частоті обертання $n = \text{const}$ і постійному опорі в колі збудження $R_z = \text{const}$ або, що при незалежному збудженні те саме, $I_z = \text{const}$.

Номінальною зміною напруги генератора незалежного збудження називається зміна напруги на його затискачах при зміні навантаження від номінального до нуля при $n = \text{const}$ і $I_z = \text{const}$.

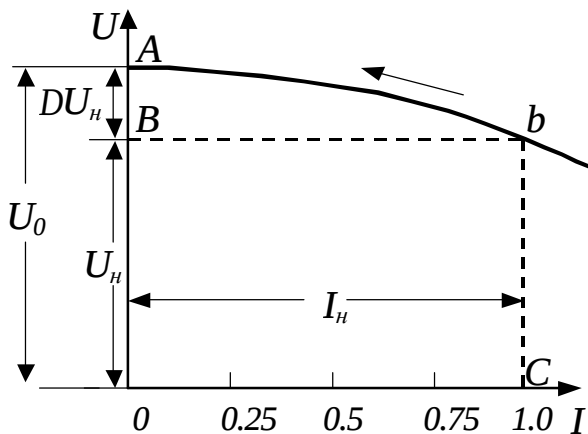


Рис. 22.9. Зовнішня характеристика генератора незалежного збудження.

Тому для зняття зовнішньої характеристики приводимо генератор в обертання з номінальною частотою обертання і встановлюємо такий струм збудження I_{zn} , щоб при $I = I_n$ ми мали на затискачах генератора $U = U_n$.

Потім підтримуючи $n = n_n = \text{const}$, розвантажуюмо генератор аж до холостого ходу. При цьому омічне спадання напруги на якорі $I_a r_a$ і реакція якоря зменшуються і відповідно росте напруга на затискачах генератора до значення $U = U_0$ (рис. 22.9).

Зміна напруги виражається у відсотках від номінальної напруги, тобто

$$DU_n = \frac{U_0 - U_n}{U_n} 100\% = \frac{OA - OB}{OB} 100\% . \quad (22.4)$$

Як правило, для генераторів незалежного збудження $DU_n = 5-10\%$.

Зовнішня характеристика генератора **паралельного** збудження представлена на рис. 22.10 (крива 1). Там же представлена і зовнішня характеристика генератора незалежного збудження (крива 2).

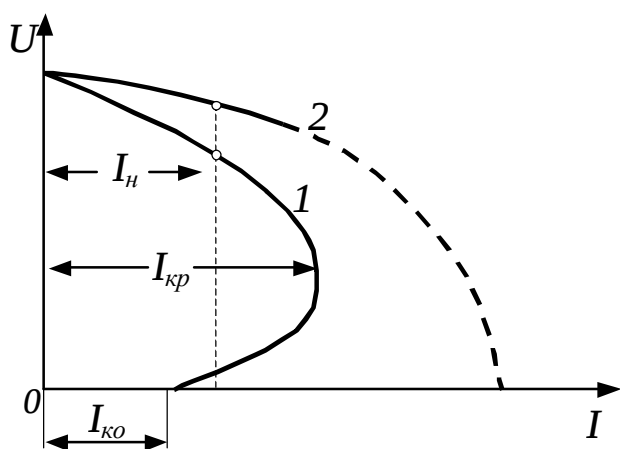


Рис. 22.10. Зовнішня характеристика генератора паралельного збудження

З рис. 22.10 видно, що в генераторі паралельного збудження спадання напруги DU більше, ніж у генераторі незалежного збудження. Це пояснюється тим, що в генераторі паралельного збудження, крім омичного спаду напруги в обмотці якоря і реакції якоря, діє ще *третья* причина, а саме: при збільшенні навантаження струм збудження $I_z = U / (R_a + R_z)$ зменшується пропорційно U (тому що $(R_a + R_z) = \text{const}$), тоді як у генераторі незалежного збу-

дження $I_z = \text{const}$.

Цією ж причиною пояснюється і те, що характер кривих 1 і 2 на рис. 22.10. різний. При послідовному зменшенні опору зовнішнього кола навантажувальний струм I генератора незалежного збудження безупинно росте (продовження кривої 2), показано переривчастою лінією) і при короткому замиканні генератора ($U = 0$) досягає неприпустимих значень, що може привести до виникнення колового вогню на колекторі.

Навпаки, в генераторі паралельного збудження струм навантаження буде збільшуватися тільки до визначеного граничного або, інакше, **критичного** значення I_{kp} , що як правило не перевищує номінальний струм більше чим у 2-2,5 рази, після чого він починає зменшуватися разом із напругою, що продовжує падати. Дійсно, $I = U / R_n$, де R_n – опір зовнішнього, тобто навантажувального, кола якоря. Якщо зменшити R_n , то при цьому зменшується напруга на затискачах генератора U . Таким чином, струм I залежить від двох зустрічно діючих факторів – зменшення R_n і зменшення U . Спочатку, поки генератор ще відносно сильно не насичений, напруга U мало змінюється (див., наприклад, верхню частину характеристики холостого ходу на рис. 22.6); тому великий вплив робить зменшення опору R_n , і струм I росте; але в міру збільшення I , напруга U починає падати усе швидше, зрівнюючись, а потім перевищуючи вплив R_n ; відповідно до цього струм I , досягши свого критичного значення, починає падати.

При короткому замиканні напруга $U = 0$, струм збудження I_z також дорівнює нулю, і по якорю тече струм короткого замикання I_{ko} , обумовлений тільки потоком залишкового намагнічування. Цей струм як правило менший I_n , і, отже, коротке замикання для генератора паралельного збудження є менш небезпечним, чим для генератора незалежного збудження.

Генератори паралельного збудження широко використовують в установках постійного струму, тому що відсутність збудника вигідно відрізняє їх від генераторів незалежного збудження. Номінальна зміна напруги генератора паралельного збудження складає 10-30%.

Зовнішня характеристика генератора **послідовного** збудження має вид кривої 2 на рис. 22.11. За загальним правилом, вона представляє собою залежність напруги на затискачах генератора U від струму навантаження I при $n = \text{const}$.

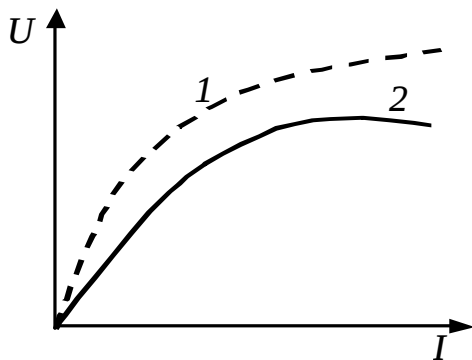


Рис. 22.11. Зовнішня характеристика генератора послідовного збудження.

Якби в генераторі послідовного збудження не було ні омичного спаду напруги в якорі, ні реакції якоря, то його зовнішня характеристика збіглася б з характеристикою холостого ходу 1 (переривчаста лінія на рис. 22.11).

В дійсності крива 2 завжди проходить нижче кривої 1, причому спочатку напруга змінюється майже прямо пропорційно струму навантаження, тому що тут генератор ще не насичений, але потім при подальшому збільшенні струму I , а отже, і струму збудження відбувається насичення сталі, і напруга збільшується вже повільніше. При великому насиченні, коли потік полюсів збільшується дуже мало, а потік реакції якоря і спаду напруги в якорі ростуть пропорційно струму I , напруга при подальшому навантаженні зменшується.

Через те, що напруга генератора послідовного збудження різко змінюється зі зміною навантаження, у практиці він не застосовується як джерело струму, тому що до генераторів майже завжди пред'являється вимога тримати напругу більш-менш постійною.

Зовнішні характеристики генератора **змішаного** збудження представлені на рис. 22.12.

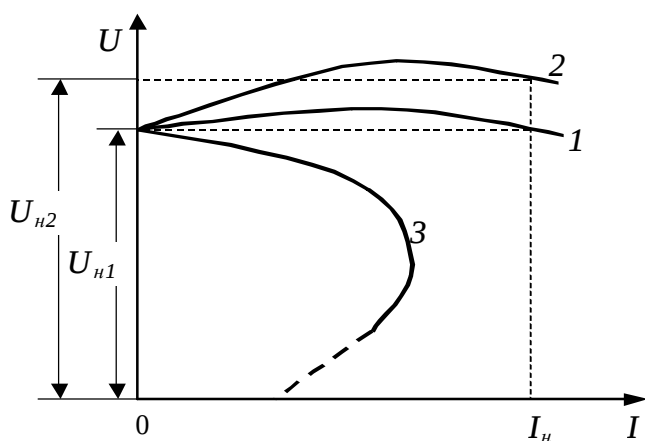


Рис. 22.12. Зовнішні характеристики генератора змішаного збудження.

Вибираючи число витків послідовної обмотки збудження так, щоб при номінальному струмі її МРС могла компенсувати дію омичного спаду напруги і реакції якоря генератора, одержана при номінальному навантаженні напруга U , була рівна напрузі холостого ходу. У цьому випадку зовнішня характеристика має вид кривої 1 на рис. 22.12 і генератор змішаного збудження може бути названий **нормально напруженим**.

Якщо поставлена умова підтримувати постійну напругу на затискачах приймача, для чого потрібно компенсувати спад напруги в лінії, то необхідно збільшити число витків послідовної обмотки збудження. У цьому випадку зовнішня характеристика здобуває вид кривої 2 на рис. 22.12, де генератор може бути названий **перенапруженим**.

При зустрічному включенні обмоток МРС послідовної обмотки спрямована зустрічно відносно МРС паралельної обмотки (крива 3). Протиположності застосовується в спеціальних випадках, коли потрібно одержати круто спадаючу зовнішню характеристику, як наприклад, у зварювальних генераторах, прожекторних установках і т.д.

Якщо провести порівняльний аналіз зовнішніх характеристик генераторів постійного струму при різних способах збудження, то їх можна представити наступним сімейством кривих (рис. 22.13).

Регульовальна характеристика

Ця характеристика являє собою залежність струму збудження від струму навантаження при постійній частоті обертання $n=const$ і постійній напрузі на виході генератора $U=const$.

Бажаючи підтримати напругу на за тискачах генератора постійною, ми повинні, відповідно до зовнішньої характеристики, зменшувати струм збудження при знятті навантаження і збільшувати його при збільшенні останнього.

На рис. 22.14 показана регульовальна характеристика генератора незалежного збудження, знята при збільшенні навантаження від нуля до номінального. В цьому випадку зміна струму збудження визначається відношенням:

$$DI_{3H} = \frac{I_{3H} - I_{30}}{I_{30}}$$

Згідно приведених на рис. 22.13. характеристик, у генераторів незалежного, паралельного і змішаного збудження при зустрічному включенні обмоток збудження, вихідна напруга зменшується при збільшенні навантаження. Тому, щоб підтримати його на визначеному рівні, у цих ге-

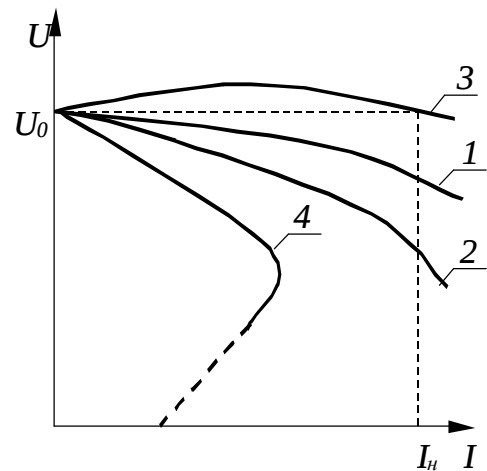


Рис. 22.13. Зовнішні характеристики генераторів незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

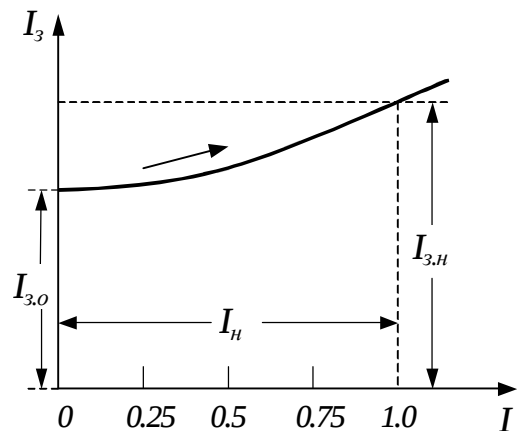


Рис. 22.14. Регульовальна характеристика генератора незалежного збудження.

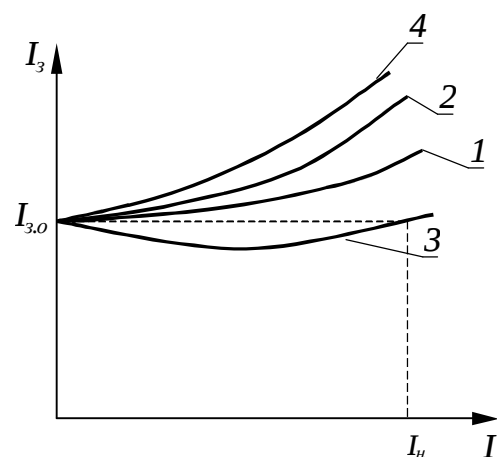


Рис. 22.15. Регульовальні характеристики генераторів: незалежного (1), паралельного (2), змішаного при узгодженому включенні обмоток (3), змішаного при зустрічному включенні обмоток (4).

нераторів необхідно з ростом навантаження збільшувати струм збудження (рис. 22.15.).

22.4 Умови самозбудження генераторів постійного струму

У генераторів паралельного, послідовного і змішаного збудження вихідна напруга утвориться в процесі самозбудження. Процес самозбудження заснований на тому, що в машині практично завжди існує невеликий – порядку 1-3% від нормального – потік залишкового намагнічування $\Phi_{зал.}$. Якщо ми приведемо якір в обертання з якою-небудь, наприклад номінальною, частотою обертання, то під дією цього потоку в обмотці якоря виникає невелика ЕРС і по колу збудження потече невеликий струм, що створить додатковий потік намагнічування Φ_{δ} . В залежності від напрямку струму в обмотці збудження потік Φ_{δ} може бути спрямований зустрічно щодо потоку $\Phi_{зал.}$ або узгоджено з ним. Генератор може самозбуджуватися тільки при узгодженому напрямку обох потоків, іншими словами, процес самозбудження генератора може йти тільки в одну сторону, обумовлену напрямком потоку $\Phi_{зал.}$.

При узгодженому напрямку потоків результуючий потік машини збільшується, це приводить до збільшення наводимої в якорі ЕРС і у свою чергу викликає подальше збільшення струму збудження і потоку машини.

Таким чином, щоб виник процес самозбудження необхідні наступні умови:

1. В магнітному колі генератора повинен існувати потік залишкового намагнічування.
2. Обмотка збудження повинна бути включена таким чином, щоб створюваний нею магнітний потік був спрямований узгоджено з потоком залишкового намагнічування.
3. Опір кола збудження повинний бути менше деякого критичного значення $R_3 < R_{3,кр.}$.

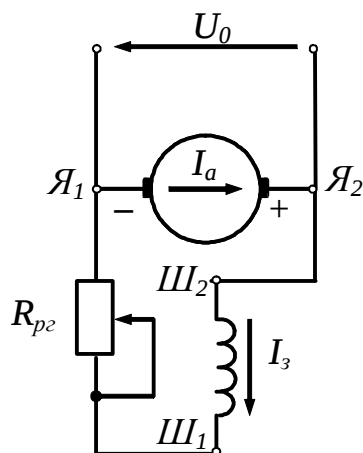


Рис. 22.16. Схема генератора паралельного збудження

Необхідність виконання останньої умови розглянемо на прикладі генератора паралельного збудження, що працює в режимі холостого ходу (рис. 22.16.).

Коли генератор приводиться в обертання приводним двигуном, починається процес самозбудження. У цьому перехідному процесі для кола збудження справедливо наступне рівняння напруг:

$$u_3 = i_3 R_3 + \frac{d(L_3 i_3)}{dt}, \quad (22.5)$$

де u_3 – миттєве значення напруги в колі збудження;

i_3 – миттєве значення струму в колі збудження; $R_3 = R_{o3} + R_{p2}$ – опір кола збудження; R_{o3} – активний опір обмотки збудження; R_{p2} – опір регулювального релостата в колі збудження; L_3 – індуктивність обмотки збудження.

Коли процес самозбудження закінчиться, то в сталому режимі: $u_3 = U_3$, $i_3 = I_3$ – сталі значення напруги і струму в колі збудження.

З огляду на, те що для генератора паралельного збудження $U_3 = U_0$, то сталі значення напруги і струму в колі збудження можна визначити по точці перетину характеристик $U_0 = f(I_3)$ і $I_3 R_3 = f(I_3)$.

Щоб відповісти на запитання, до якої межі йде процес самозбудження, припустимо, що коло якоря розімкнуте, тобто $I = 0$, і опір кола збудження, обумовлений сумою $(R_{o3} + R_{p2})$ залишається постійним.

Припустимо далі, що генератор возбудився до напруги U_1 , що відповідає на характеристиці холостого ходу точки A (рис. 22.17).

Але U_1 буде і напругою на затискачах кола збудження U_3 , тобто

$$U_1 = U_3 = I_3 (R_{o3} + R_{p2}).$$

Відповідно до умови маємо:

$$R_{o3} + R_{p2} = \frac{U_3}{I_3} = \operatorname{tg} a_1 = \operatorname{const},$$

тобто опір кола збудження визначається тангенсом кута, утвореного віссю абсцис із прямою, що проходить через початок координат і точку напруги, до якої машина возбудилася при холостому ході.

Кут нахилу a характеристики обмотки збудження залежить від опору кола збудження, тобто $\operatorname{tg} a \sim R_3$. Якщо збільшити опір кола збудження, кут a росте, а точка A переміщається до початку координат.

При якомусь $a = a_{кр}$, якому відповідає $R_3 = R_{3,кр}$ характеристика обмотки збудження стане дотичною до початкової частини характеристики холостого ходу.

При цьому значенні опору кола збудження процес самозбудження стане неможливим.

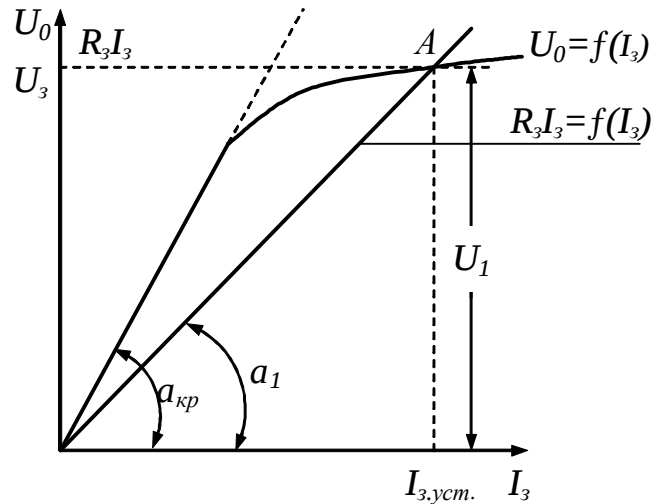


Рис. 22.17. Самозбудження генератора паралельного збудження.

Опір кола збудження, при якому машина вже не самозбуджується, називається **критичним опором**.

Так само виробляється самозбудження і генераторів змішаного збудження, тому що в них головну роль грає паралельна обмотка збудження.

При самозбудженні генератора послідовного збудження зовнішній коло повинний бути обов'язково замкнутий, тому що в протилежному випадку навантажувальний струм, а стало бути, і струм збудження будуть дорівнювати нулю.

Контрольні питання

1. Які характеристики визначають властивості генераторів постійного струму?
2. Чому у генератора паралельного збудження зміна напруги при скиданні навантаження більше, ніж у генератора незалежного збудження?
3. Які умови самозбудження генераторів постійного струму?
4. При яким включенні обмоток збудження генератора змішаного збудження зовнішня характеристика виходить більш жорсткою?

Глава 23. Двигуни постійного струму

23.1 Основні поняття

Електричні машини мають властивість оборотності, тобто вони можуть працювати як у режимі генератора, так і в режимі двигуна. Тому якщо машину постійного струму підключити до джерела енергії постійного струму, то в обмотці збудження й в обмотці якоря машини з'являться струми. Взаємодія струму якоря з полем збудження створюють на валу якоря електромагнітний момент $M_{ем}$. Однак тепер цей момент є не гальмувальним, як це мало місце в генераторі, а обертальним моментом (рис. 23.1.). Під дією електромагнітного моменту якір машини починає обертатися, тобто машина буде працювати в режимі електричного двигуна, споживаючи з мережі електричну енергію і перетворюючи її в механічну.

В процесі роботи двигуна його якір обертається в магнітному полі. В обмотці якоря індукуються ЕРС E_a , напрямом якої, можна визначити за правилом “правої руки”. По своїй природі ця ЕРС нічим не відрізняється від ЕРС, що наводиться в якірній обмотці генератора. В двигуні вона спрямована проти струму I_a і тому називається протиелектроорушійною силою (противо-ЕРС) якоря (рис. 23.2.).

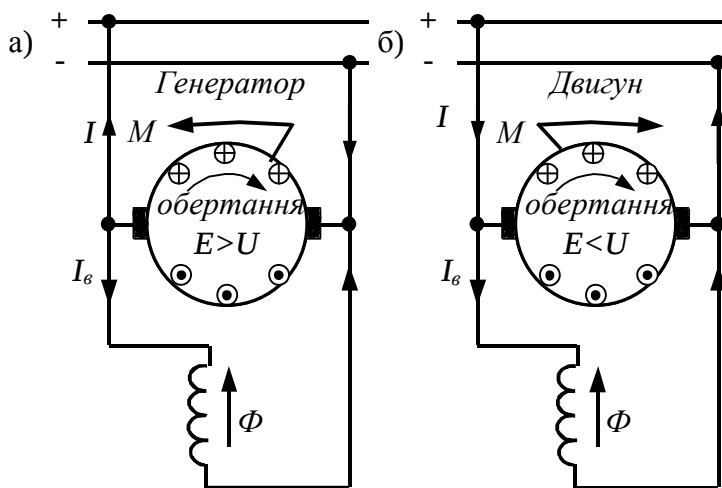


Рис.23.1. Машина паралельного збудження в режимі генератора (а) і в режимі двигуна (б).

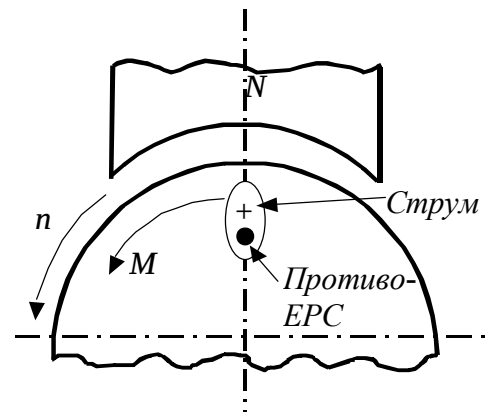


Рис.23.2. Напрямок противо-ЕРС у двигуні.

Так само як і генератори, двигуни постійного струму можуть бути незалежного, паралельного, послідовного і змішаного збудження.

Двигуни постійного струму набули широкого застосування в електроприводах, де потрібно плавне й у широких межах регулювання частоти обертання, тому що у відношенні регульованих властивостей двигуни постійного струму мають безперечні переваги перед двигунами змінного струму.

23.2 Основні рівняння двигунів постійного струму

Незалежно від способу збудження для двигунів постійного струму в сталому режимі роботи під навантаженням справедливі основні рівняння:

1. Рівняння напруг для кола якоря

$$U = E_a + I_a R_a, \quad (23.1)$$

де U - підведена до двигуна напруга; $E_a = c_e n \Phi$ - ЕРС обмотки якоря; $I_a R_a$ спад напруги в колі якоря.

2. Струм кола якоря

$$I_a = (U - E_a) / R_a. \quad (23.2)$$

3. Частота обертання двигуна (з рівняння 23.1, з огляду на те, що $E_a = c_e n \Phi$)

$$n = (U - I_a R_a) / (c_e \Phi), \quad (23.3)$$

де Φ - магнітний потік в повітряному зазорі на кожному полюсному поділку.

4. Електромагнітний момент двигуна визначається залежністю

$$M_{em} = C_m I_a \Phi, \quad (23.4)$$

де $C_m = PN / 2\pi a$ - постійна машини.

Електромагнітний момент M_{em} приводить якорь двигуна в обертання, що через вал передається виконавчому механізму. При цьому на вал двигуна діють наступні моменти:

1) **обертаальний** (електромагнітний) **момент** M_{em} ;

2) **момент холостого ходу** M_0 , обумовлений механічними (включаючи вентильні) і магнітними втратами в двигуні. Величина моменту M_0 не залежить від навантаження і у двигунах нормального виконання вона не перевищує 2-6% від номінального значення обертаального моменту (M_n);

3) **корисний момент** M_2 , тобто протидіючий момент механізму, що приводиться в дію даним двигуном;

4) **динамічний момент** M_∂ , що виникає при всякій зміні частоти обертання двигуна в зв'язку з інерцією обертових частин двигуна і механізму, що приводиться ним у дію:

$$M_\partial = J \frac{dw}{dt},$$

де J - момент інерції всіх обертових частин агрегату, приведений до валу двигуна і віднесений до кутової частоти обертання ω .

Як правило моменти M_0 і M_2 розглядають спільно як суму

$$M_0 + M_2 = M_{cm},$$

де M_{cm} - **статичний момент** опору обертанню двигуна.

У загальному випадку рівняння моментів двигуна

$$M_{em} = M_0 + M_2 \pm M_\partial,$$

або

$$M_{em} = M_{cm} \pm M_\partial.$$

Знак “плюс” чи “мінус” у динамічного моменту визначається характером зміни частоти обертання: при збільшенні частоти обертання M_∂ складається з моментом M_{cm} (знак “плюс”), а при зменшенні частоти обертання M_∂ діє проти моменту M_{cm} (знак “мінус”).

При незмінній частоті обертання якоря ($\frac{d\omega}{dt} = 0$) динамічний момент $M_\partial = 0$, тоді рівняння моментів двигуна:

$$M_{em} = M_0 + M_2 = M_{cm}, \quad (23.4)$$

тобто при сталому режимі роботи обертальний момент двигуна і статичний момент опору на його валу взаємно врівноважуються.

Крім того, що обертальний момент двигуна пропорційний електромагнітній потужності $P_{em} = E_a I_a$, а тому

$$M_{em} = \frac{P_{em}}{\omega} = \frac{P_{em}}{2\pi n} = \frac{60}{2\pi} \frac{P_{em}}{n} = 9.55 \frac{P_{em}}{n}. \quad (23.5)$$

Величина корисного моменту двигуна пропорційна корисній потужності двигуна, що дає можливість одержати вираз корисного моменту, аналогічний виразу (23.5)

$$M_2 = 9.55 \frac{P_2}{n}, \quad (23.6)$$

де P_2 - корисна потужність двигуна (потужність на валу), Вт; M_2 - корисний момент, Н·м; n - частота обертання, об/хв.

23.3 Пуск у хід двигунів постійного струму

Пускові властивості двигунів постійного струму, як і двигунів змінного струму, оцінюються наступними показниками:

- кратністю пускового струму I_n / I_n ;
- кратністю пускового моменту M_n / M_n ;
- тривалістю пускової операції t_n (с);
- економічністю пускової операції, з погляду витрат на устаткування і наступні експлуатаційні витрати.

Ці показники залежать у першу чергу від способів пуску в хід двигунів.

Розглянемо характеристику способів пуску в хід двигунів постійного струму.

Пряме включення в мережу. Цей спосіб пуску простий, не вимагає спеціальної апаратури. Однак має той істотний недолік, що в момент вмикання двигуна в мережу відбувається кидок пускового струму.

Цей пусковий струм визначається:

$$I_n = (U - E_a) / R_a, \quad (23.7)$$

де $E_a = c_e n \Phi = 0$, тому що $n = 0$.

Отже:

$$I_n = U / R_a. \quad (23.8)$$

Як правило у двигунів постійного струму опір кола якоря R_a менше 1 Ом, тому пусковий струм у 10 і більше разів перевищує номінальний струм.

Цим способом, як правило, пускаються в хід тільки двигуни малої потужності, у яких опір кола якоря відносно великий.

Реостатний пуск. При цьому способі пуску в момент включення двигуна в мережу в коло якоря включений додатковий опір пускового реостату R_n . При цьому пусковий струм обмежується величиною

$$I_n = U / (R_a + R_n). \quad (23.9)$$

Величину опору пускового реостата в двигунів постійного струму вибирають таким чином, щоб кратність пускового струму не перевищувала наступні величини:

$$I_n / I_n = 1,4 \div 1,7 \text{ - для двигунів понад } 1000 \text{ кВт};$$

$I_n/I_n = 17 \div 2,5$ - для двигунів до 1000 кВт.

Принципова схема цього способу пуску на прикладі двигуна паралельного збудження приведена на рис. 23.3,а.

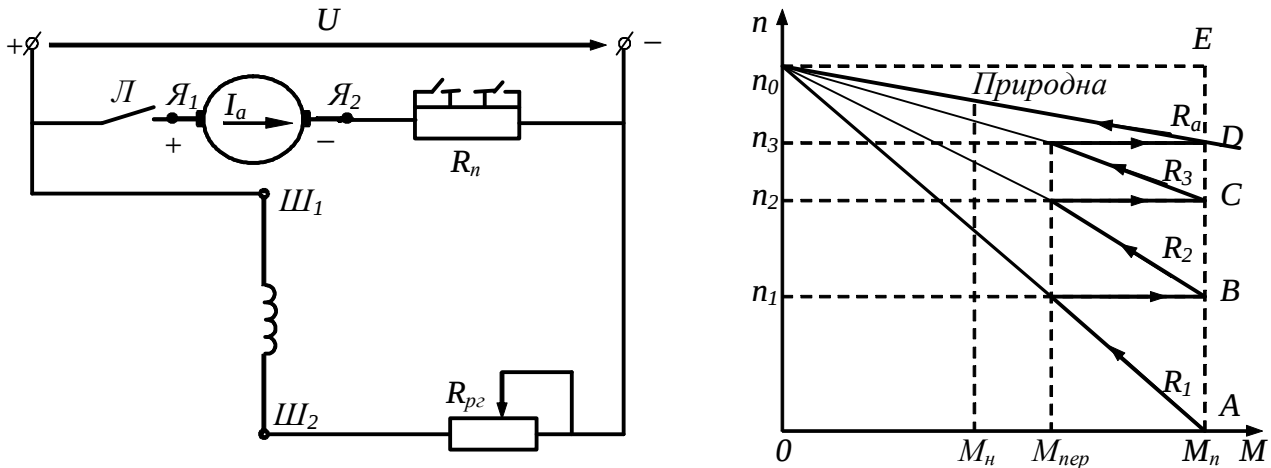


Рис.23.3. Принципова схема пуску (а) і побудова графіка пускового моменту (б) двигуна постійного струму паралельного збудження

Вмикання двигуна виконується замиканням лінійного контактора L , при цьому послідовно з колом якоря ввімкнений опір пускового реостата R_n і пусковий струм обмежується до зазначеної вище кратності.

По мірі розгону двигуна ступені пускового реостата автоматично шунтуються і, коли пуск завершиться, той опір R_n буде цілком зашунтировано. Цей спосіб пуску двигунів постійного струму одержав найбільше поширення.

Пуск при зниженій напрузі. Цей спосіб пуску застосовується в системах Г-Д, у яких двигун живиться від окремого генератора. У таких системах доцільно при включенні двигуна живити його зниженою напругою. При цьому пусковий струм дорівнює: $I_n = U / R_a$ і може бути обмежений будь-якою кратністю.

Оскільки системи Г-Д використовуються тільки в спеціальних установках, цей спосіб пуску двигунів має обмежене застосування.

Пуск в хід двигунів постійного струму послідовного збудження в основному протікає так само, як і паралельного, з тієї, однак, істотною різницею, що двигун послідовного збудження ні в якому випадку не можна пускати вхолосту. Це впливає з властивості його швидкісної характеристики $n = f(I_a)$. Дійсно, в двигуні послідовного збудження струм збудження дорівнює струму в якорі I_a . Але по формулі (23.3) маємо:

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}.$$

При зменшенні навантаження, тобто M_{cm} , одночасно буде зменшуватися струм I_a і потік Φ , а швидкість обертання буде рости. При значному зменшенні навантаження збільшення частоти обертання може перевищити механічно

припустимі межі, і двигун може потерпіти аварію (розрив бандажів, псування обмотки і т.д.). Тому двигуни постійного струму послідовного збудження запускають під навантаженням не менш як $0.25P_n$.

23.4 Робочі і механічні характеристики двигунів постійного струму

До робочих характеристик двигунів постійного струму відносять залежності: частоти обертання n , електромагнітного моменту $M_{ем}$, ККД h від потужності P_2 , що віддається, при $U = U_n = const$.

При знятті робочих характеристик двигуна паралельного збудження напруга $U = U_n = const$, а опір регулювального реостата в колі збудження R_{pz} підбирається так, щоб при номінальній напрузі і номінальному навантаженні двигун обертався з номінальною частотою обертання. У цьому положенні реостат R_{pz} залишається увесь час при знятті робочих характеристик, тобто $R_{pz} = const$, відповідно чому

$$I_3 = \frac{U}{R_3 + R_{pz}} = const$$

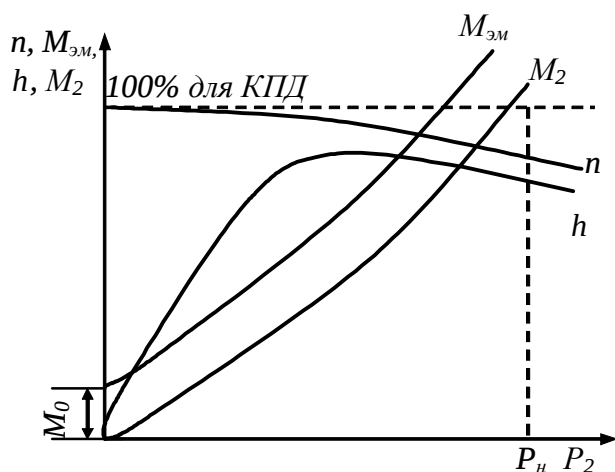


Рис.23.4. Робочі характеристики двигуна паралельного збудження.

Робочі характеристики двигуна паралельного збудження показані на рис. 23.4. Пояснимо насамперед вид швидкісної характеристики. Відповідно до формули (23.3)

$$n = \frac{U - I_a R_a}{c_e \Phi}.$$

Тому що величини U і I_3 є постійними, то в цих умовах на частоту обертання двигуна паралельного збудження діють дві причини, а саме:

1) омічний спад напруги в обмот-

ці якоря $I_a R_a$;

2) реакція якоря.

Зі збільшенням навантаження, тобто струму I_a , перша причина прагне зменшити частоту обертання двигуна, тоді як друга, навпаки, збільшити її, оскільки при звичайних умовах реакція якоря діє розмагнічуючим образом .

У залежності від того, яка з цих двох причин переважає, частота обертання двигуна або зменшиться або збільшиться при збільшенні навантаження. Пе-

рший випадок є нормальним: тому **швидкісна характеристика** двигуна паралельного збудження $n = f(P_2)$, має вид майже прямої, слабко нахиленої до осі абсцис, тобто **частота обертання двигуна паралельного збудження зі збільшенням навантаження незначно зменшується**, як правило на 3-8% при зміні навантаження від холостого ходу до номінального.

Подібний вид швидкісної характеристики складає найбільш помітна властивість двигуна паралельного збудження. Іноді така швидкісна характеристика називається **жорсткою**.

Маючи на увазі характер залежності $n = f(P_2)$, неважко пояснити характеристику $M_2 = f(P_2)$. Справді, якби частота обертання двигуна n була постійною, то по формулі (23.6) момент M_2 був би прямо пропорційний потужності P_2 . Графічно така залежність була б показана прямою, що виходить з початку координат. В дійсності частота обертання n зі збільшенням навантаження трохи падає; тому $M_2 = f(P_2)$ трохи відгинається догори.

Момент $M_{ем} = M_2 + M_0 = M_{см}$ [формула (23.4)]. При $I_3 = const$ і $n \approx const$ момент холостого ходу $M_0 \approx const$. Отже, крива $M_{ем} = f(P_2)$ проходить вище кривої $M_2 = f(P_2)$ на деяку постійну величину, тобто паралельно цій кривій.

Крива $h = f(P_2)$ має типовий характер. Віддача швидко росте при збільшенні навантаження від холостого ходу до $\frac{1}{4}$ номінальної, досягає при $\frac{1}{2}$ навантаження значення, близького до граничного, і потім, у межах зміни навантаження від $\frac{1}{2}$ до $\frac{4}{4}$ номінальної, залишається майже постійною. Як правило, в двигунах малої потужності $h = 0,85 - 0,94$.

Аналогічні робочі характеристики мають і двигуни **незалежного** збудження.

Швидкісна характеристика двигуна **послідовного** збудження значно відрізняється від аналогічної характеристики двигуна паралельного збудження (рис. 23.5).

При збільшенні навантаження струм якоря I_a збільшується й одночасно збільшується магнітний потік Φ (у двигуна послідовного збудження $I = I_a = I_3$). Отже, зі збільшенням навантаження, тобто I_a , частота обертання двигуна послідовного збудження сильно падає, причому при менших навантаженнях, коли машина ще не насичена, частота обертання зменшується швидше, а при великих навантаженнях – повільніше.

Такий вид швидкісної характеристики, яку іноді називають **м'якою**, складає найбільш відмітну властивість двигуна послідовного збудження. В цьому відношенні між двигунами паралельного і послідовного збудження спостерігається значна різниця, що пояснюється тим, що в першому з них потік Φ майже не залежить від навантаження, тобто від струму I_a , а в другому він змінюється в залежності від I_a по кривій намагнічування.

У відповідності зі швидкісною характеристикою двигуна послідовного збудження знаходиться крива його електромагнітного моменту (рис. 23.5)

$$M_{em} = f(P_2) = C_m I_a \Phi$$

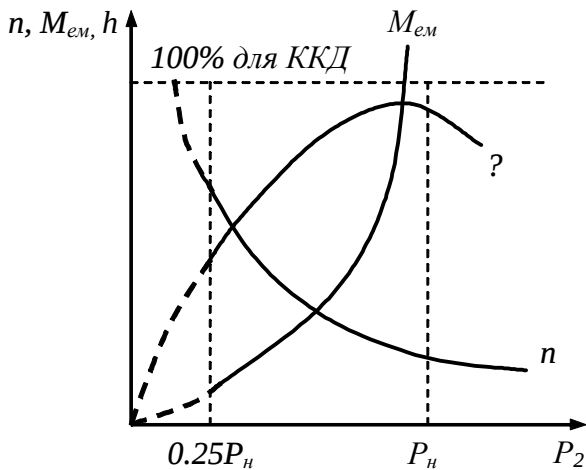


Рис. 23.5 Робочі характеристики двигуна послідовного збудження.

При невеликих навантаженнях, у межах до насичення стали, $\Phi \equiv I_a$. Отже,

$$M_{em} = C'_m I_a^2 \quad (23.10)$$

Тобто, крива $M = f(P_2)$ в початковій своїй частині є параболою. Навпаки, при сильному насиченні можна вважати, що потік практично не залежить від I_a , тобто $\Phi \approx const$. У цих умовах $M_{em} \equiv I_a$, тобто момент обертання змінюється майже пропорційно току, як у двигуна паралельного збудження.

Властивість двигунів послідовного збудження розвивати момент, приблизно пропорційний квадрату струму, має дуже важливе значення особливо в тих випадках, коли потрібний великий пусковий момент (крани, електровози), і там, де необхідна велика (до 300%) Perezавантажувальна здатність двигуна.

Треба при цьому відзначити характерну різницю між двигунами паралельного і послідовного збудження. Справді, припустимо, що момент двигуна збільшився в два рази. В двигуні паралельного збудження струм I_a повинний буде зрости теж у два рази (тому що $\Phi = const$), відповідно чому приблизно в два рази збільшиться і потужність двигуна при майже незмінній частоті обертання.

У двигуні послідовного збудження (ненасиченому) струм зросте усього в $\sqrt{2}$ рази; у стільки ж раз збільшиться і потужність двигуна, тоді як його частота обертання зменшиться в $\sqrt{2}$ рази.

У відношенні віддачі між обома типами двигунів немає істотної різниці.

У двигунах **змішаного** збудження МРС обмоток паралельного і послідовного збудження вибирається так, що одна з цих обмоток є основною, тобто дає не менш 70% МРС машини, а інша – додатковою.

Обмотки збудження включають:

- а) погоджено, коли МРС обмоток, маючи один напрямок складаються;
- б) зустрічно (диференціальній), коли МРС обмоток, маючи різний напрямок, віднімаються.

Вважаючи, що машина не насичена і що відповідно додаванню або вирахуванню МРС паралельної і послідовної обмоток збудження, складаються або віднімаються створювані цими обмотками потоки Φ_u і Φ_c , маємо:

$$\Phi = \Phi_{ш} \pm \Phi_c ; M_{ем} = C_M I_a (\Phi_{ш} \pm \Phi_c)$$

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e (\Phi_{ш} \pm \Phi_c)} \quad (23.11)$$

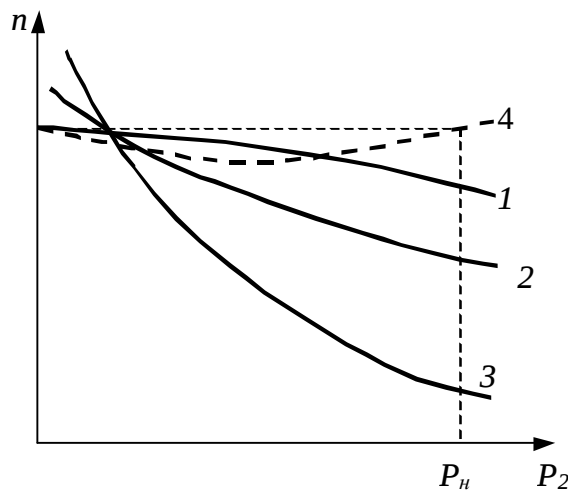


Рис.23.6. Швидкісні характеристики двигунів постійного струму при різних способах збудження.

При погодженому включенні обмоток збудження характеристики двигуна змішаного збудження (крива 2 на рис. 23.6) займають проміжне положення між робочими характеристиками паралельного (крива 1) і послідовного (крива 3) двигунів, але ближче до першого.

При зустрічному включенні обмоток умови роботи двигуна змішаного збудження погіршується. Особливо важкі умови пуску в хід, тому що при великому пусковому струмі двигун може залишитися майже без збудження і не рушить з місця. Щоб уникнути цього, послідовну обмотку збудження

на час пуску закорочують.

Зустрічне включення застосовується в тих випадках, коли потрібно одержати досить постійну частоту обертання двигуна (крива 4 на рис. 23.6). Для цього треба підібрати послідовну обмотку так, щоб її дія разом з дією реакції якоря зрівноважили вплив на частоту обертання спад напруги в колі якоря $I_a R_a$.

Механічна характеристика двигуна являє собою залежність частоти обертання від обертового (електромагнітного) моменту на валу, тобто $n = f(M)$ при $I_a = \text{const}$ і $U = \text{const}$.

Підставивши в рівняння (23.3) значення струму якоря з виразу для обертового моменту $M = C_M I_a \Phi$, одержимо

$$n = \frac{U - I_a R_a}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e \Phi} - M \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2}$$

або

$$n = n_0 - M \frac{R_a}{C_e C_m \Phi^2} \quad (23.12)$$

де $n_0 = \frac{U}{C_e \Phi}$ – частота обертання двигуна при ідеальному холостому ході (коли $M=0$).

Механічна характеристика двигуна паралельного збудження (рис. 23.7) – жорстка [при номінальному навантаженні зниження частоти обертання не перевищує $(0,05, 0,1)n_0$] графік її практично є прямою лінією.

Відповідно до рівняння (23.12) двигун, крім природної механічної характеристики 1 при $R_o = 0$ має ще і штучні (чи реостатні) характеристики, що одержують введенням в коло якоря додаткового опору R_o (характеристика 2 на рис. 23.7).

У двигунів послідовного збудження частота обертання n обернено пропорційна магнітному потоку $\Phi(I)$ машини

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_z)}{C_e \Phi(I)}, \quad (23.13)$$

де R_z – опір обмотки збудження.

Природна механічна характеристика двигуна $n = f(M)$ при $U = \text{const}$ графічно зображена на рис. 23.8 (крива 1). У цілому – характеристика **м'яка**. До насичення магнітопровода машини магнітний потік пропорційний струму якоря, тобто $\Phi = aI_a$. Отже, обертальний момент якоря $M = C_M I_a \Phi = C_M a I_a^2$. Виразивши звідси значення I_a через M і підставивши його в рівняння (23.12), одержимо

$$n = \frac{U - I_a(R_a + R_z)}{C_e \Phi} = \frac{U}{C_e a \sqrt{M / (C_m a)}} - \frac{R_a + R_z}{C_e a} = A / \sqrt{M} - B$$

де A и B – постійні величини.

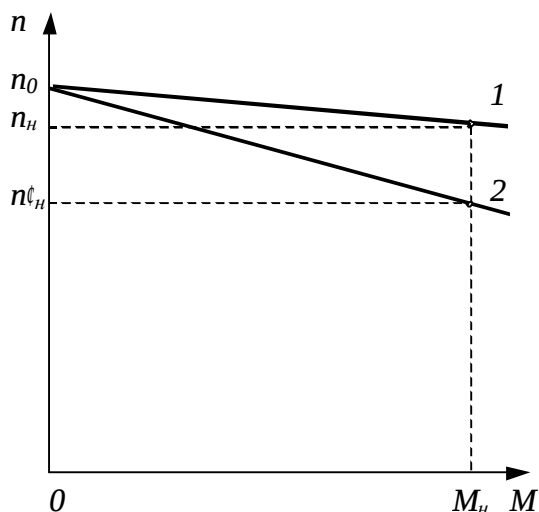


Рис.23.7. Механічні характеристики двигуна паралельного збудження.

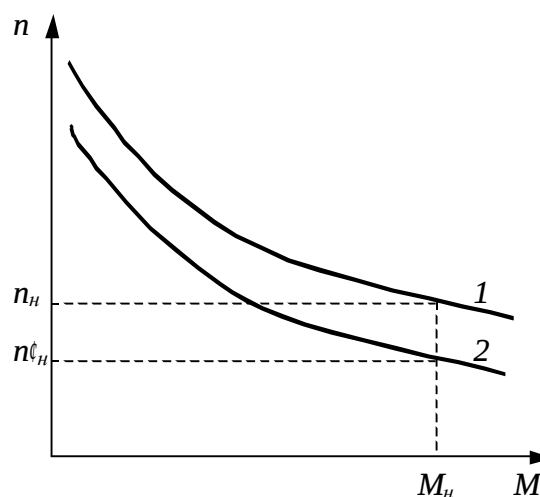


Рис.23.8. Механічні характеристики двигуна послідовного збудження.

Таким чином, частота обертання двигуна зі збільшенням обертаючого моменту зменшується за законом, близькому до гіперболічного. Уповільнення

спаду природної механічної характеристики в нижній частині, де вона майже паралельна осі M , обумовлено магнітним насиченням магнітопровода і спадом напруги на якорі $I_a R_a$.

Штучні механічні характеристики двигуна послідовного збудження одержують введенням в коло якоря додаткового опору R_o (крива 2 на рис. 23.8).

23.5 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму

Регулювальні характеристики двигунів визначаються:

а) межами регулювання частоти обертання, що установлюються відношенням максимальної частоти обертання до мінімального n_{max}/n_{min} ;

б) економічністю регулювання, розуміючи під цим первісні витрати на устаткування і наступні експлуатаційні витрати;

в) характером регулювання – плавним чи східчастим;

г) простотою і надійністю регулюючої апаратури й операцій по регулюванню частоти обертання.

Можливі способи регулювання частоти обертання двигунів очевидні з виразу:

$$n = \frac{U - I_a (R_a + R_{pr})}{C_e \Phi} \quad (23.14)$$

При живленні двигунів від джерела постійної напруги частоту обертання можна регулювати у такий спосіб:

- зміною опору кола якоря;
- зміною значення магнітного потоку.

Для регулювання частоти обертання шляхом зміни опору кола якоря як правило використовують той же реостат, що і для пуску двигуна. Наприклад, за допомогою реостата рис. 23.9, а, для якого на рис. 23.9, б, зображені механічні характеристики при моменті $M = M_{em}$, можна одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 . У тому випадку, коли необхідно мати інші частоти обертання, реостат постачають додатковими ступінцями опорів. Реостат, використаний як для пуску, так і для регулювання частоти обертання, знаходиться у відношенні нагрівання в більш важких умовах, ніж реостат, який служить тільки для пуску.

При зміні опору в колі якоря відбувається наступне. Допустимо, що двигун паралельного (послідовного, змішаного) збудження працює на природній характеристиці з моментом $M = M_{cm}$ і частотою обертання n_c (див. рис. 23.9). В першу мить після включення в коло якоря реостата з опором $R = R_1 + R_2 + R_3$ через інерційність двигуна частота обертання не змінюється.

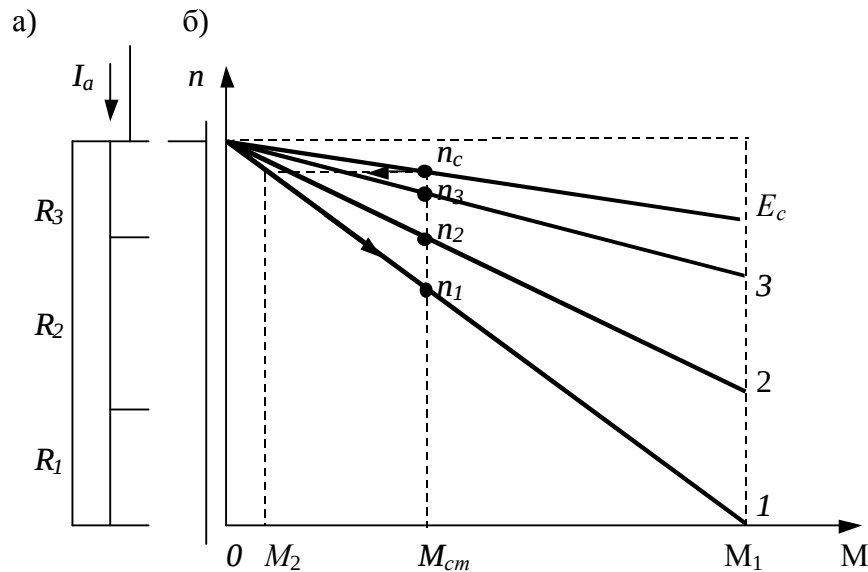


Рис. 23.9. Схема регулювального реостата (а) і механічні характеристики (б) двигуна паралельного збудження.

Збільшення опору при незмінній частоті обертання приводить до зменшення струму якоря, а, виходить, і моменту двигуна. При частоті обертання n_c двигун перейде на характеристику 1 і буде розвивати момент M_2 . Так як $M_2 < M_{cm}$, то почнеться перехідний процес, при якому частота обертання двигуна буде знижуватися. Це викликає зменшення ЕРС, а отже, збільшення струму якоря і моменту руху двигуна. Сталої режим настає при частоті обертання n_1 , при якій $M = M_{cm}$.

Розглянутий спосіб регулювання частоти обертання не вимагає складного устаткування і дає можливість одержати знижену частоту обертання при заданому навантаженні. Однак він має істотні недоліки. Одним з них є «м'які» штучні механічні характеристики, завдяки чому частота обертання при даному опорі сильно залежить від навантаження двигуна. «М'які» характеристики утрудняють одержання необхідних, особливо низьких частот обертання при різних навантаженнях. Інший недолік полягає в тім, що регулювання частоти обертання супроводжується втратами потужності в реостаті, що зростають в міру збільшення опору R і зниження частоти обертання.

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму зміною магнітного потоку. Для регулювання частоти обертання двигунів паралельного і змішаного збудження шляхом зміни *магнітного потоку* в коло шунтової обмотки включають реостат R_{pe} . Зміна опору останнього приводить до зміни струму I_z і, отже, магнітного потоку.

Розглянемо більш докладно даний метод стосовно до двигуна паралельного збудження. Залежність між частотою обертання і магнітним потоком при $M = const$ визначається рівнянням (23.12).

Щоб можна було скласти уявлення про характер зміни частоти обертання, на рис. 23.10 приведені залежності $n = f(\Phi)$.

Як видно, при роботі двигуна вхолосту ($M_1 = M_{cm1} = 0$) зі зменшенням магнітного потоку частота обертання зростає і при $\Phi \rightarrow 0 \quad n \rightarrow \infty$. Якщо ж двигун навантажений ($M = M_{cm} \neq 0$), то при зменшенні магнітного потоку частота обертання спочатку зростає, а потім, досягши максимального значення, зменшується. Та сама частота обертання у випадку ($M = M_{cm} \neq 0$) може бути отримана при двох різних значеннях магнітного потоку. Однак робочою областю, у якій виконується регулювання частоти обертання, є область, що відповідає великим магнітним потокам, де зі зменшенням потоку частота обертання зростає.

На підставі виразу $M = C_M \Phi I_a$ можна також зробити важливий висновок про те, що при $M = M_{cm} = \text{const}$ і зменшенні магнітного потоку струм I_a зростає. Це необхідно враховувати при виборі потужності двигуна.

З рівняння (23.12) випливає, що механічні характеристики двигуна паралельного збудження $n = f(M)$ при різних значеннях магнітного потоку прямолінійні; меншим значенням магнітних потоків відповідає великі частоти обертання і більш «м'які» механічні характеристики (рис. 23.11). Наприклад, установивши Φ_1, Φ_2, Φ_3 , одержимо при моменті опору M_{cm} частоти обертання n_1, n_2 и n_3 .

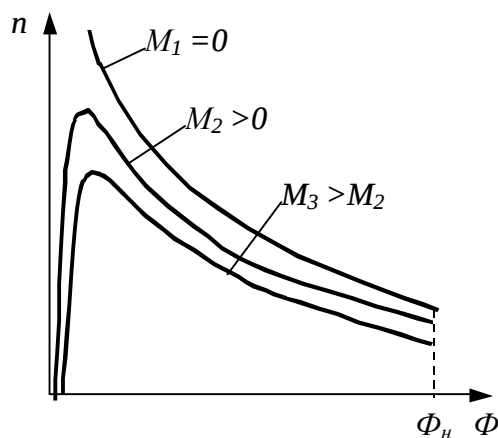


Рис.23.10. Залежності $n=f(\Phi)$ двигуна паралельного збудження при різних моментах

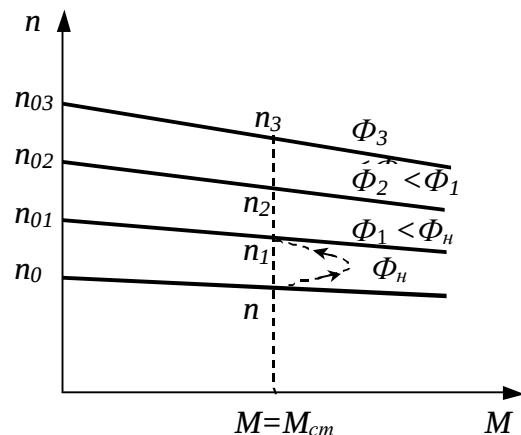


Рис.23.11. Механічні характеристики двигуна паралельного збудження при різних магнітних потоках

Перехід від однієї механічної характеристики до іншої відбувається не при постійній частоті обертання, а відповідно до так названої динамічної характеристики $n = f(m)$, показаної на рис. 23.11 пунктиром. Це пояснюється значною індуктивністю обмотки збудження, через яку зміна магнітного потоку відбувається не миттєво, а поступово, одночасно зі збільшенням частоти обертання.

Однією з переваг розглянутого способу регулювання частоти обертання є його економічність, тому що додаткові втрати потужності в регулювальному реостаті R_{p2} невеликі. До достоїнств варто віднести також досить «жорсткі» механічні характеристики, що полегшує одержання потрібних частот обертання при різних навантаженнях.

Серйозним недоліком варто вважати те, що регулювання частоти обертання шляхом зміни магнітного потоку можна робити лише в області нагору від природної механічної характеристики.

Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму зміною підведеної напруги. Як було відзначено вище, серйозним недоліком регулювання частоти обертання шляхом зміни опору в колі якоря при звичайних схемах включення двигунів є складність одержання при різних навантаженнях знижені частоти обертання через занадто «м'які» механічних характеристики.

Для усунення цього недоліку знаходять застосування різні інші способи одержання штучних механічних характеристик, що відрізняються більшою «жорсткістю».

У випадках особливо високих вимог до «жорсткості» механічних характеристик знаходять застосування різні варіанти систем з регульованою напругою, що підводиться до якоря двигуна..

Найпростіша схема одного з варіантів такої системи (системи генератор - двигун, Г-Д) приведена на рис. 23.12. В цій системі якорь двигуна ЯД незалежного збудження з'єднаний з якорем генератора ЯГ незалежного збудження, що приводиться в обертання приводним двигуном ДП. Обмотки збудження двигуна ОЗД і генератора ОЗГ одержують живлення від стороннього джерела постійного струму через реостат r_1 і потенціометр r_2 .

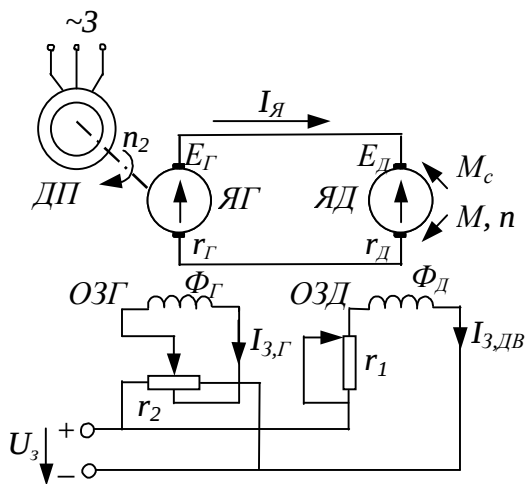


Рис.23.12.Схема найпростішої системи генератор-двигун

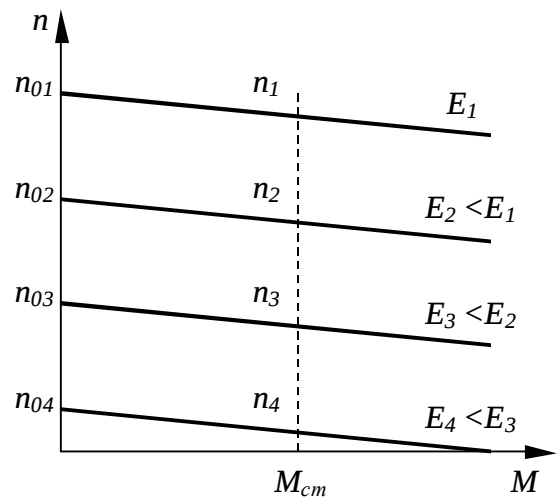


Рис.23.13.Механічні характеристики двигуна в системі генератор-двигун

Перед пуском двигуна необхідно установити движки реостата r_1 і потенціометра r_2 в положення, зазначені на рис. 23.12, і зробити пуск двигуна ДП. При цьому МРС обмотки ОЗД створює найбільший магнітний потік Φ_D двигуна, а магнітний потік Φ_G , генератора і, отже, його ЕРС E_G дорівнюють нулю. Очевидно, при цьому якорь двигуна ЯД залишиться в спокої.

Для пуску двигуна варто перемістити движок потенціометра r_2 з зазначеного положення, наприклад, уліво. Тоді виникає струм $I_{3,G}$ МРС обмотки ОЗГ створює магнітний потік Φ_G генератора, з'являються ЕРС E_G , і струм $I_{я}$. За-

вдяки взаємодії струму $I_{\text{я}}$ і магнітного потоку $\Phi_{\text{д}}$ двигуна якір останнього ЯД приходить в обертання.

Рівняння механічної характеристики $n = f(M)$ двигуна в системі Г-Д виводиться аналогічно рівнянню (23.12) має вид:

$$n = \frac{E_{\text{Г}}}{c_{\text{ед}} \Phi_{\text{д}}} - \frac{M(r_{\text{Г}} + r_{\text{д}})}{c_{\text{ед}} c_{\text{мд}} \Phi_{\text{д}}^2} = n_0 - Dn \quad (23.15)$$

Як видно, механічна характеристика $n = f(M)$ являє собою пряму лінію. Внаслідок невеликого сумарного опору $r_{\text{Г}} + r_{\text{д}}$ механічна характеристика виходить досить жорсткі.

Регулювання частоти обертання двигуна можна робити двома способами:

- 1) зміною ЕРС генератора $E_{\text{Г}}$ при $\Phi_{\text{д}} = \text{const}$;
- 2) зміною магнітного потоку $\Phi_{\text{д}}$ двигуна при $E_{\text{Г}} = \text{const}$.

Другий спосіб регулювання частоти обертання був розглянутий раніше, тому зупинимося тільки на першому способі.

З (23.15) випливає, що при зменшенні ЕРС генератора за допомогою потенціометра r_2 буде змінюватися тільки перший член рівняння, що визначає частоту обертання холостого ходу n_0 . Другий член рівняння Dn , яким визначається зміна частоти обертання, викликана навантаженням, буде залишатися незмінним. Таким чином, механічні характеристики при різних значеннях ЕРС генератора являють собою сімейство паралельних ліній (рис. 23.13) і, наприклад, при моменті $M_{\text{ст}}$ виявляється можливим одержати частоти обертання n_1, n_2, n_3, n_4 .

Крім широкого діапазону регулювання частоти обертання система Г-Д має ряд інших достоїнств. Одне з них полягає в тому, що керування двигуном здійснюється шляхом впливу на коло обмоток збудження, потужності яких відносно невеликі.

До основних недоліків системи Г-Д варто віднести велике число машин, порівняно низький ККД, значні габаритні розміри і високу вартість.

З розвитком напівпровідникової техніки виявилось можливим позбутися від недоліків, властивій системі Г-Д, шляхом використання замість генератора з приводним двигуном напівпровідникового (тиристорного) перетворювача змінного струму в постійний з регульованою напругою. В системах з тиристорним перетворювачем можна одержати характеристики, аналогічні характеристикам систем Г-Д.

В даний час уже працює велике число систем з тиристорними перетворювачами на різні потужності й у різних областях техніки. Їхнє число буде надалі збільшуватися.

Регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження.

Воно виробляється тими ж двома способами, що і двигуна паралельного збудження:

- а) зміною омичного спаду напруги в колі якоря;
- б) зміною потоку збудження.

Регулювання частоти обертання реостатом в колі якоря при $U = const, M_{cm} = const$. Переведемо рухливий контакт регульовального реостата з першого положення ($R_{p2} = 0$) на друге (рис. 23.14). Щоб відповісти на запитання, як змінюється струм I_a , припустимо, що сталь машини не насичена. Тоді $\Phi \equiv I_a$ і

$$U = C_e n \Phi + I_a (R_a + R_{p2}) = C'_e n I_a + I_a (R_a + R_{p2})$$

звідси

$$I_a = \frac{U}{C_e n + (R_a + R_{p2})} \quad (23.16)$$

Так як $U = const$ і в перший момент після введення реостата R_{p2} частота обертання двигуна n ще зберігає своє колишнє значення, то I_a зменшується відповідно до збільшення знаменника в формулі (23.16). Обертальний момент двигуна зменшується пропорційно I_a^2 , а так як $M_{cm} = const$, то частота обертання двигуна почне зменшуватися, і цей процес буде йти доти, поки струм I_a і відповідно потік Φ не досягнуть своїх колишніх значень (рис. 23.15).

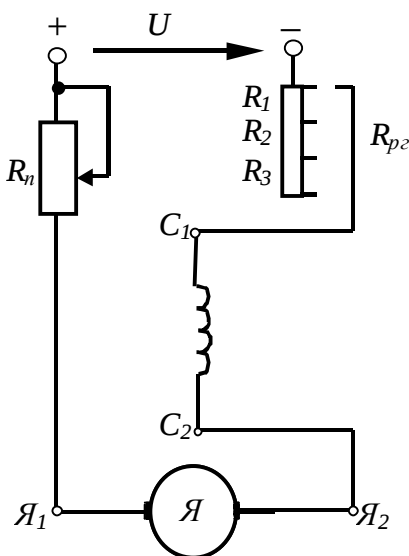


Рис.23.14.Схема двигуна послідовного збудження.

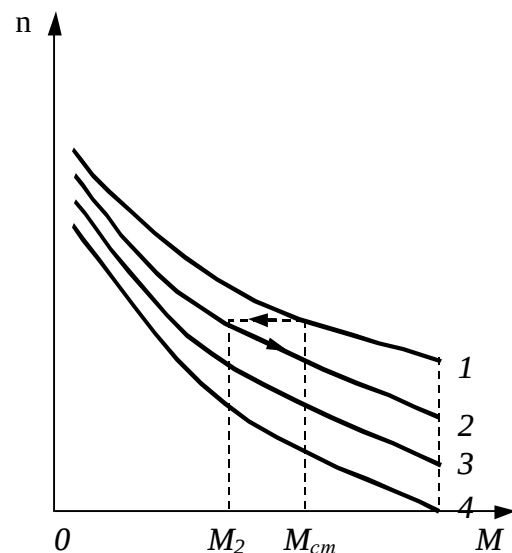


Рис.23.15.Механічні характеристики двигуна послідовного збудження.

Регулювання частоти обертання двигуна постійного струму послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження. Схема регулювання приведена на рис. 23.16. Припустимо, що $U = const$ і $M_{cm} = const$. При розімкнутих рубильниках P_1, P_2 струми в якорі і в послідовній обмотці збудження рівні, тобто $I_{a1} = I_{z2}$. Після замикання рубильника P_1 встановлюється новий режим роботи, при якому струм $I_{z2} < I_{z1}$, тому що частина струму відгалужується в опір R_{pe} . Відповідно до цього зменшується потік збудження від значення Φ_1 до значення Φ_2 . Але струм

$$I_{a2} = I_{z1} + I_{pe}$$

повинний бути більше первісного I_{a1} в такій ступені, щоб збереглася рівність

$$C_M I_{a2} \Phi_2 = C_M I_{a1} \Phi_1 = M_{cm}.$$

Потужності $P_1 = UI_a$ та $P_2 = 2p \frac{n}{60}$ збільшуються, внаслідок чого віддача двигуна мало змінюється. Отже, **даний спосіб регулювання частоти обертання двигуна досить економічний**. Але умови роботи якоря у відношенні нагрівання і комутації погіршуються. Тому зі збільшенням частоти обертання n як правило не йдуть вище 25-35% від номінальної. Розглянутий спосіб регулювання широко застосовується в електричній тязі.

Регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки якоря. У порівнянні з попереднім випадком процес змінюється на зворотний, а саме, при новому сталому режимі роботи після замикання рубильника P_2 при розімкнутому рубильнику P_1 (рис. 23.16) струм $I_{a2} < I_{a1}$, тому що частина струму, що тече з мережі, відгалужується в опір R_{pr} ; I_{z2} буде більше I_{z1} , так, щоб збереглася рівність $C_M I_{a2} \Phi_2 = C_M I_{a1} \Phi_1 = M_{cm}$. Відповідно, потужність, що підводиться $P_1 = UI_{a2}$ збільшується, а потужність, що віддається $P_2 = M 2p \frac{n}{60}$ зменшується і, отже, віддача двигуна $h = P_2/P_1$ сильно зменшується.

Звідси випливає, що даний спосіб регулювання частоти обертання двигунів послідовного збудження вкрай неекономічний. Тому він застосовується тільки там, де вартість електроенергії не є істотним чинником і де (наприклад, у ливарних цехах) потрібно на короткий час зменшити частоту обертання n .

На рис. 23.17 показані механічні характеристики двигунів послідовного збудження $n = f(M)$ при $U = const$ для випадків:

- а) нормальної роботи двигунів (крива 1);
- б) при шунтуванні обмотки збудження (крива 2);
- в) при шунтуванні обмотки якоря (крива 3).

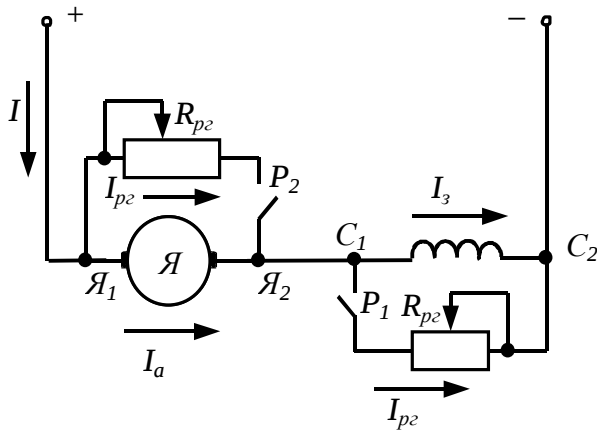


Рис.23.16.Схема для регулювання частоти обертання двигуна послідовного збудження шунтуванням обмотки збудження і якоря

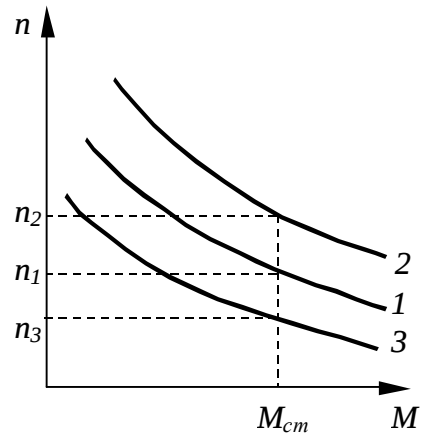


Рис.23.17.Механічні характеристики двигуна послідовного збудження

23.6 Електричне гальмування двигунів постійного струму

У тому випадку, коли електропривод необхідно зупинити, його відключають від мережі, а потім може застосовуватися механічне гальмування.

Однак, широкое застосування одержало й електричне гальмування приводу.

Розрізняють наступні способи електричного гальмування двигунів постійного струму:

- 1) рекуперативне гальмування (з поверненням енергії в мережу);
- 2) динамічне гальмування;
- 3) гальмування противмиканням.

Характеристику цих способів гальмування розглянемо на прикладі двигуна з паралельним збудженням.

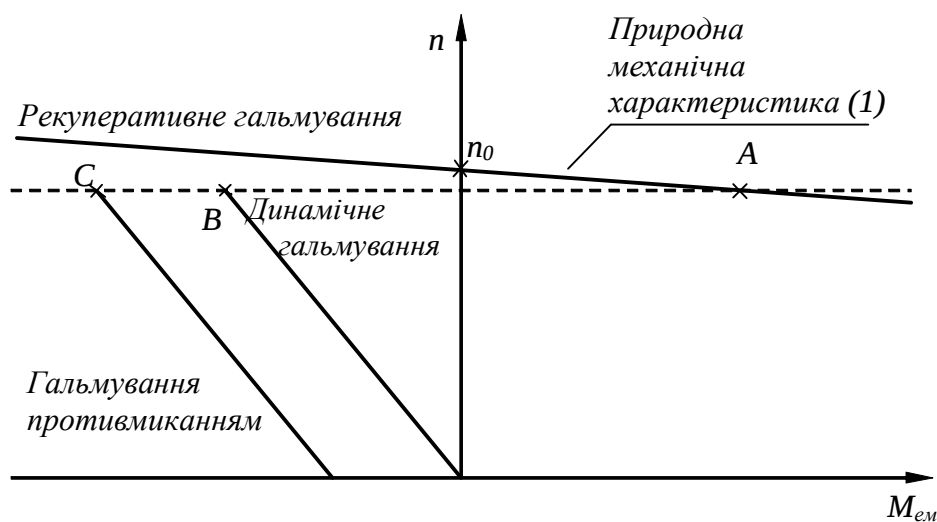


Рис. 23.18. Способи електричного гальмування двигунів постійного струму

Рекуперативне гальмування. Нехай двигун спочатку працював на природній механічній характеристиці в точці A . Якщо надалі навантаження двигуна зменшується, то його частота обертання буде збільшуватися співвідносно механічній характеристиці I . При холостому ході частота обертання двигуна стане рівною n_0 .

Якщо ж навантаження має характер потяга, що рухається з ухилу, то двигун може бути розігнаний до швидкості $n > n_0$. При цьому він перейде в режим рекуперативного гальмування, тобто стане генератором і буде віддавати енергію в мережу. Характеристика рекуперативного гальмування є продовження характеристики I в другий квадрат.

Відповідно до цієї характеристики момент на валу машини стане негативним, тобто гальмовим стосовно моменту навантаження.

Стала частота обертання при цьому визначиться в точці, коли наступить рівновага між обертаючим моментом навантаження і гальмовим моментом машини.

Динамічне гальмування. При цьому способі гальмування, двигун відключається від живильної мережі і включається на деякий додатковий опір $R_{\text{доп}}$. При цьому струм якоря визначається залежністю:

$$I_a = -E_a / (R_a + R_{\text{доп}}) \quad (23.17)$$

З приведенного виразу очевидно, що напрямок струму в якорі зміниться на протилежний, а, отже, момент на валу машини змінить свій знак.

Якщо двигун працював спочатку в точці A , то характеристика динамічного гальмування бере свій початок від точки B , що розташована на прямій, що проходить через точку A паралельно осі абсцис. Положення точки B залежить від значення $R_{\text{доп}}$, що включається в коло якоря.

Для ефективного динамічного гальмування обмотка збудження двигуна включається за схемою незалежного живлення.

Гальмування противмиканням. Цей спосіб гальмування застосовується при екстреній зупинці двигуна.

Двигун відключається від живильної мережі, а потім включається з протилежною полярністю затискачів обмотки якоря.

Якщо спочатку двигун працював у точці A , то характеристика гальмування противмиканням бере свій початок від деякої точки $З$, що розташована на прямій, що проходить через точку A і паралельно осі абсцис.

Для обмеження струму якоря необхідно в коло якоря включити додатковий опір, що визначає положення точки C .

Після зупинки двигуна $n = 0$, його необхідно відключити від живильної мережі, оскільки він буде обертатися з протилежним напрямком.

Контрольні питання

1. Принципові електричні схеми двигунів паралельного, послідовного і змішаного збудження. Призначення елементів схеми.
2. Основні рівняння двигуна і зміст величин, що туди входять.
3. Які способи обмеження пускового струму застосовуються в двигунах постійного струму?
4. З якою метою при пуску двигуна паралельного збудження опір реостата в колі збудження встановлюють мінімальним?
5. Порівняння робочих характеристик двигунів паралельного і послідовного збудження
6. Порівняння механічних характеристик двигунів паралельного і послідовного збудження.
7. Порівняйте двигуни паралельного і послідовного збудження по їхніх регулювальних властивостях.

Список рекомендованой литературы

1. Антонов М.В., Герасимова Л.С. Технология производства электрических машин. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 512 с.
2. Брускин Д.Э., Зорохович А.Е., Хвостов В.С. Электрические машины. – М.: Высшая школа. Часть I, 1979. 288 с. Часть II, 1979. – 304 с.
3. Важнов А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1974. – 840 с.
4. Вольдек А.И. Электрические машины. – Л.: Энергия, 1978. – 832 с.
5. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с.
6. Кацман М.М. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 2002. – 469 с.
7. Кононенко Е.В., Сипайлов Г.А., Хорьков К.А. Электрические машины. – М.: Высшая школа, 1975. – 279 с.
8. Копылов И.П. Электрические машины. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 360 с.
9. Костенко М.П., Пиотровский Л.М. Электрические машины. – Л.: Энергия. Часть I, 1972. – 544 с. Часть II, 1973. – 648 с.
10. Петров Г.Н. Электрические машины. – М.: Энергия. Часть I, 1974. – 240 с. Часть II, 1963. – 416 с. Часть III, 1968. – 224 с.
11. Проектирование электрических машин. Учеб. для вузов / И.П. Копылов, Б.К. Клоков, В.П. Морозкин, Б.Ф. Токарев; Под ред. И.П. Копылова. – 3-е изд., испр и доп. – М.: Высшая школа. 2002. – 757 с.
12. Тихомиров П.М. Расчет трансформаторов. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 528 с.
13. Юферов Ф.М. Электрические машины автоматических устройств. – М.: Высшая школа. 1976. – 416 с.
14. Электротехнический справочник /Под общ. Ред. В.Г. Герасимова, П.Г. Грудинского, Л.А. Жукова и др. – М.: Энергоатомиздат. Т.1, 1980. – 520 с. Т.2, 1981. – 640 с.

З М І С Т

ВСТУП	3
В.1 Електричні машини, їх призначення та класифікація	3
В.2 Перетворення енергії в електричних машинах	4
Розділ І. ТРАНСФОРМАТОРИ	7
Глава І. Робочий процес трансформатора	7
1.1 Принцип роботи трансформатора, основні визначення	7
1.2 Типи трансформаторів, номінальні дані	9
1.3 Будова та основні конструктивні елементи силових трансформаторів	10
1.4 Схеми і групи з'єднання обмоток трансформаторів	15
1.5 Основні рівняння трансформатора	21
1.6 Приведений трансформатор та схема заміщення приведенного трансформатора	25
<i>Контрольні питання</i>	29
Глава 2. Холостий хід і коротке замикання трансформатора	30
2.1 Фізичні умови роботи трансформатора в режимі холостого ходу, основні співвідношення і схема заміщення	30
2.2 Дослід холостого ходу трансформатора	32
2.3 Особливості режиму холостого ходу трифазних трансформаторів	34
2.4 Фізичні умови роботи трансформатора при короткому замиканні, основні співвідношення і векторна діаграма	36
2.5 Схема заміщення трансформатора при короткому замиканні і трикутник короткого замикання	39
2.6 Дослід короткого замикання трансформатора	40
<i>Контрольні питання</i>	43
Глава 3. Навантажувальний режим роботи трансформатора	44
3.1 Фізичні умови роботи трансформатора під навантаженням, основні рівняння і векторні діаграми	44
3.2 Спрощена схема заміщення і спрощені векторні діаграми трансформатора, що працює під навантаженням	46
3.3 Залежність вихідної напруги трансформатора від роду навантаження	47
3.4 Зміна вихідної напруги трансформатора	48
3.5 Втрати і коефіцієнт корисної дії трансформатора	50
3.6 Регулювання напруги трансформаторів	54
<i>Контрольні питання</i>	57
Глава 4. Несиметричні режими трансформаторів	59
4.1 Умови роботи трансформаторів при несиметричних навантаженнях	59
4.2 Метод аналізу несиметричних режимів трансформатора	60
4.3 Несиметричне навантаження трансформаторів при відсутності струмів нульової послідовності	62
4.4 Несиметричні режими трансформаторів при наявності струмів нульової послідовності	63

<i>Контрольні питання</i>	66
Глава 5. Паралельна робота трансформаторів	67
5.1 Умови включення трансформаторів на паралельну роботу	67
5.2 Процеси в трансформаторах при невиконанні умов паралельної роботи	69
<i>Контрольні питання</i>	76
Глава 6. Перехідні процеси в трансформаторах	77
6.1 Загальні відомості	77
6.2 Надструми в трансформаторах	77
6.3 Перенапруга в трансформаторах	79
<i>Контрольні питання</i>	83
Глава 7. Різновиди трансформаторів	84
7.1 Триобмоточні трансформатори	84
7.2 Автотрансформатори	88
7.3 Двообмоточні трансформатори з розщепленою первинною (або вторинною) обмоткою	90
<i>Контрольні питання</i>	91
Розділ 2. АСИНХРОННІ МАШИНИ	92
Глава 8. Будова та принцип дії асинхронних машин	92
8.1 Типи і конструктивні елементи асинхронних машин	92
8.2 Трифазні обмотки змінного струму	96
8.3 Електрорушійні сили, що індукуються в обмотках змінного струму	109
8.4 Магніторушійна сила трифазної обмотки статора	116
8.5 Принцип дії і режими роботи асинхронної машини	118
<i>Контрольні питання</i>	123
Глава 9. Робочий процес трифазної асинхронної машини	124
9.1 Основні співвідношення для асинхронної машини при нерухомому роторі	124
9.2 Основні співвідношення для асинхронної машини при обертовому роторі	130
9.3 Схема заміщення асинхронного двигуна при обертовому роторі	132
<i>Контрольні питання</i>	135
Глава 10. Електромагнітний момент і робочі характеристики асинхронних двигунів	136
10.1 Енергетична діаграма, втрати і ККД асинхронного двигуна	136
10.2 Електромагнітний момент асинхронного двигуна	137
10.3 Механічні характеристики асинхронної машини	139
10.4 Робочі характеристики асинхронного двигуна	143
<i>Контрольні питання</i>	145
Глава 11. Кругові діаграми асинхронної машини	146
11.1 Поняття кругової діаграми асинхронної машини	146
11.2 Обґрунтування спрощеної кругової діаграми асинхронного двигуна	147
11.3 Розрахунок робочих характеристик асинхронного двигуна по спрощеній круговій діаграмі	148
11.4 Побудова кругової діаграми по експериментальним даним	155
11.5 Уточнена кругова діаграма	157

11.6 Аналітичний метод розрахунку робочих характеристик асинхронних двигунів	157
<i>Контрольні питання</i>	162
Глава 12. Пуск і регулювання частоти обертання трифазних асинхронних двигунів	163
12.1 Загальні відомості	163
12.2 Пуск двигунів з фазним ротором	163
12.3 Пуск двигунів з короткозамкнутим ротором	165
12.4 Короткозамкнуті асинхронні двигуни з поліпшеними пусковими характеристиками	170
12.5 Регулювання частоти обертання асинхронних двигунів	172
<i>Контрольні питання</i>	178
Глава 13. Особливі режими роботи асинхронних машин	179
13.1 Індукційний регулятор напруги і фазорегулятор	179
13.2 Робота трифазного асинхронного двигуна від однофазної мережі	181
<i>Контрольні питання</i>	182
Розділ 3. СИНХРОННІ МАШИНИ	183
Глава 14. Типи і конструктивні елементи синхронних машин	183
14.1 Будова і основні конструктивні елементи синхронних машин	183
14.2 Принцип роботи синхронного генератора	186
<i>Контрольні питання</i>	188
Глава 15. Реакція якоря і векторні діаграми синхронного генератора	189
15.1 Поняття реакції якоря	189
15.2 Реакція якоря синхронного генератора в граничних випадках навантаження	190
15.3 Особливості обліку реакції якоря в явнополюсних і неявнополюсних синхронних машинах	195
15.4 Основні векторні діаграми ЕРС явнополюсного синхронного генератора	198
15.5 Перетворені векторні діаграми ЕРС явнополюсного синхронного генератора	200
<i>Контрольні питання</i>	202
Глава 16. Робота синхронного генератора на автономне навантаження	203
16.1 Робочі характеристики синхронного генератора	203
16.2 Зміна вихідної напруги синхронного генератора і діаграма електромагніторушійних сил (ЕМРС)	208
16.3 Розрахунок реактивних параметрів синхронного генератора	211
16.4 Енергетична діаграма, втрати і ККД синхронного генератора	215
16.5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного генератора, кутова характеристика	216
<i>Контрольні питання</i>	220
Глава 17. Паралельна робота синхронних генераторів	221
17.1 Загальні відомості	221
17.2 Умови включення синхронного генератора на паралельну роботу	221
17.3 Регулювання активної потужності генератора, що працює паралельно з мережею, синхронізуюча потужність і синхронізуючий момент	224

17.4 Регулювання реактивної потужності, паралельно працюючого синхронного генератора, U – образні характеристики	227
17.5 Поняття про статичну і динамічну стійкість синхронного генератора при паралельній роботі	231
<i>Контрольні питання</i>	232
Глава 18. Синхронний двигун і синхронний компенсатор	233
18.1 Основні відомості про синхронний двигун	233
18.2 Принцип дії синхронного двигуна	233
18.3 Пуск синхронних двигунів	235
18.4 Діаграма ЕРС синхронного двигуна	236
18.5 Електромагнітна потужність і електромагнітний момент синхронного двигуна	237
18.6 Робочі і U -образні характеристики синхронного двигуна	238
18.7 Синхронні компенсатори	240
<i>Контрольні питання</i>	241
Розділ 4. МАШИНИ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	242
Глава 19. Будова і принцип дії машин постійного струму	242
19.1 Типи й основні конструктивні елементи машин постійного струму	242
19.2 Принцип дії колекторної машини постійного струму	249
19.3 Обмотки машин постійного струму	251
19.4 Електрорушійна сила обмотки якоря та електромагнітний момент	266
<i>Контрольні питання</i>	269
Глава 20. Магнітне поле машини постійного струму	270
20.1 Магнітне коло машини постійного струму при холостому ході і метод її розрахунку	270
20.2 Магнітне коло машини постійного струму при навантаженні	273
<i>Контрольні питання</i>	278
Глава 21. Комутація в машинах постійного струму	279
21.1 Фізична сутність комутації і її вплив на роботу машини	279
21.2 Причини, що викликають іскріння на колекторі	283
21.3 Основні способи поліпшення комутації	285
<i>Контрольні питання</i>	288
Глава 22. Генератори постійного струму	289
22.1 Класифікація генераторів постійного струму по способу збудження	289
22.2 Основні рівняння генераторів постійного струму	291
22.3 Робочі характеристики генераторів постійного струму	292
22.4 Умови самозбудження генераторів постійного струму	300
<i>Контрольні питання</i>	302
Глава 23. Двигуни постійного струму	303
23.1 Основні поняття	303
23.2 Основні рівняння двигунів постійного струму	304
23.3 Пуск у хід двигунів постійного струму	306
23.4 Робочі і механічні характеристики двигунів постійного струму	308

23.5 Регулювання частоти обертання двигунів постійного струму	313
23.6 Електричне гальмування двигунів постійного струму	320
<i>Контрольні питання</i>	322
Список рекомендованої літератури	323

Електричні машини. Навчальний посібник /
Г.Г.Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П.Довгань.
-Дніпропетровськ,Видавництво Національного
гірничого університету, 2003, - с.

Розглядаються принципи пристрою електричних машин, викладаються основні питання їхньої теорії, аналізу режимів роботи і висвітлюються їхні експлуатаційні властивості.

Книга написана відповідно до програми курсу "Електричні машини" і призначається як навчальний посібник для студентів спеціальностей напрямку "Електротехніка".

Рецензенти:

кафедра електропривода КГТУ
д-р техн. наук, професор Л.В.Дубинець

© Г.Г.Півняк, Ф.П.Шкрабець, В.П.Довгань
© Національний гірничий університет